



**UNIVERSIDAD ANDINA**

**NÉSTOR CÁCERES VELÁSQUEZ**

**FACULTAD DE INGENIERÍAS Y CIENCIAS PURAS**

**ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA SANITARIA Y AMBIENTAL**



**DINÁMICA GLACIAR DEL NEVADO SORAPATA Y SU  
RELACIÓN CON VARIABLES CLIMÁTICAS EN LA  
CORDILLERA DE APOLOBAMBA  
REGIÓN PUNO 2025**

**TESIS PRESENTADA POR:**

**Bach. ROXANA FERNANDEZ HUANACUNI**

**PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE:  
INGENIERO SANITARIO Y AMBIENTAL**

**JULIACA – PERÚ**

**2025**



**UNIVERSIDAD ANDINA**

**NÉSTOR CÁCERES VELÁSQUEZ**

**FACULTAD DE INGENIERÍAS Y CIENCIAS PURAS**

**ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA SANITARIA Y AMBIENTAL**

**DINÁMICA GLACIAR DEL NEVADO SORAPATA Y SU  
RELACIÓN CON VARIABLES CLIMÁTICAS EN LA  
CORDILLERA DE APOLOBAMBA  
REGIÓN PUNO 2025**

**TESIS PRESENTADA POR:**

**Bach. ROXANA FERNANDEZ HUANACUNI**

**PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE:  
INGENIERO SANITARIO Y AMBIENTAL**

**APROBADA POR EL JURADO REVISOR:**

**PRESIDENTE**

:   
Dr. CESAR GUILLERMO CAMARGO NAJAR

**PRIMER MIEMBRO**

:   
Mgtr. FRANZ JOSEPH BARAHONA PERALES

**SEGUNDO MIEMBRO**

:   
M.Sc. JESÚS ESTEBAN CASTILLO MACHACA

**ASESOR DE TESIS**

:   
Ing. ADWAR RANULFO SANCHEZ CARREÓN

**LÍNEA DE INVESTIGACIÓN** : CONTAMINACIÓN Y CALIDAD AMBIENTAL – P22



**RESOLUCIÓN DECANAL N° 1204-2025-D-UI-FICP-UANCV**

Juliaca, 30 de septiembre del 2025

**VISTO:** El expediente N° 2025 - CU - 8607 presentado por el (la) Bachiller: **ROXANA FERNANDEZ HUANCUNI** estudiante de la Escuela Profesional de **Ingeniería Sanitaria y Ambiental** de la Facultad de Ingenierías y Ciencias Puras quien solicita **NOMINACIÓN DE JURADOS Y PROGRAMACIÓN DE FECHA Y HORA DE SUSTENTACIÓN.**

**CONSIDERANDO:**

Que, el (la) Bach. **ROXANA FERNANDEZ HUANCUNI**, quien solicita **NOMINACIÓN DE JURADOS Y PROGRAMACIÓN DE FECHA Y HORA DE SUSTENTACIÓN** de la Tesis Titulada: **DINÁMICA GLACIAR DEL NEVADO SORAPATA Y SU RELACIÓN CON VARIABLES CLIMÁTICAS EN LA CORDILLERA DE APOLOBAMBA REGIÓN PUNO 2025**, la misma que pertenece a la línea de investigación **CONTAMINACIÓN Y CALIDAD AMBIENTAL** para optar el Título Profesional de **Ingeniero Sanitario y Ambiental.**

Que, al haberse cumplido con los requisitos exigidos por el reglamento interno de trabajos de investigación conducente a grados y títulos mediante Resolución N° 0294-2023 UANCV-CU-R. y en concordancia con el dictamen de similitud.

De conformidad al Reglamento Interno de Trabajos de Investigación Conducente a Grados y Títulos aprobado con Resolución N° 0294-2023 UANCV-CU-R. y en merito al Art. 24, Art. 28 del reglamento, con fines de obtención de Grados Académicos y Títulos Profesionales, y en uso a las atribuciones, que le concede la ley Universitaria N° 30220, ley de creación de la UANCV N° 23738 y modificatoria N° 24661, y el Estatuto de la UANCV, el Decano y el Director de la Unidad de Investigación de la Facultad de Ingenierías y Ciencias Puras.

**RESUELVE:**

**ARTÍCULO PRIMERO.- APROBAR**, la **NOMINACIÓN DE JURADOS** integrado por los siguientes docentes:

- \* **Presidente** : Dr. CESAR GUILLERMO CAMARGO NAJAR
- \* **1er Miembro** : Mgtr. FRANZ JOSEPH BARAHONA PERALES
- \* **2do Miembro** : M.Sc. JESÚS ESTEBAN CASTILLO MACHACA

**ARTICULO SEGUNDO. - RECONOCER** como asesor de la investigación (tesis) de la Facultad de Ingenierías y Ciencias Puras al (a la) docente, **Ing. ADWAR RANULFO SANCHEZ CARREÓN.**

**ARTICULO TERCERO. - APROBAR**, la **FECHA Y HORA DE SUSTENTACIÓN DE LA TESIS** de él (la) bachiller: **ROXANA FERNANDEZ HUANCUNI**; del informe final de la investigación (tesis) titulada: **DINÁMICA GLACIAR DEL NEVADO SORAPATA Y SU RELACIÓN CON VARIABLES CLIMÁTICAS EN LA CORDILLERA DE APOLOBAMBA REGIÓN PUNO 2025** para optar el Título Profesional de **Ingeniero Sanitario y Ambiental.** de acuerdo al siguiente detalle:

- \* **FECHA** : viernes 10 de octubre del 2025
- \* **HORA** : 15:30 horas
- \* **LUGAR** : Aula 406 - FICP

**ARTÍCULO CUARTO.- DISPONER** que, la Unidad de Investigación, Responsables del Comité de Investigación de la Facultad de Ingenierías y Ciencias Puras y el Director de la Escuela Profesional de **Ingeniería Sanitaria y Ambiental** quedan encargados del cumplimiento de la presente Resolución.

Regístrese, Comuníquese, Archívese.



UNIVERSIDAD ANDINA "NÉSTOR CÁCERES VELÁSQUEZ"  
FACULTAD DE INGENIERÍAS Y Cs. PURAS

Dr. OSCAR V. VIAMONTE CALLA  
DECANO (e)  
CIP. 32730



UNIVERSIDAD ANDINA "NÉSTOR CÁCERES VELÁSQUEZ"  
FACULTAD DE INGENIERÍAS Y CIENCIAS PURAS

Dr. Fritz Willy Mamani Apaza  
DIRECTOR  
UNIDAD DE INVESTIGACIÓN

cc.  
Archivo  
interesado (a)



**RESOLUCIÓN DECANAL N° 708-2025-D-UI-FICP-UANCV**

Juliaca, 18 de julio del 2025

**VISTO:** El expediente N° 2025-CU - 5307 por el señor (a): **ROXANA FERNANDEZ HUANACUNI** quien solicita **REVISIÓN DEL INFORME FINAL DE LA INVESTIGACIÓN (borrador de tesis)**, el PROVEIDO - N° 536- 2025-UI-FICP-UANCV/J, y la **FICHA DE OPINIÓN DEL INFORME FINAL DE LA INVESTIGACION (BORRADOR DE TESIS)** formato N° 027- 2025 del integrante del comité de investigación **EPISA** de la Facultad de Ingenierías y Ciencias Puras, según al reglamento interno de trabajos de investigación conducente a grados y títulos.

**CONSIDERANDO:**

Que, el señor (a): **ROXANA FERNANDEZ HUANACUNI**, ha presentado su informe final de la investigación (borrador de tesis) Titulado: **DINÁMICA GLACIAR DEL NEVADO SORAPATA Y SU RELACIÓN CON VARIABLES CLIMÁTICAS EN LA CORDILLERA DE APOLOBAMBA REGIÓN PUNO 2025**, para optar el Título Profesional de **Ingeniero Sanitario y Ambiental**.

Que, al haberse cumplido con los requisitos exigidos por el Reglamento Interno de Trabajo de Investigación Conducente a Grados y Títulos, con fines de obtención de Grados Académicos y Títulos Profesionales; el integrante del comité de investigación **MSc. Jesus Esteban Castillo Machaca** de la Escuela Profesional de **Ingeniería Sanitaria y Ambiental** de la Facultad de Ingenierías y Ciencias Puras, emitió la ficha de opinión del informe final de la investigación (borrador de tesis) formato N° 027- 2025 **aprobando** el informe final de la investigación (borrador de tesis) titulado: **DINÁMICA GLACIAR DEL NEVADO SORAPATA Y SU RELACIÓN CON VARIABLES CLIMÁTICAS EN LA CORDILLERA DE APOLOBAMBA REGIÓN PUNO 2025**, Correspondiente a la línea de investigación **CONTAMINACION Y CALIDAD AMBIENTAL**.

Que, al haberse cumplido con los requisitos exigidos por el reglamento interno de trabajos de investigación conducentes a grados y títulos mediante Resolución N° 0294-2023 UANCV-CU-R. y estando a la opinión favorable del comité de investigación respecto al informe final de la investigación (borrador de tesis).

Estando, con la opinión favorable del Comité de Investigación de la Facultad de Ingenierías y Ciencias Puras y en concordancia al Reglamento Interno de Trabajos de Investigación Conducente a Grados y Títulos aprobado con Resolución N° 0294-2023 UANCV-CU-R. y en merito al Art. 27 del reglamento, con fines de obtención de Grados Académicos y Títulos Profesionales, y en uso a las atribuciones, que le concede la ley Universitaria N° 30220, ley de creación de la UANCV N° 23738 y modificatoria N° 24661, y el Estatuto de la UANCV, el Decano y el Director de la Unidad de Investigación de la Facultad de Ingenierías y Ciencias Puras.

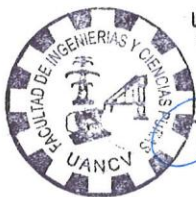
**RESUELVE:**

**ARTÍCULO PRIMERO.- APROBAR**, el **INFORME FINAL DE LA INVESTIGACIÓN (BORRADOR DE TESIS)**, para la **REVISIÓN DE SIMILITUD TURNITIN**, presentado por el señor (a): **ROXANA FERNANDEZ HUANACUNI**, para optar el Título Profesional de Ingeniero Sanitario y Ambiental, con el Tema Titulado: **DINÁMICA GLACIAR DEL NEVADO SORAPATA Y SU RELACIÓN CON VARIABLES CLIMÁTICAS EN LA CORDILLERA DE APOLOBAMBA REGIÓN PUNO 2025** correspondiente a la línea de investigación **CONTAMINACION Y CALIDAD AMBIENTAL**, en virtud a los considerandos expuestos.

**ARTÍCULO SEGUNDO.- RATIFICAR** como **ASESOR DE INVESTIGACIÓN** al (a) la), Ing. **ADWAR RANULFO SANCHEZ CARREON**.

**ARTÍCULO TERCERO.- DISPONER** que, la Unidad de Investigación, Responsables del Comité de Investigación de la Facultad de Ingenierías y Ciencias Puras y el Director de la Escuela Profesional de **Ingeniería Sanitaria y Ambiental** quedan encargados del cumplimiento de la presente Resolución.

Regístrese, Comuníquese, Archívese.



UNIVERSIDAD ANDINA "NÉSTOR CÁCERES VELÁSQUEZ"  
FACULTAD DE INGENIERÍAS Y Cs. PURAS

Dr. **OSCAR V. VIAMONTE CALLA**  
DECANO (e)  
CIP. 32730



UNIVERSIDAD ANDINA "NÉSTOR CÁCERES VELÁSQUEZ"  
FACULTAD DE INGENIERÍAS Y CIENCIAS PURAS

Dr. **Fritz Wilky Mamani Apaza**  
DIRECTOR  
UNIDAD DE INVESTIGACIÓN

cc.  
Archivo  
interesado (a)



**RESOLUCIÓN DECANAL N° 394-2025-D-UI-FICP-UANCV**

Juliaca, 03 de junio del 2025

**VISTO:** El expediente N° 2025-CU- 3408, presentado por el señor (a) **ROXANA FERNANDEZ HUANACUNI** solicitando **APROBACIÓN DE LA PROPUESTA DE INVESTIGACIÓN** el **PROVEIDO - N° 303-2025-UI-FICP-UANCV/J**, y la **FICHA DE OPINIÓN DE LA PROPUESTA DE INVESTIGACIÓN** formato N° 019-2025 del integrante del comité de investigación **EPISA** de la Facultad de Ingenierías y Ciencias Puras, según al reglamento interno de trabajos de investigación conducente a grados y títulos.

**CONSIDERANDO:**

Que, el señor (a): **ROXANA FERNANDEZ HUANACUNI** ha presentado su propuesta de investigación Titulada: **DINÁMICA GLACIAR DEL NEVADO SORAPATA Y SU RELACIÓN CON VARIABLES CLIMÁTICAS EN LA CORDILLERA DE APOLOBAMBA REGIÓN PUNO 2025**, para optar el Título Profesional de **Ingeniero Sanitario y Ambiental**.

Que, al haberse cumplido con los requisitos exigidos por el Reglamento Interno de Trabajo de Investigación Conducente a Grados y Títulos, con fines de obtención de Grados Académicos y Títulos Profesionales; el integrante del comité de investigación **MSc. Jesus Esteban Castillo Machaca** de la Escuela Profesional de **Ingeniería Sanitaria y Ambiental** de la Facultad de Ingenierías y Ciencias Puras, emitió la ficha de opinión de la propuesta de investigación formato N° 019-2025- aprobando la propuesta de investigación titulada: **DINÁMICA GLACIAR DEL NEVADO SORAPATA Y SU RELACIÓN CON VARIABLES CLIMÁTICAS EN LA CORDILLERA DE APOLOBAMBA REGIÓN PUNO 2025**.

Que, es requisito indispensable contar con un asesor docente ordinario y/o contratado de la Facultad de Ingenierías y Ciencias Puras con un mínimo de cinco años de docencia, grado de doctor o magister y experiencia en la línea a investigar, o deberá estar acreditado por Resolución 0989-2022-UANCV-CU-R, quien asumirá como asesor de la propuesta de investigación, según el área o grado.

Estando, con la opinión favorable de la propuesta de investigación del Comité de Investigación de la Facultad de Ingenierías y Ciencias Puras y en concordancia al Reglamento Interno de Trabajos de Investigación Conducente a Grados y Títulos aprobado con Resolución N° 0294-2023 UANCV-CU-R. y en merito al Art. 25 del reglamento, con fines de obtención de Grados Académicos y Títulos Profesionales, y en uso a las atribuciones, que le concede la ley Universitaria N° 30220, ley de creación de la UANCV N° 23738 y modificatoria N° 24661, y el Estatuto de la UANCV, el Decano y el Director de la Unidad de Investigación de la Facultad de Ingenierías y Ciencias Puras.

**RESUELVE:**

**ARTÍCULO PRIMERO.- APROBAR**, la **PROPUESTA DE INVESTIGACIÓN**, presentado por el señor (a): **ROXANA FERNANDEZ HUANACUNI**, para optar el Título Profesional de **Ingeniero Sanitario y Ambiental**, con el Tema Titulada: **DINÁMICA GLACIAR DEL NEVADO SORAPATA Y SU RELACIÓN CON VARIABLES CLIMÁTICAS EN LA CORDILLERA DE APOLOBAMBA REGIÓN PUNO 2025** correspondiente a la línea de investigación **CONTAMINACION Y CALIDAD AMBIENTAL**.

La misma que deberá proceder con la ejecución de la propuesta de Investigación aprobado de acuerdo a lo establecido en el Reglamento Interno de Trabajo de Investigación Conducente a Grados y Títulos, con fines de obtención de Grados Académicos y Títulos Profesionales.

**ARTÍCULO SEGUNDO.- RECONOCER** como **ASESOR DE INVESTIGACIÓN** de al (a la) docente **Ing. ADWAR RANULFO SANCHEZ CARREON**.

**ARTÍCULO TERCERO.- DISPONER** que, la Unidad de Investigación, Responsables del Comité de Investigación de la Facultad de Ingenierías y Ciencias Puras y el Director de la Escuela Profesional de **Ingeniería Sanitaria y Ambiental** quedan encargados del cumplimiento de la presente Resolución.

Regístrese, Comuníquese, Archívese.

  
UNIVERSIDAD ANDINA "NÉSTOR CÁCERES VELÁSQUEZ"  
FACULTAD DE INGENIERÍAS Y C. PURAS  
  
Dr. OSCAR V. VIAMONTE CALLA  
DECANO (e)  
CIP. 32730

  
UNIVERSIDAD ANDINA "NÉSTOR CÁCERES VELÁSQUEZ"  
FACULTAD DE INGENIERÍAS Y C. PURAS  
JULIACA  
DIRECTOR  
  
Dr. Briza Vally Maman Apaza  
DIRECTOR  
UNIDAD DE INVESTIGACIÓN

cc.  
Archivo 2025  
Interesado (a)



## DINÁMICA GLACIAR DEL NEVADO SORAPATA Y SU RELACIÓN CON VARIABLES CLIMÁTICAS EN LA CORDILLERA DE APOLOBAMBA REGIÓN PUNO 2025

### INFORME DE ORIGINALIDAD

10%

INDICE DE SIMILITUD

9%

FUENTES DE INTERNET

3%

PUBLICACIONES

3%

TRABAJOS DEL ESTUDIANTE


### FUENTES PRIMARIAS

1	Submitted to Universidad Andina Nestor Caceres Velasquez Trabajo del estudiante	1%
2	repositorio.upn.edu.pe Fuente de Internet	1%
3	hdl.handle.net Fuente de Internet	1%
4	repositorio.upsc.edu.pe Fuente de Internet	1%
5	www.iperu.org Fuente de Internet	1%
6	repositorio.uancv.edu.pe Fuente de Internet	1%
7	repositorio.continental.edu.pe Fuente de Internet	<1%
8	repositorio.inaigem.gob.pe Fuente de Internet	<1%



### Metadatos complementarios

Título de la Tesis	
<b>DINÁMICA GLACIAR DEL NEVADO SORAPATA Y SU RELACIÓN CON VARIABLES CLIMÁTICAS EN LA CORDILLERA DE APOLOBAMBA REGIÓN PUNO 2025</b>	
<b>Datos de autor</b>	
Nombres y apellidos	ROXANA FERNANDEZ HUANACUNI
Tipo de documento de identidad	DNI
Número de documento de identidad	73773584
URL de ORCID	<a href="https://orcid.org/0009-0002-9543-6693">https://orcid.org/0009-0002-9543-6693</a>
<b>Datos de asesor</b>	
Nombres y apellidos	ADWAR RANULFO SANCHEZ CARREÓN
Tipo de documento de identidad	DNI
Número de documento de identidad	02064066
URL de ORCID	<a href="https://orcid.org/0000-0001-8065-6533">https://orcid.org/0000-0001-8065-6533</a>
<b>Datos del jurado</b>	
<b>Presidente del jurado</b>	
Nombres y apellidos	CESAR GUILLERMO CAMARGO NAJAR
Tipo de documento	DNI
Número de documento de identidad	02441152
<b>Miembro del jurado 1</b>	
Nombres y apellidos	FRANZ JOSEPH BARAHONA PERALES
Tipo de documento	DNI
Número de documento de identidad	02442876
<b>Miembro del jurado 2</b>	
Nombres y apellidos	JESÚS ESTEBAN CASTILLO MACHACA
Tipo de documento	DNI
Número de documento de identidad	01323821

<b>Datos de investigación</b>	
Línea de investigación	Contaminación y calidad ambiental - P22
Grupo de investigación	No aplica.
Agencia de financiamiento	Sin financiamiento.
Ubicación geográfica de la investigación	<p><b>País:</b> Perú  <b>Departamento:</b> Puno  <b>Provincia:</b> San Antonio de Putina  <b>Coordenadas:</b>  <b>Latitud:</b> 15°27'938"S  <b>Longitud:</b> 70°34'174"O  <b>URL Maps:</b>  <a href="https://www.google.com/maps/d/edit?mid=18koWHV OFLMkisgtu-QdUU9Umb9cmsCo&amp;usp=sharing">https://www.google.com/maps/d/edit?mid=18koWHV OFLMkisgtu-QdUU9Umb9cmsCo&amp;usp=sharing</a></p> 
Año o rango de años en que se realizó la investigación	Junio 2025 – Setiembre 2025
URL de disciplinas OCDE <a href="https://concytec-pe.github.io/Peru-CRIS/vocabularios/ocde_ford.html">https://concytec-pe.github.io/Peru-CRIS/vocabularios/ocde_ford.html</a> Librería	<p><b>Ingeniería ambiental</b>  <a href="https://purl.org/pe-repo/ocde/ford#2.07.00">https://purl.org/pe-repo/ocde/ford#2.07.00</a></p> <p><b>Ciencias del medio ambiente</b>  <a href="https://purl.org/pe-repo/ocde/ford#1.05.08">https://purl.org/pe-repo/ocde/ford#1.05.08</a></p>

UNIVERSIDAD ANDINA NESTOR CÁCERES VELÁSQUEZ  
 FACULTAD DE INGENIERÍAS Y CIENCIAS PURAS  
 DIRECTOR  
 Dr. Fritz Willy Mamani Apaza  
 DIRECTOR  
 UNIDAD DE INVESTIGACIÓN



### DECLARACIÓN DE AUTENTICIDAD Y RESPONSABILIDAD

Yo ROXANA FERNANDEZ HUANACUNI, identificado con DNI  
Nro. 73773584, en mi condición de egresado de:

- Escuela Profesional
- Programa de Segunda Especialidad,
- Programa de Maestría o Doctorado

INGENIERÍA SANITARIA Y AMBIENTAL

informo que he elaborado el/la  Tesis o  Trabajo de Investigación,  Trabajo Académico denominada:  
"DINÁMICA GLACIAR DEL NEVADO SORAPATA Y SU RELACIÓN CON VARIABLES CLIMÁTICAS EN LA CORDILLERA DE APOLOBAMBA REGIÓN PUNO 2025"

Asesorado por: Ing. ADWAR RANULFO SANCHEZ CARREON

Es un tema original.

Declaro que el presente trabajo de tesis es elaborado por mi persona y no existe plagio/copia de ninguna naturaleza, en especial de otro documento de investigación (tesis, revista, texto, congreso, o similar) presentado por persona natural o jurídica alguna ante instituciones académicas, profesionales, de investigación o similares, en el país o en el extranjero.

Dejo constancia que las citas de otros autores han sido debidamente identificadas en el trabajo de investigación, por lo que no asumiré como tuyas las opiniones vertidas por terceros, ya sea de fuentes encontradas en medios escritos, digitales o Internet.

Asimismo, ratifico que soy plenamente consciente de todo el contenido de la tesis y asumo la responsabilidad de cualquier error u omisión en el documento, así como de las connotaciones éticas y legales involucradas.

El incumplimiento de lo declarado da lugar a responsabilidad del declarante, en consecuencia; a través del presente documento asumo frente a terceros, la Universidad Andina Néstor Cáceres Velásquez y/o la Administración Pública toda responsabilidad que pueda derivarse por el trabajo final presentado. Lo señalado incluye responsabilidad pecuniaria incluido el pago de multas u otros por los daños y perjuicios que se ocasionen.

Juliaca 13 de OCTUBRE del 2025

  
Firma del Asesor

  
Firma del Estudiante

  
Huella



## DEDICATORIA

Dirijo esta obra al Todopoderoso, origen de todo conocimiento y poder, que ha iluminado mi trayecto durante esta etapa. De no haber sido por Su inquebrantable respaldo, el cumplimiento de esta meta hubiera resultado inalcanzable.

A mis progenitores, quienes fueron mi fuente inagotable de amor, sacrificio y apoyo incondicional. Su dedicación y enseñanzas han sido la fuerza impulsora detrás de este logro. Sin su constante respaldo, este objetivo no habría sido alcanzado.

A mis hermanos y amigos, quienes generosamente compartieron su conocimiento y siempre estuvieron dispuestos a brindarme su ayuda sin esperar nada a cambio.

A quienes me acompañaron incondicionalmente a lo largo de este sexenio, brindándome su respaldo y fe.



## AGRADECIMIENTO

A Dios, mi guía y fortaleza, quien me ha acompañado en todo momento, siendo la luz que ilumina mi camino con humildad y gratitud. Sin Su presencia constante, este logro no hubiera sido posible.

A la UANCV y a la EPISA, por brindarme un entorno adecuado para desarrollarme profesionalmente, permitiéndome acceder a una instrucción de buena calidad y facilitando el crecimiento de mis conocimientos y destrezas.

A la plana docente por su orientación y apoyo constante durante todo el proceso. Su dedicación y experiencia fueron clave para el éxito de este trabajo.

A mi asesor por sus enriquecedores comentarios, los cuales contribuyeron significativamente al desarrollo de esta investigación.



## ÍNDICE GENERAL

DEDICATORIA.....	iii
AGRADECIMIENTO.....	iv
ÍNDICE GENERAL.....	v
ÍNDICE DE TABLAS.....	ix
ÍNDICE DE FIGURAS.....	x
RESUMEN.....	xiii
ABSTRACT.....	xiv
INTRODUCCIÓN.....	xv

### CAPÍTULO I

#### PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

1.1. ANÁLISIS DE LA SITUACIÓN PROBLEMÁTICA.....	1
1.2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	3
1.2.1. Problema general.....	3
1.2.2. Problemas específicos.....	3
1.3. OBJETIVOS DE LA INVESTIGACIÓN.....	3
1.3.1. Objetivo general.....	3
1.3.2. Objetivos específicos.....	3
1.4. JUSTIFICACIÓN DE LA INVESTIGACIÓN.....	4
1.4.1. Justificación Practica.....	4
1.4.2. Justificación social.....	4
1.4.3. Justificación ambiental.....	5
1.4.4. Justificación Económica.....	6
1.5. HIPÓTESIS DE LA INVESTIGACIÓN.....	7
1.5.1. Hipótesis general.....	7



- 1.5.2. Hipótesis específicas ..... 7
- 1.6. VARIABLE DE LA INVESTIGACIÓN ..... 7
  - 1.6.1. Variable de caracterización ..... 7
  - 1.6.2. Variable de interés..... 7
- 1.7. OPERACIONALIZACIÓN DE VARIABLES ..... 8

## CAPÍTULO II

### MARCO TEÓRICO

- 2.1. ANTECEDENTES DE LA INVESTIGACIÓN ..... 9
  - 2.1.1. Antecedentes internacionales ..... 9
  - 2.1.2. Antecedentes nacionales ..... 14
  - 2.1.3. Antecedentes regionales ..... 19
- 2.2. BASES TEÓRICAS ..... 24
  - 2.2.1. Glaciar..... 24
  - 2.2.2. Partes de un glaciar..... 25
  - 2.2.3. Formación de glaciares ..... 25
  - 2.2.4. Dinámica glaciar ..... 27
  - 2.2.5. Clasificación de los glaciares ..... 28
  - 2.2.6. Tipos de glaciares..... 30
  - 2.2.7. Erosión glaciar ..... 34
  - 2.2.8. Geomorfología glaciar ..... 35
  - 2.2.9. Variables climáticas ..... 39
  - 2.2.10. Métodos de Análisis del Retroceso Glaciar ..... 40
  - 2.2.11. Relación entre variables climáticas y retroceso glaciar ..... 42
  - 2.2.12. Implicaciones del retroceso glaciar en la región ..... 43
  - 2.2.13. Teledetección y sus características ..... 45



2.3. MARCO CONCEPTUAL .....	47
2.3.1. Dinámica glaciar .....	47
2.3.2. Retroceso glaciar .....	48
2.3.3. Desglaciación .....	48
2.3.4. Balance de masa glaciar .....	48
2.3.5. Variables climáticas (temperatura y precipitación).....	49
2.3.6. Cambio climático y glaciares tropicales .....	49
2.3.7. Imágenes satelitales .....	49

## CAPÍTULO III

### METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN

3.1. DISEÑO DE INVESTIGACIÓN .....	51
3.2. TIPO DE INVESTIGACIÓN.....	51
3.3. NIVEL DE INVESTIGACIÓN.....	51
3.4. ENFOQUE DE INVESTIGACIÓN .....	52
3.5. DISEÑO ESTADÍSTICO.....	52
3.6. POBLACIÓN Y MUESTRA .....	53
3.6.1. Población .....	53
3.6.2. Muestra.....	54
3.7. MATERIALES Y EQUIPOS.....	54
3.8. TÉCNICAS E INSTRUMENTOS.....	55
3.8.1. Técnicas.....	55
3.8.2. Instrumentos .....	57
3.9. LUGAR DE ESTUDIO .....	58
3.10. PROCEDIMIENTO METODOLÓGICO.....	60



**CAPÍTULO IV**

**RESULTADOS Y DISCUSIÓN**

4.1. RESULTADOS ..... 65

4.2. ANÁLISIS ESTADÍSTICO ..... 89

    4.2.1. Precipitación acumulada ..... 89

    4.2.2. Temperatura media ..... 91

4.3. CONTRASTACIÓN DE HIPÓTESIS ..... 96

4.4. DISCUSIONES ..... 99

CONCLUSIONES ..... 102

RECOMENDACIONES ..... 104

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS ..... 106

ANEXOS ..... 115



## ÍNDICE DE TABLAS

<b>Tabla 1</b> Operacionalización de variables de la presente investigación.....	8
<b>Tabla 2</b> Clasificación de los glaciares según morfología, temperatura, dinámica y contenido de impurezas y localización geológica. ....	29
<b>Tabla 3</b> Evolución de la cobertura glaciar del Nevado Sorapata (2009–2024). 72	
<b>Tabla 4</b> Comparación acumulada de pérdida glaciar respecto al año base 2009. . 73	
<b>Tabla 5</b> Variación del área superficial glaciar del Nevado Sorapata durante el periodo 2009–2024. ....	75
<b>Tabla 6</b> Variables climaticas en el nevado de Sorapata. ....	79
<b>Tabla 7</b> Precipitación anual vs cobertura glaciar del nevado Sorapata (2009-2024). ....	90
<b>Tabla 8</b> Temperatura anual vs cobertura glaciar del nevado Sorapata (2009-2024). ....	91
<b>Tabla 9</b> Coeficientes del modelo de regresión múltiple.....	93



## ÍNDICE DE FIGURAS

<b>Figura 1</b> Componentes de un glaciar.....	24
<b>Figura 2</b> Zonificación de un glaciar. ....	25
<b>Figura 3</b> Ciclo de formación de hielo glaciar.....	26
<b>Figura 4</b> Glaciares alpinos o de montaña. ....	31
<b>Figura 5</b> Glaciares continentales.....	32
<b>Figura 6</b> Glaciares de salida.....	33
<b>Figura 7</b> Glaciar de pie de monte.....	34
<b>Figura 8</b> Geomorfología del glaciar. ....	36
<b>Figura 9</b> Distribución de temperaturas en el hielo. ....	37
<b>Figura 10</b> Clasificación térmica de los glaciares.....	38
<b>Figura 11</b> Clasificación morfológica de los glaciares. ....	39
<b>Figura 12</b> Comportamiento del glaciar según la temperatura, estable, bueno y malo.....	40
<b>Figura 13</b> Elementos de la teledetección.....	46
<b>Figura 14</b> Ubicación del proyecto de estudio de la cordillera Apolobamba – Nevado Sorapata. ....	59
<b>Figura 15</b> Diagrama de procedimiento metodológico aplicado en el primer objetivo.....	61
<b>Figura 16</b> Cálculo del área del nevado Sorapata.....	62
<b>Figura 17</b> Diagrama de procedimiento metodológico aplicado en el segundo objetivo.....	63
<b>Figura 18</b> Diagrama de procedimiento metodológico aplicado en el tercer objetivo.....	64
<b>Figura 19</b> Identificación del nevado Sorapata y los glaciares colgantes.....	66



**Figura 20** Clasificaciones supervisadas empleando en los años: 2009, 2014, 2019 y 2024..... 68

**Figura 21** Raster de la evaluación de la cobertura glaciaria del Nevado Sorapata (2009 – 2024) ..... 69

**Figura 22** Mapas temporales de la cobertura glaciaria (hielo y nieve). ..... 71

**Figura 23** Retroceso glaciaria del Nevado Sorapata (2009 – 2024). ..... 74

**Figura 24** Superficie del glaciaria del nevado Sorapata 2009 - 2024 de la cordillera Apolobamba. .... 76

**Figura 25** Mapa de cobertura glaciaria del nevado Sorapata..... 77

**Figura 26** Precipitación media anual del nevado Sorapata del periodo 2009-2024..... 81

**Figura 27** Temperatura media anual máximo y mínimo del nevado Sorapata del periodo 2009-2024. .... 83

**Figura 28** Rango térmico media anual máximo y mínimo del nevado Sorapata del periodo 2009-2024. .... 84

**Figura 29** Humedad relativa del nevado Sorapata del periodo 2009-2024. .... 86

**Figura 30** Dinámica Humedad del aire de nevado Sorapata del periodo 2009-2024..... 87

**Figura 31** Matriz de correlación entre las variables climáticas del Nevado Sorapata (2009–2024) - Rstudio..... 88

**Figura 32** Relación de precipitación anual y cobertura glaciaria del nevado Sorapata. .... 90

**Figura 33** Relación entre la Temperatura media y cobertura glaciaria del nevado Sorapata. .... 92



**Figura 34** Modelo de regresión múltiple de la cobertura glaciar en relación con las variables climáticas de temperatura y precipitación..... 95



## RESUMEN

El actual estudio poseyó como propósito general evaluar la dinámica glaciar del Nevado Sorapata y su correspondencia con variables climáticas en la Cordillera de Apolobamba, Puno, a lo largo del periodo 2009–2024. El estudio empleó un diseño no experimental, longitudinal y correlacional, con enfoque cuantitativo. Se aplicaron técnicas de estudios multitemporales de retratos satelitales (Landsat 5 y 8), combinadas con el índice NDSI para la detección de hielo y nevisca, y datos climáticos provenientes de la NASA POWER. Las variables consideradas fueron: cobertura glaciar, temple media anual y precipitaciones acopiadas. Entre los principales resultados, se identificó una pérdida neta de cubierta glaciar de 0.1988 km<sup>2</sup>, equivalente al 22.84 % del área inicial. El modelo de regresiones múltiples reveló una correspondencia significativa entre el temple (coef. = -0.1530,  $p = 0.0082$ ) y la precipitación (coef. = 0.0089,  $p = 0.0063$ ) respecto a la cobertura glaciar, con un alto poder explicativo ( $R^2 = 0.999$ ). Estos hallazgos sugieren que el incremento térmico regional es el primordial impulsor del retroceso glaciar, en tanto que las precipitaciones ejercen un efecto atenuante temporal. Se concluye que el Nevado Sorapata experimenta un retroceso glaciar acelerado, consistente con las tendencias de deglaciación observadas en los Andes tropicales. La investigación aporta una metodología replicable basada en teledetección y análisis climático, útil para el control de heleros tropicales y la gestión hídrica regional. Asimismo, los resultados tienen implicancias para la seguridad hídrica, la planificación territorial y el ajuste al cambio del clima en ecosistemas de elevada montaña.

**Palabras claves:** cambio climático, retroceso glaciar, NDSI, Landsat, Cordillera de Apolobamba, Puno.



## ABSTRACT

The overall objective of this study was to evaluate the glacier dynamics of Nevado Sorapata and its correlation with climatic variables in the Apolobamba mountain range, Puno, over the period 2009–2024. The study employed a non-experimental, longitudinal, and correlational design with a quantitative approach. Multitemporal satellite image techniques (Landsat 5 and 8) were applied, combined with the NDSI index for ice and snow detection, and climate data from NASA POWER. The variables considered were: glacier coverage, average annual temperatures, and accumulated precipitation. Among the main results, a net loss of glacier coverage of 0.1988 km<sup>2</sup>, equivalent to 22.84% of the initial area, was identified. The multiple regression model revealed a significant correlation between temperature (coef. =  $-0.1530$ ,  $p = 0.0082$ ) and precipitation (coef. =  $0.0089$ ,  $p = 0.0063$ ) with respect to glacier coverage, with a high explanatory power ( $R^2 = 0.999$ ). These findings suggest that regional warming is the primary driver of glacier retreat, while precipitation exerts a temporary mitigating effect. It is concluded that Nevado Sorapata is experiencing accelerated glacier retreat, consistent with the deglaciation trends observed in the tropical Andes. The research provides a replicable methodology based on remote sensing and climate analysis, useful for monitoring tropical glaciers and regional water management. The results also have implications for water security, land-use planning, and adaptation to climate change in high mountain ecosystems.

**Keywords:** glacier retreat, climate change, NDSI, Landsat, Apolobamba Range, Puno.



## INTRODUCCIÓN

El cambio de clima ha sido uno de los mayores retos ambientales a nivel global, afectando diversos ecosistemas, particularmente los glaciares. Estos cuerpos de hielo, que travesen un rol esencial en el equilibrio hídrico de muchas regiones, están experimentando un retroceso acelerado debido al aumento de las temperaturas globales (Huang Y. a., 2024).

Actualmente, los Andes peruanos albergan más de 70% de los heleros tropicales del mundo, y estos glaciares son cruciales para el abastecimiento de agua en diversas regiones, especialmente en las zonas urbanas y campestres de la selva elevada y la sierra (ANA, 2021). Sin embargo, debido al cambio del clima, muchos de estos glaciares están experimentando un rápido deshielo, lo que afecta tanto la disposición de H<sub>2</sub>O para consumo humano, regadío agrícola y reproducción de energía hidroeléctrica, como la permanencia de ecosistemas que dependen de estos recursos hídricos.

En el ámbito local, la región de Puno, donde se encuentra la Cordillera de Apolobamba, enfrenta desafíos particulares debido a la dependencia histórica de las comunidades locales del agua proveniente de los heleros. La oquedad del afluente Occoruruni, que desciende de los glaciares del Nevado Sorapata, es fundamental para el abastecimiento de H<sub>2</sub>O en las comunidades colindantes, como Koriwara, Lusuni y Potoni. Sin embargo, la acelerada desaparición de los glaciares ha afectado directamente los niveles de agua de las lagunas glaciares que alimentan estos ríos (Wilca Gómez O. &., 2020).

El fin de este estudio es valorar la dinámica glacial del Nevado Sorapata y su correspondencia con variables atmosféricas en la Cordillera de Apolobamba, Región Puno. Específicamente, se buscará entender cómo la regresión de los



heleros influye en la formación y la balumba de los lagos glaciares en la región, así como los efectos de estas permutas en los recursos hídricos de las colectividades cercanas. Además, se pretende examinar cómo las variables del clima, tales como el temple y las precipitaciones, han modificado la estabilidad de los glaciares y el comportamiento de las lagunas glaciares asociadas (Vilca Gómez O. &, 2020).

El actual estudio se organiza en cinco secciones principales. La primera sección expone la formulación de la problemática, incluyendo el análisis de la situación, las interrogantes de estudio, los propósitos, la relevancia del estudio, las hipótesis guía y los factores a considerar. La segunda parte despliega el marco de referencia teórico, el cual abarca los estudios previos, los fundamentos conceptuales que soportan el análisis y la definición de términos clave. La tercera sección especifica el diseño metodológico empleado, elucidando la clase y perspectiva de la investigación, los métodos y herramientas aplicadas, el contexto geográfico, el universo y segmento analizado, además de los protocolos seguidos para la obtención y examen de la información. La cuarta sección despliega los hallazgos y su correspondiente análisis, ordenados conforme a los propósitos particulares, a través de cuadros y gráficos que incluyen su elucidación, cotejando los descubrimientos con la literatura existente. Para terminar, la quinta sección revela las inferencias derivadas del proceso analítico, al igual que las sugerencias dirigidas a optimizar el manejo de aguas remanentes y a encauzar estudios posteriores en la materia.



## CAPÍTULO I

### PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

#### 1.1. ANÁLISIS DE LA SITUACIÓN PROBLEMÁTICA

El cambio climático del clima es una crisis global que afecta a todos los ecosistemas del planeta, y los glaciares son uno de los indicadores más sensibles de este fenómeno. A medida que las temperaturas globales aumentan, los glaciares, especialmente los de las regiones tropicales, experimentan un retroceso acelerado, lo que tiene consecuencias graves para los recursos hídricos de muchas regiones. Los heleros son fuentes cruciales de H<sub>2</sub>O dulce para millones de individuos en todo el mundo. Sin embargo, su desaparición está alterando los ciclos hidrológicos, provocando la formación de lagos glaciares que aumentan el riesgo de desbordes e inundaciones. A nivel global, el retroceso glaciar está siendo observado de manera alarmante en los Andes, los Himalayas y otras regiones montañosas, lo que subraya la urgente necesidad de monitorear estos fenómenos y sus consecuencias (Huang & Kinouchi , 2024).

En Latinoamérica, la cordillera de los Andes constituye el eje central de la zona, no únicamente en el ámbito físico y social, sino también como un indispensable proveedor de recursos hídricos. Los glaciares presentes en esta formación montañosa son cruciales para las comunidades aledañas, al suministrar el líquido vital para uso doméstico, el regadío de cultivos y la



producción de electricidad mediante centrales hidroeléctricas (Rignot & Kanagaratnam, 2011). No obstante, durante los últimos años, las masas heleros de la cordillera han experimentado una considerable disminución a causa del calentamiento global, perturbando la disponibilidad de agua en múltiples sistemas hidrográficos. Especialmente los heleros tropicales andinos, ubicados a elevaciones comparativamente menores, presentan una susceptibilidad extrema ante el incremento térmico (Rignot & Kanagaratnam, 2011).

En Perú, los heleros son una fuente crítica de H<sub>2</sub>O para las áreas urbanas y rurales. No obstante, la acelerada desaparición de estos glaciares está afectando el suministro de agua en las cuencas que dependen de ellos, como se observa en el Macizo de Apolobamba y el Macizo Blanca (Vilca Gómez O. &, 2020). El retroceso glaciar está alterando el ciclo hidrológico, lo que genera un aumento de la formación de lagos glaciares y sitúa en peligro la seguridad de las colectividades que penden del deshielo de estos glaciares para el abastecimiento de agua (ANA, 2021).

El Macizo de Apolobamba, en la región de Puno, es un área con varios glaciares importantes, siendo el Nevado Sorapata uno de los más destacados. Estos glaciares son fundamentales para las cuencas hídricas que abastecen a las comunidades de Koriwara, Lusuni y Potoni Apolobamba (Vilca Gómez O. &, 2020). Sin embargo, el retroceso glaciar ha alterado las disponibilidades de H<sub>2</sub>O en el territorio y ha incrementado el peligro de desbordes de lagos glaciares, lo cual personifica una intimidación para el resguardo de las poblaciones cercanas. Este estudio se enfoca en la dinámica glaciar del Nevado Sorapata, utilizando retratos satelitales de Sentinel-2 y Landsat para analizar el retroceso glaciar y la evolución de los lagos glaciares. Se buscará correlacionar las variables del clima

(precipitaciones y temple) con los cambios observados en los glaciares y los lagos, utilizando herramientas avanzadas de teledetección y modelado del clima para predecir los riesgos de inundaciones o desbordes (Huang & Kinouchi , 2024).

## **1.2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA**

### **1.2.1. Problema general**

¿Cuál es la dinámica glaciar del Nevado Sorapata con las variables climáticas en la Cordillera de Apolobamba, Región Puno?

### **1.2.2. Problemas específicos**

- a) ¿Cómo será el retroceso glaciar del Nevado Sorapata en la Cordillera de Apolobamba durante los últimos 15 años, utilizando imágenes satelitales?
- b) ¿Cuánto será la pérdida de cobertura glaciar del Nevado Sorapata en la Cordillera de Apolobamba en los últimos 15 años?
- c) ¿Cuál es la relación entre las variables climáticas y la pérdida de cobertura glaciar del Nevado Sorapata en la Cordillera de Apolobamba?

## **1.3. OBJETIVOS DE LA INVESTIGACIÓN**

### **1.3.1. Objetivo general**

Evaluar dinámica glaciar del Nevado Sorapata y su relación con variables climáticas en la Cordillera de Apolobamba, Región Puno.

### **1.3.2. Objetivos específicos**

- a) Analizar el retroceso glaciar del Nevado Sorapata en la Cordillera de Apolobamba, en los últimos 15 años mediante el uso de imágenes satelitales.
- b) Cuantificar la pérdida de cobertura glaciar del Nevado Sorapata en la Cordillera de Apolobamba en los últimos 15 años.

c) Determinar la relación entre las variables climáticas y la pérdida de cobertura glaciar del Nevado Sorapata en la Cordillera de Apolobamba.

## **1.4. JUSTIFICACIÓN DE LA INVESTIGACIÓN**

### **1.4.1. Justificación Práctica**

El estudio de la dinámica glaciar del Nevado Sorapata representa una herramienta fundamental para el monitoreo ambiental y la planificación de los recursos del H<sub>2</sub>O en la región altoandina. Mediante el uso de imágenes satelitales y series temporales, es posible realizar un análisis multitemporal del retroceso glaciar, permitiendo identificar patrones de cambio y cuantificar la pérdida de superficie nevada. Esta información resulta esencial para entidades técnicas como el SENAMHI, la ANA o los gobiernos regionales, que requieren datos actualizados y geoespacialmente precisos para tomar decisiones basadas en evidencia (Vuille, Carey, Huggel, Buytaert, & Rabatel, 2018).

Además, esta investigación permitirá establecer una metodología replicable para el análisis de glaciares tropicales mediante herramientas accesibles como Google Earth Engine, QGIS o la usanza de datos MODIS, LANDSAT y SENTINEL. Esta aplicabilidad técnica fortalece las capacidades locales en la vigilancia del cambio del clima y el manejo de información climática, promoviendo una mejor gestión del territorio en contextos vulnerables al calentamiento global (Chevallier, Pouyaud, & Suarez, 2011).

### **1.4.2. Justificación social**

Las comunidades altoandinas que habitan en las cercanías del Nevado Sorapata dependen del agua procedente del deshielo glaciar para satisfacer sus necesidades básicas, como la ingesta humana, la agronomía y la ganadería. La disminución progresiva de la masa glaciar amenaza con alterar la disponibilidad



y estacionalidad del recurso hídrico, generando impactos directos sobre la seguridad del H<sub>2</sub>O y alimentaria de las urbes locales (Carey, Huggel, Bury, Portocarrero, & Haeberli, 2014). Al proporcionar datos concretos sobre la magnitud del retroceso glaciar y su vinculación con las variables climáticas, esta investigación contribuye a alertar sobre los riesgos sociales derivados del cambio del clima.

Asimismo, esta tesis puede ser un insumo importante para la sensibilización y educación ambiental de las comunidades rurales, promoviendo una cultura de adaptación y resiliencia frente a las transformaciones del entorno natural. Generar conciencia desde el conocimiento científico fortalece el tejido social y posibilita la formulación de estrategias locales de mitigación del cambio del clima y de protección de sus fuentes de H<sub>2</sub>O (Drenkhan, Carey, Huggel, Seidel, & Oré, 2019).

### **1.4.3. Justificación ambiental**

Los glaciares tropicales, como los que se hallan en el Macizo de Apolobamba, son ecosistemas extremadamente sensibles al aumento de el temple y las transformaciones en los modelos de precipitaciones. El retroceso acelerado de estos glaciares no solo implica la pérdida de reservas hídricas nativas, sino también la degradación de ecosistemas únicos que dependen del equilibrio criosférico. Esta investigación permite documentar científicamente estos cambios, generando pesquisa clave para las gestiones ambientales de áreas de conservación y de ecosistemas frágiles (Rabatel, y otros, Estado actual de los glaciares en los Andes tropicales: una perspectiva de varios siglos sobre la evolución de los glaciares y el cambio climático. La criósfera, 2013).

Por otro lado, los resultados obtenidos podrán apoyar procesos de elaboración de políticas públicas y habilidades de preservación en el argumento de los ODS, específicamente el ODS 15 (Existencia de Ecosistemas Terrestres) y el ODS 13 (Acción por el Clima). Incluir la dimensión glaciar dentro de la planificación ambiental regional puede contribuir a una comisión más integral de los recursos nativos y una mejor articulación entre ciencia, política y territorio (IPCC, 2022).

#### **1.4.4. Justificación Económica**

La regresión de los glaciares tiene consecuencias económicas tangibles, especialmente en regiones cuya economía depende del agua como insumo para la producción agropecuaria y energética. En el caso del Macizo de Apolobamba, las actividades de subsistencia y productivas están estrechamente concernientes con la disposición de H<sub>2</sub>O de origen glaciar. Una disminución sostenida en esta fuente hídrica podría incrementar los costos de producción, reducir rendimientos agrícolas y afectar la generación de ingresos locales (Vergara, Deeb, Valencia, Bradley, & Zarzar, 2007).

Además, conocer con precisión las tendencias del retroceso glaciar permite anticipar escenarios de escasez y planificar inversiones adecuadas en infraestructura hídrica, como reservorios, sistemas de riego tecnificado y captación de agua. De esta manera, el estudio tiene una relevancia económica al permitir una mejor asignación de recursos y evitar pérdidas significativas en sectores productivos dependientes del recurso hídrico. Por lo tanto, esta investigación aporta a la sostenibilidad económica de la región desde un enfoque preventivo y estratégico (Bury, Mark, Carey, Young, & McKenzie).



## 1.5. HIPÓTESIS DE LA INVESTIGACIÓN

### 1.5.1. Hipótesis general

La dinámica del glaciar del Nevado Sorapata está relacionada de manera significativa con las variables climáticas de la cordillera Apolobamba, Región Puno.

### 1.5.2. Hipótesis específicas

- a. El retroceso glaciar del Nevado Sorapata en la cordillera de Apolobamba en los últimos 15 años ha sido significativo, como se evidencia en las imágenes satelitales.
- b. La pérdida de cobertura glaciar en el Nevado Sorapata en la cordillera Apolobamba en los últimos 15 años ha superado el 40%.
- c. Existen correlaciones significativas entre el aumento de la temperatura y la disminución de las precipitaciones con la pérdida de cobertura glaciar del Nevado Sorapata.

## 1.6. VARIABLE DE LA INVESTIGACIÓN

### 1.6.1. Variable de caracterización

- Variables climáticas (Temperatura y precipitación).

### 1.6.2. Variable de interés

- Dinámica glaciar del Nevado Sorapata.

## 1.7. OPERACIONALIZACIÓN DE VARIABLES

Tabla 1

Operacionalización de variables de la presente investigación.

Variable	Dimensiones	Indicadores	Unidad de medida
Variable de caracterización	Temperatura y Precipitación	- Temperatura media anual (°C)	°C (grados Celsius)
Variables Climáticas		- Precipitación total anual (mm)	Mm (milímetros)
Variable de interes	Superficie glaciar, volumen de hielo	- Área glaciar perdida por año (km <sup>2</sup> )	km <sup>2</sup> (kilómetros cuadrados)
Dinámica Glaciar del Nevado Sorapata.	Velocidad de retroceso	- Pérdida acumulada de volumen glaciar (m <sup>3</sup> )	m <sup>3</sup> (metro cubico)

Nota. Elaboración propia.



## CAPÍTULO II

### MARCO TEÓRICO

#### 2.1. ANTECEDENTES DE LA INVESTIGACIÓN

##### 2.1.1. Antecedentes internacionales

En su apartado Chen et al. (2024), de " Vinculación del retroceso de los heleros con el cambio del clima en la Meseta Tibetana", investigaron cómo el cambio del clima ha impulsado la regresión glaciar en la meseta tibetana, enfocándose en glaciares libres de escombros. El estudio se propuso modelar escenarios de pérdida glaciar hasta el año 2100 bajo trayectorias de emisiones del CMIP6 (SSP2-4.5, SSP1-2.6 y SSP5-8.5). Utilizando datos del Randolph Glacier Inventory (RGI) y variables climáticas proyectadas, se estimó que bajo el escenario de bajas emisiones (SSP1-2.6), la pérdida de superficie glaciar sería de aproximadamente 10.9 %, mientras que en escenarios intermedios (SSP2-4.5) la pérdida alcanzaría un 25.4 %, y en escenarios extremos (SSP5-8.5), hasta un 55.4 %. El análisis evidenció que glaciares sin cobertura de escombros presentan mayor vulnerabilidad térmica, perdiendo masa más rápidamente que aquellos con capas de detritos que los aíslan parcialmente. Además, factores como la pendiente y la presencia de lagos proglaciares también influyen en la tasa de pérdida. Los autores concluyen que el calentamiento atmosférico regional es la primordial impulsora del regresión glaciar y que, de mantenerse



las altas emisiones, gran parte de los glaciares pequeños podrían desaparecer por completo hacia finales de siglo.

En cambio, Rabatel et al. (2013) desarrollaron un amplio estudio sobre "Situación contemporánea de las masas de hielo en la cordillera andina tropical: un análisis histórico de larga data acerca de la transformación glaciológica y su vinculación con el calentamiento global ", cuyo propósito fue analizar la valoración de los heleros tropicales andinos a partir de la Pequeña Edad de Hielo (LIA) hasta inicios del siglo XXI. Por medio de la compilación y comparación de datos auténticos de balance de masa, extensión superficial y longitud de glaciares de Perú, Bolivia, Ecuador y Colombia, encontraron que la tasa media anual de pérdida de masa pasó de  $-0.2$  m equivalente en agua (w.e.) en el periodo 1964–1975 a  $-0.76$  m w.e. entre 1976 y 2010. Durante los últimos 50 años, se evidenció una pérdida acumulada de más del 35 % del área glaciaria en muchas cordilleras, incluyendo Apolobamba. Además, se identificó un acrecentamiento sostenido del temple de  $+0.10$  °C por década, mientras que la precipitación mostró variaciones interanuales, pero sin tendencia significativa. La conclusión principal fue que el aumento de temperatura en la tropósfera baja y la reducción de la cubierta de nubes en algunas zonas explican en gran parte el colapso glaciario observado en la región tropical andina, siendo el temple el factor dominante en el retroceso glaciario.

Por otra parte, Zemp et al. (2023), en su apartado "Variabilidad del clima y evolución de los glaciares en sitios seleccionados de la meseta tibetana. Revista de Glaciología", analizaron la evolución reciente del volumen glaciario en diversos sitios de la meseta tibetana, con el fin de estimar su vulnerabilidad frente a variaciones climáticas proyectadas. La metodología incluyó mediciones de



campo, sensores remotos y modelación hidrológica para cuantificar la pérdida de masa glaciar desde 2000, además de simular escenarios futuros hasta el año 2100. Los resultados indicaron que entre 2000 y 2020, los glaciares de mayor altitud perdieron entre 0.5 y 0.9 m w.e. por año, mientras que los de menor altitud registraron tasas superiores a  $-1.2$  m w.e. anuales. Se proyectó que al menos el 50 % de los glaciares estudiados podrían desaparecer completamente si se mantienen las condiciones climáticas actuales. Asimismo, se observó que la fusión glaciar está adelantando los picos de escorrentía, alterando el equilibrio hídrico estacional de la región. La conclusión subraya que la variabilidad climática interanual y la tendencia de calentamiento regional son responsables directos de la acelerada desaparición de glaciares, afectando gravemente a las fuentes de agua dulce y la seguridad hídrica de millones de personas en Asia central.

Sin embargo, Huang & Kinouchi (2024) en su artículo denominado "Revelando cambios glaciares decenales y evolución de lagos en el Macizo Real, Bolivia: un análisis de imágenes Landsat semiautomático", poseyó como propósito principal estudiar las permutas en la extensión de los heleros y el progreso de los lagos heleros en el Macizo Real de Bolivia, utilizando imágenes satelitales de alta resolución. Además, se busca entender cómo el temple y precipitaciones influyen en estos cambios, y cómo estos fenómenos sobresaltan los recursos del H<sub>2</sub>O de la región. La investigación empleó un método semiautomático para el mapeo de glaciares y lagos glaciares, esgrimiendo retratos satelitales de Sentinel-2 y Landsat a través de la plataforma GEE. Para valorar la influencia climática, se utilizó un análisis multitemporal de datos climáticos y glaciares. Se utilizó también la lista de NDSI para identificar



las áreas de nieve y hielo, y se correlacionaron con los datos de temple y precipitaciones. El estudio mostró que los glaciares en el territorio han extraviado más del 40% de su zona desde 1985. Además, los lagos glaciares han aumentado en superficie debido al retroceso glaciar. También se observó una desaceleración en la regresión de los heleros en los novísimos años, lo que se atribuye a un cambio en los modelos de precipitaciones y temple. Se concluyó que el retroceso glaciar en la Cordillera Real sigue siendo significativo, pero con variaciones regionales. Los lagos glaciares se han formado como resultado de este retroceso, lo que plantea riesgos tanto para la gestión del agua como para la seguridad de las comunidades locales. El cambio del clima sigue siendo el principal impulsor de estas transformaciones.

En su artículo Vuille et al (2018) de "Cambio del clima y heleros andinos ardientes: futuro, actualidad y pasado", persiguió el propósito de analizar los impactos del calentamiento global en las formaciones de hielo tropical andinas, centrándose específicamente en la reducción del volumen glaciar y la proliferación de lagunas de origen glaciar. Además, se buscó analizar cómo los permutas en el temple y las precipitaciones contribuyen a estos fenómenos. El estudio esgrimió imágenes satelitales de Landsat para realizar un estudio de las permutas en la extensión de los heleros y la formación de lagos. Además, se emplearon modelos del climas regionales (RCMs) para analizar el imperio de las diferenciaciones de temple y precipitación en los glaciares. El estudio concluyó que los glaciares tropicales en los Andes han perdido más del 50% de su volumen en las últimas décadas. Esta pérdida ha llevado a la formación de nuevos lagos glaciares, algunos de los cuales han aumentado su tamaño considerablemente. La correspondencia entre la regresión glaciar y las



inconstantes climáticas fue evidente, especialmente en las áreas de mayor altitud. La investigación subraya la trascendencia de controlar los heleros tropicales debido a su rápida desaparición y la creación de lagos que podrían presentar riesgos para las comunidades cercanas. Se recomienda continuar con el monitoreo satelital y mejorar los modelos climáticos para predecir los efectos del cambio del clima.

Por otra parte, Tapia y Quispe (2022) en su estudio llamado "Cálculo del deshielo y pronóstico de la persistencia temporal del Nevado Chicón mediante valoración multitemporal 1985-2021", se propuso determinar la dinámica de la merma glaciaria y proyectar su línea temporal aplicando metodología de análisis multitemporal sobre el macizo Chicón entre 1985-2021, esgrimiendo imágenes de satélite Landsat procesadas con sistemas de información geográfica. El procedimiento metodológico empleado adoptó un carácter cuantificable, con un esquema longitudinal no experimental y de naturaleza práctica. Los hallazgos demostraron una reducción progresiva en la superficie de hielo. En 1985, la masa glaciaria abarcaba 9.14 km<sup>2</sup>, y pese a registrarse variaciones en su extensión durante el período analizado, nunca se recuperó la cobertura original; tal como muestra el año 2001, cuando el área se redujo a 7.01 km<sup>2</sup>, constituyendo el punto máximo de disminución relativa en la serie temporal estudiada. Igualmente, hacia el año 2021, la superficie glaciaria se habría reducido a 1.34 km<sup>2</sup>, manteniendo una trayectoria descendente que, según proyecciones de los investigadores, conduciría a la desaparición total del nevado Chicón para el 2031. En síntesis, se constataron fluctuaciones tanto de crecimiento como de decrecimiento en la cobertura de hielo, lo que indica una posible asociación con factores climáticos variables.



## 2.1.2. Antecedentes nacionales

El análisis ejecutado por Dussailant et al. (2025), " Modelado físico de la maniobra de los heleros bajo el cambio del clima en los Andes tropicales", tuvo como objetivo valorar la cabida del modelo acoplado JULES–OGGM para fingir la evolución de glaciares tropicales frente al cambio del clima. Utilizando datos de más de 500 glaciares ubicados en la región Vilcanota-Urubamba (Perú), aplicaron un enfoque basado en balance de energía y dinámica del hielo para estimar los cambios glaciares entre 2000 y 2018. Las derivaciones expusieron un arqueo de masa glaciar promedio de  $-0.42 \pm 0.24$  m por año, evidenciando una pérdida acelerada de masa especialmente en los últimos tres años del periodo. Asimismo, se registró una reducción del 29 % de la superficie glaciar total entre 2000 y 2016, con mayor afectación en glaciares de menor altitud y orientación occidental. El modelo demostró ser efectivo en la reproducción de tendencias reales, pero también se subrayó la sensibilidad extrema de los glaciares tropicales ante variaciones mínimas de temperatura. Como conclusión, los autores afirman que estos modelos representan herramientas clave para la vigilancia glaciológica y la planificación climática, pero deben complementarse con observaciones in situ debido a la complejidad topográfica de los Andes.

Según INAIGEM (2020), en el "Registro Nacional de Heleros y Lagunas", el objetivo de este informe fue realizar un inventario completo de los glaciares y lagunas del Perú, evaluar su retroceso glaciar y cuantificar la reserva hídrica glaciar en todo el país, con un enfoque en la Cordillera Blanca y otras grandes cordilleras. Se esgrimieron retratos satelitales de Landsat y Sentinel-2, tal como datos de DEM, para medir la regresión glaciar en 18 cordilleras del Perú. El análisis se complementó con un inventario de lagunas para identificar los riesgos



asociados a los desbordes de los lagos formados por el deshielo. Los resultados mostraron que la regresión glaciaria en los actuales cuatro períodos ha afectado gravemente los almacenamientos de H<sub>2</sub>O en los principales macizos del país. Se identificaron más de 60 lagos glaciares con el potencial de causar desbordes en caso de deshielo acelerado. El informe concluyó que la regresión helera en el Perú es una amenaza crítica para los recursos hídricos del país. Se destacó el requerimiento de continuar con el control de los glaciares y lagunas para evitar desastres relacionados con el deshielo.

Por otro lado, Vilca y Bustinza (2020) en su estudio denominado "Análisis de Riesgos de Origen Helero, Suboquedad Huari Huari", tuvo el objetivo de analizar los riesgos asociados con el retroceso glaciario en la Suboquedad Huari Huari, situada en la Macizo Apolobamba. Además, se buscaba identificar los lagos glaciares formados y evaluar el riesgo de reboses. El análisis esgrimió un enfoque multidisciplinario que combinó retratos satelitales de Sentinel-2 y Landsat, con el uso de modelos hidrológicos para simular los caudales y el riesgo de inundaciones. Además, se realizaron mediciones de campo y entrevistas a los pobladores particulares para alcanzar mejor los impactos en colectividades. Los resultados mostraron que la formación de lagos glaciares en la subcuenca Huari Huari ha aumentado en los últimos años debido al retroceso glaciario. Se identificaron riesgos de desbordes en las comunidades cercanas, lo que podría generar desastres naturales. El estudio concluyó que el retroceso glaciario en la región está creando nuevos riesgos para las comunidades de la subcuenca Huari Huari. Se recomendó implementar estrategias de mitigación y monitoreo para reducir los impactos de los desbordes de lagos glaciares.



Por otro lado, INAIGEM (2025) en su estudio denominado "Regresión Helero en Andes Peruanos A lo largo de las Novísimas 6 Décadas", tuvo el propósito de valorar el impacto del cambio del clima en el retroceso de los heleros en los Andes Peruanos a lo largo de las novísimas 6 décadas. El estudio utilizó una combinación de mediciones de campo directas y técnicas de teledetección (retratos satelitales de Landsat, Spot5, Aster y Sentinel-2). Hallazgos Generales, Entre 1962 y 2020, se perdió el 56.2% de la superficie helero en los Andes peruanos, Se observaron reducciones notables en las Cordilleras Blanca, Vilcanota y Vilcabamba (720.6 km<sup>2</sup>), representando más de la mitad de la pérdida nacional de glaciares. Nevado Pastoruri: En 1962, tenía una superficie de 2.0 km<sup>2</sup>; para 2020, se redujo a 0.4 km<sup>2</sup>, una pérdida de 1.6 km<sup>2</sup> (reducción del 80%), Nevado Coropuna: Perdió el 59% de su superficie desde 1955 (111.6 km<sup>2</sup>) hasta 2020 (45.8 km<sup>2</sup>), Glaciares en Huancavelica: Perdieron el 99% de su área, quedando solo 0.1 km<sup>2</sup> en 2020, En conclusión; Los heleros en los Andes peruanos están retrocediendo a un ritmo alarmante, con reducciones significativas en el área superficial en casi todas las cordilleras analizadas, La principal causa de este retroceso es el acrecentamiento del temple global, el cual se ha acelerado a partir de la década de 1970 y Los glaciares como los de las cordilleras Huaytapallana y Vilcanota están en alto riesgo de desaparecer en el futuro cercano debido a la rápida pérdida de su capa de hielo. Donde se necesitan acciones inmediatas para mitigar los efectos de este retroceso, incluyendo la preservación de los heleros y la mejora de las gestiones de los recursos del H<sub>2</sub>O, ya que estos glaciares son vitales para la provisión de H<sub>2</sub>O de la región.



No obstante, la Autoridad Nacional del H<sub>2</sub>O (2023) presentaron el “Relación Nacional de Heleros y Lagos de Principio Helero del Perú”, cuyo propósito fue actualizar el estado de los heleros peruanos mediante teledetección y análisis multitemporal. La metodología incluyó la usanza de retratos satelitales Spot 5, ASTER y Landsat, adyacente a SIG y la aplicación del índice NDSI para la delimitación glaciaria. Los resultados indicaron que, en el Perú, existen actualmente 2 679 glaciares con una superficie total de 1 298.6 km<sup>2</sup>, lo cual representa una disminución de 42.64% respecto al inventario de 1970. Para el caso específico de la Macizo Apolobamba, se observó una fuerte pérdida de superficie en glaciares de pequeña dimensión (menos de 1 km<sup>2</sup>), los cuales representan el 87% del total nacional y son los más sensibles al cambio del clima. El informe concluyó que el retroceso glaciario es un fenómeno generalizado en todas las cordilleras del país, inducido primordialmente por el acrecentamiento del temple atmosférico, y recomendó fortalecer las estrategias de monitoreo y gestión de recursos hídricos glaciares.

Por otro lado, Barzola y Fretel (2024) en su investigación de “La dinámica helero del nevado Huaytapallana y su correspondencia con la variabilidad climática a partir de 1993-2023”, tuvo el propósito de valorar dinámica helero del nevado Huaytapallana y su correspondencia con la inestabilidad climática a partir de 1993-2023. El marco metodológico implementado correspondió a una investigación de carácter aplicado con nivel de análisis correlativo. El procedimiento incorporó técnicas de percepción remota y geoinformática, empleando específicamente el Índice de Nieve Normalizado (NDSI) para delimitar las superficies glaciares. Adicionalmente, se aplicaron los postulados de Bahr para estimar el volumen de hielo, junto con métodos de interpolación



para suplir la información meteorológica faltante de temperatura y precipitación suministrada por el servicio nacional de meteorología. Los hallazgos demostraron una merma sustancial de la superficie glaciar, la cual transitó de 22.80 km<sup>2</sup> en 1993 a 13.32 km<sup>2</sup> en 2023, equivalente a una pérdida del 41.58% en tres décadas. Respecto al volumen de hielo, se registró un descenso desde 3.535 km<sup>3</sup> en 1993 hasta 1.689 km<sup>3</sup> en 2023. Climáticamente, se identificó una asociación significativa entre la regresión glaciar y las temperaturas medias, mientras que la precipitación no mostró vínculos estadísticamente relevantes, pese a que el coeficiente de Pearson indicó una tendencia negativa moderada. Se concluye que la deglaciación del nevado Huaytapallana es acentuada y responde principalmente a variables climáticas, en especial al incremento térmico.

En cambio, Rojas y Tordocillo (2018) en su investigación denominada "Cálculo de la Extensión Superficial y la Variación Volumétrica del Glaciar del Nevado Champará (Cordillera Blanca, Perú) mediante Imágenes y Modelos Digitales de Elevación del Sensor ASTER/Terra (2000-2010)", persiguió el propósito de cuantificar las alteraciones areales y volumétricas del nevado Champará, localizado en la cordillera Blanca, mediante la utilización de imágenes y MDE generados por el sensor ASTER instalado en la plataforma satelital TERRA. Se emplearon indicadores espectrales como el NDSI y el Índice Normalizado de Agua (NDWI) para delimitar la superficie criosférica. Complementariamente, se produjeron Modelos Digitales de Elevación con una precisión de 30 metros para cuantificar la modificación volumétrica. Los hallazgos demuestran una regresión del 50% en la cobertura glaciar comparado con el año 2000, siguiendo un patrón de decrecimiento exponencial que proyecta



la reducción del glaciar a 1 km<sup>2</sup> en aproximadamente 41.7 años. Paralelamente, el volumen glaciar manifestó una tasa de pérdida de -0.0159 km<sup>3</sup> anual durante el período 2003-2010. Finalmente, se infiere que probablemente los elementos climáticos y ambientales inciden en la merma areal y volumétrica del néveo Champará.

### 2.1.3. Antecedentes regionales

En el estudio de López Tineo (2023), "Impacto de la expansión urbana y minera en la merma helero del Macizo Apolobamba, 1985–2022", analizó la correspondencia entre la regresión glaciar y el crecimiento de actividades humanas en Rinconada y Ananea. Se esgrimió teledetección con imágenes Landsat y Sentinel, procesadas en Google Earth Engine mediante el algoritmo Random Forest, así como análisis estadísticos espaciales para correlacionar los cambios. Los hallazgos mostraron que la superficie helero pasó de 161.4 km<sup>2</sup> en 1985 a 92.1 km<sup>2</sup> en 2022, lo que personifica una pérdida del 43%. Paralelamente, el área urbana creció un 1 176% (de 17 ha a 200 ha) y la superficie degradada un 289%, especialmente entre 2010 y 2022. El análisis espacial mostró una fuerte correspondencia positiva entre la diversión minera informal y la merma de hielo en zonas altas, generando impactos sobre la condición del H<sub>2</sub>O y la disposición estacional del recurso. Se concluyó que la actividad humana intensiva está agravando el retroceso glaciar, por lo que se recomienda establecer límites ecológicos y zonas de exclusión minera en las cabeceras de cuenca.

En la tesis elaborada por Deza Velásquez (2024), de "Regresión helero del Nevado Ananea por medio de retratos satelitales y su relación con variables climáticas, 2015-2023", poseyó como propósito analizar la merma de cubierta



glaciar del Nevado Ananea, situado en la Cordillera Apolobamba, y establecer su relación con el temple y precipitación. Para ello, se empleó el índice NDSI con imágenes satelitales Landsat 8 en Google Earth Engine, junto con datos climáticos del SENAMHI, procesados estadísticamente con el coeficiente de Pearson. Los hallazgos revelaron que la superficie helero se redujo de 25.11 km<sup>2</sup> en 2015 a 16.43 km<sup>2</sup> en 2023, lo cual personifica una merma de 8.68 km<sup>2</sup>, equivalente al 34.56% del área original. Asimismo, se hallaron correlaciones negativas muy altas entre la pérdida glaciar y el temple máximo ( $r = -0.91$ ), temple mínimo ( $r = -0.88$ ) y temple medio ( $r = -0.80$ ), así como una correlación positiva significativa con la precipitación ( $r = 0.87$ ). Se concluyó que el incremento térmico en la zona está directamente asociado al retroceso glaciar, siendo un fenómeno que podría agravarse si continúan las actuales tendencias climáticas.

En cambio, Callata Taype (2021) en su estudio titulada "Reducción de la capa de hielo del nevado Salluyo (cordillera Apolobamba) y la incidencia de factores climáticos, 1985-2020", se propuso examinar el impacto de los componentes meteorológicos en la regresión glaciar durante el período 1985-2020. Las variables independiente y dependiente del estudio corresponden a los elementos climáticos y la disminución de la superficie glaciar, respectivamente. Conforme al enfoque y diseño del estudio, este es de carácter práctico y observacional. Respecto al procedimiento para cuantificar la superficie de regresión glaciar, se empleó clasificación supervisada en el programa de código abierto QGIS. Adicionalmente, para el procesamiento de información meteorológica, se obtuvieron datos de la plataforma del SENAMHI, los cuales fueron sometidos posteriormente a análisis de regresión lineal y prueba de



tendencia de Mann-Kendall. Los hallazgos revelaron una contracción de la cobertura glaciar desde 3.55 km<sup>2</sup> en 1985 hasta 2.54 km<sup>2</sup> en 2020, lo que equivale a una merma total de 1.01 km<sup>2</sup> (-28.45%). El examen identificó un incremento estadísticamente significativo en las tendencias térmicas máximas y mínimas entre 1985 y 1999, sin variaciones pronunciadas posteriormente, junto con una reducción sustancial de la precipitación durante todo el período. En síntesis, la regresión glaciar del Salluyo es acelerada y está condicionada tanto por el calentamiento térmico como por la menor disponibilidad pluviométrica, demostrando que los factores climáticos ejercen una influencia decisiva en la dinámica de este glaciar.

Por otro lado, Canaza Ortiz (2023) en su investigación denominada "Evaluación diacrónica de la extensión criosférica del Nevado Ananea (Puno, Perú) y su relación con variables climáticas durante el período 1985-2022", el propósito central del estudio fue analizar la dinámica espaciotemporal de la superficie glaciar del Ananea entre 1985 y 2022. La metodología empleó 19 imágenes LANDSAT (TM, ETM+ y OLI) procesadas mediante calibración radiométrica y correcciones atmosféricas y geométricas. Se implementó el NDSI para la delimitación glaciar, complementado con clasificación supervisada para la validación de resultados. Los instrumentos; Retratos satelitales LANDSAT: Utilizadas para el proceso de datos sobre la superficie helero, NDSI: Usado para computar la zona glaciar, Clasificación supervisada: Para procesar los datos y determinar las áreas glaciales, Modelo de regresiones lineales múltiples: Para la estimación del comportamiento futuro del glaciar. Los resultados revelaron una pérdida significativa del 62.32 % de la cobertura glaciar entre 1985 y 2022; además, se determinó una correlación positiva de  $r = 0.73$  ( $R^2 = 54.2 \%$ ) entre el



acrecentamiento del temple máximo histórica y la mengua del hielo. Adicionalmente, el modelo de regresión lineal múltiple, con variables climáticas estadísticamente significativas ( $p < 0.05$ ), permitió proyectar escenarios futuros, estimando una caída continuada de la masa glaciar hacia el 2056. En conclusión, el autor afirma que el cambio del clima, especialmente el acrecentamiento de temple máximo, es el primordial impulsor de la regresión glaciar de Ananea, con una tendencia proyectada hacia una pérdida acelerada del hielo en las próximas décadas

Sin embargo, Diaz et al. (2023) en su estudio titulado "Impactos del Cambio del clima en los ecosistemas montañosos del Macizo Carabaya – Perú", el estudio se orientó a analizar las consecuencias del calentamiento global en estas zonas altas, aplicando el modelo bioclimático de Holdridge para determinar las Zonas de Vida (HLZ) base del período 1961-1990 y contrastarlas con proyecciones futuras según diversos escenarios de cambio del clima. Se reconocieron nueve Zonas de Vida, destacando por su extensión el Páramo (41.2%), el Bosque Húmedo Montano (20.3%) y la Tundra (14.6%). Para este estudio, se emplearon datos climáticos de WorldClim, aplicándose técnicas de validación y downscaling para optimizar la exactitud de las proyecciones. Los hallazgos indicaron que los ecosistemas más vulnerables al cambio del clima corresponderían a las zonas Nival, Tundra y Páramo, las cuales sufrirán mermas sustanciales en su cobertura. Sus proyecciones apuntan a reducciones críticas en las HLZ de Nival (-96.1 % en 2050 y -98.8 % en 2070), Tundra (-92.7 % y -99.2 %) y Páramo (-33.9 % y -71.7 %) bajo RCP-8.5; mientras que el Bosque rociado montano podría expandirse entre 86.8 % y 131.6 %, desplazando las zonas altoandinas. Por el contrario, los ecosistemas dentro de la HLZ Bosque



rociado -Montano experimentarían un aumento significativo en su área, desplazando a los ecosistemas de mayor altitud como la Tundra y el Páramo. Concluyen que el cambio del clima provocará un reemplazo altitudinal de ecosistemas clave, generando pérdida de glaciares, tundra y páramo, y advierten sobre el requerimiento de incorporar estos escenarios en manejos de gestión de cuencas y conservación andina.

En cambio, Pacompia Vilca (2022) en su tesis denominada “Efectos de la actividad minera en la regresión glaciar en La Rinconada, Cordillera Apolobamba, región meridional del Perú”, abordó como propósito examinar la forma en la que actividad minera y urbana contribuyó al retroceso de glaciares en la zona de La Rinconada durante el periodo 1985–2022. Para ello, aplicó análisis multitemporal de retratos satelitales (Landsat 5 y 8, y Sentinel 2) en Google Earth Engine, utilizando el índice NDSI para estimar la cubierta glaciar anual, y clasificó la expansión urbana y degradación mediante la técnica Random Forest cada cinco años. Los hallazgos mostraron una significativa mengua de la superficie helero, que cayó de 161.4 km<sup>2</sup> en 1985 a 92.1 km<sup>2</sup> en 2022, lo que corresponde a una merma del 43 %. De esta manera, la zona urbana creció un 1 176 % (de 17 ha a 200 ha) y la zona degradada un 289 % (de 1 774 ha a 3 389 ha) entre 2010 y 2022. El análisis de correlaciones de Pearson encontró una sociedad positiva significativa entre la expansión minera y la pérdida de masa helero. Como conclusión, Pacompia Vilca advierte que la actividad minera intensiva y la urbanización en cabeceras de cuenca agravan el retroceso glaciar, proponiendo una agenda ambiental enfocada en proteger glaciares y ecosistemas de montaña en el Perú.

## 2.2. BASES TEÓRICAS

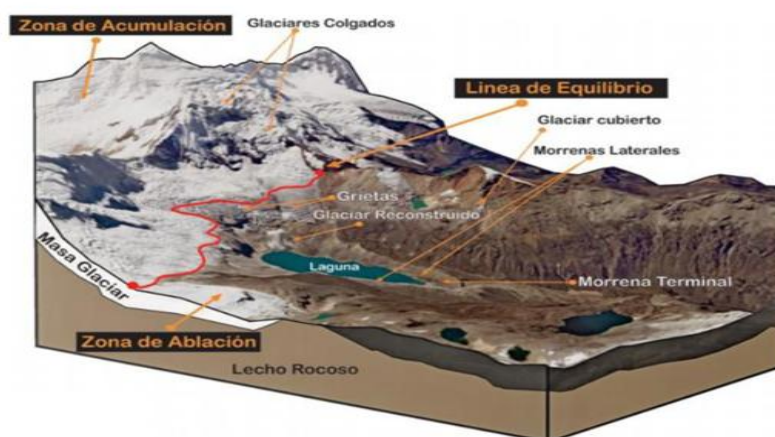
### 2.2.1. Glaciar

Un glaciar constituye una acumulación de hielo perenne generada por la compactación progresiva de nieve, la cual se transforma en hielo sólido. Al ubicarse en regiones polares y de alta montaña, estos cuerpos glaciares se desplazan lentamente por efecto gravitacional y procesos erosivos, representando componentes cruciales para el equilibrio ecológico global y funcionando como reservorios esenciales de agua dulce (Haeberli, Hoelzle, Paul, & Zemp, 2007).

Los heleros son definidos como sistemas ecológicos compuestos por extensas masas de hielo, con o sin agua intersticial en sus fracturas, originadas por la metamorfosis de la nieve acumulada que adquiere plasticidad mediante deformación gradual inducida por la gravedad. Estas formaciones mantienen permanentemente estado sólido, presentando neviza en sus estratos internos y nieve superficial en sus capas externas (Aguas Andina, 2019).

#### Figura 1

*Componentes de un glaciar.*



*Nota.* Extraído del Instituto Nacional de Estudio en Glaciares y Ecosistemas de Montaña, (2018).

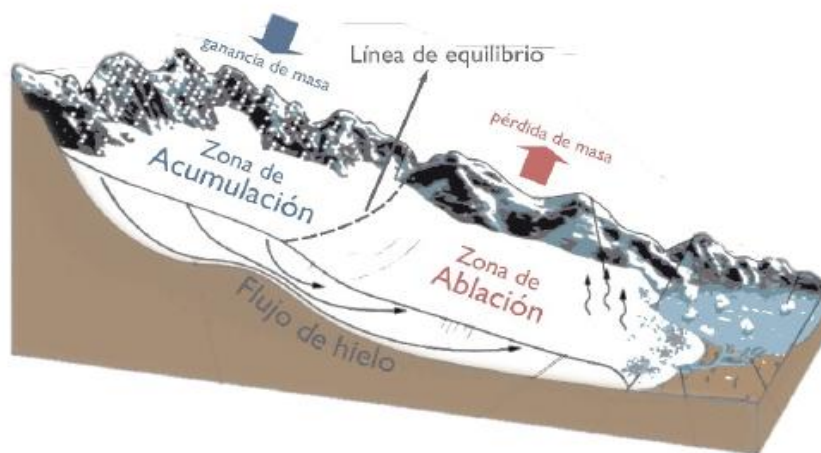
### 2.2.2. Partes de un glaciar

Las porciones de un helero representan zonas funcionales que definen su dinámica interna y el balance de masa. Se dividen principalmente en tres componentes:

- **Zona de acumulación:** Sector donde se agregan anualmente los volúmenes de nieve y hielo durante el ciclo hidrológico (Arroyo & Artica, 2018).
- **Zona de ablación:** Porción del glaciar donde predominan los procesos de pérdida de masa mediante fusión, evaporación, sublimación y desprendimiento de icebergs(Arroyo & Artica, 2018).
- **Altitud de la Línea de Equilibrio (ELA):** Límite teórico que delimita las zonas de ganancia y merma neta de masa glaciar (Campos & Campos, 2020).

**Figura 2**

*Zonificación de un glaciar.*



*Nota.* Extraído del Instituto de Meteorología, Hidrología y Estudios Ambientales, citado en Quintero (Quintero Londoño, 2020).

### 2.2.3. Formación de glaciares

Los heleros se forman en las zonas polares debido a que, si bien la precipitación nival actual es escasa, las condiciones térmicas mantienen

temperaturas suficientemente bajas para garantizar la preservación perenne de la mayor parte del hielo y la nieve acumulados.

Los heleros se forman en regiones montañosas, incluso cercanas al ecuador, debido al gradiente térmico altitudinal; en altitudes superiores, las condiciones de frío perpetuo permiten la conservación del hielo y la nieve durante todo el año. Dado que el régimen térmico está determinado por la latitud, la cota específica para el desarrollo de glaciares varía según la proximidad al ecuador. (Maldonado , 2020).

### Figura 3

*Ciclo de formación de hielo glaciar.*



*Nota.* Extraído del ambiente glaciar y su distribución, citado por Maldonado (2020).

Bajo las condiciones climáticas terrestres actuales, los glaciares únicamente se generan en altitudes superiores a 5 km en la zona ecuatorial, aunque pueden descender hasta el nivel del mar en latitudes comprendidas entre 60° y 90° (Maldonado , 2020). La formación glaciar requiere el cumplimiento de tres requisitos fundamentales, los cuales son:



- ✓ **Primero:** Las condiciones térmicas locales deben garantizar un régimen de frío que permita la preservación de la nieve invernal durante el estiaje estival.
- ✓ **Segundo:** Se requiere una precipitación nival suficiente para generar acumulaciones criosféricas significativas.
- ✓ **Tercero:** La pendiente del sustrato de acumulación debe presentar una inclinación moderada que prevenga el deslizamiento avalanchoso, junto con una configuración topográfica que brinde protección contra la redistribución eólica o mecánica de la nieve.

#### 2.2.4. Dinámica glaciar

Los heleros constituyen cuerpos de hielo de considerable masa que, impulsados por la fuerza gravitacional, experimentan desplazamientos o flujos. Estos movimientos pueden clasificarse como regresivos (pérdida de masa) o progresivos (ganancia de masa). Por ejemplo, cuando los procesos de ablación superan la acumulación nival total, el glaciar exhibe un retroceso (denominado balance de masa negativo). Por el contrario, si la acumulación de nieve se incrementa mientras la ablación permanece estable, el glaciar manifiesta un avance (situación identificada como balance de masa positivo (Chavez Modesto, Gonzales Ramos, & Iparraguirre Ayala, 2023).

La cinética de estos desplazamientos responde a dos leyes físicas esenciales:

- ✓ **Plasticidad:** Característica que desarrolla el hielo glaciar vinculada a su masa y a las tensiones generadas por la fuerza gravitatoria. La ductilidad desempeña una función crucial al permitir que el hielo se comporte como un material plástico y se ajuste a la morfología del lecho rocoso subyacente (Peterson, Haug, Hughen, & Rohl, 2000).



- ✓ **Deslizamiento:** Capacidad de desplazamiento que presenta la masa glaciar, determinada por la configuración topográfica y la inclinación del terreno. Este fenómeno deriva de su propiedad plástica, donde el hielo -sometido a presión y peso propio- supera sus límites de resistencia tensional, comportándose las capas basales como un fluido viscoplástico que facilita el avance descendente por gradiente (Peterson, Haug, Huguen, & Rohl, 2000).

### 2.2.5. Clasificación de los glaciares

La clasificación de los heleros como su morfología, temple, dinámica, contenido de impurezas y localización geográfica permite identificar sus características físicas, comportamiento térmico, velocidad de movimiento, composición superficial y distribución espacial. Esta tipología es fundamental para comprender los procesos glaciológicos, evaluar su vulnerabilidad frente al cambio del clima y establecer habilidades de monitoreo y gestiones ambientales en zonas de elevada montaña (INAIGEM, 2017).

**Tabla 2**

*Clasificación de los glaciares según morfología, temperatura, dinámica y contenido de impurezas y localización geológica.*

Parámetro de clasificación	Tipo	Descripción
Morfología	Valle	Son glaciares que siguen la trayectoria de un valle preexistente, la lengua glaciar es alargada.
	Montaña	Masas de hielo adheridas a las paredes rocosas, cuyo frente glaciar se encuentra alejada de los valles, distribuida generalmente en pendientes pronunciadas.
	Glaciares	Pequeñas masas de hielo, cuyas zonas de acumulación y ablación no son claramente detectables, este tipo de glaciar generalmente se presenta en glaciares fragmentados.
	Capa de hielo	Masa glaciar en forma de domo, cuyo flujo es en forma radial.
Temperatura	Templados	La temperatura del hielo es de 0°C. Existe agua entre la masa de hielo y una probabilidad más alta de deformación. Estos glaciares se desplazan sobre los flujos de agua líquida de la base.
	Fríos	Glaciares por debajo del punto de fusión, sin agua basal y poco aporte superficial.
Dinámica	Activos	Glaciares con movimiento rápido y evacuación de detritos.
	Pasivos	Glaciares que fluyen lentamente, lo cual dificulta la evacuación de rocas y la conformación de morrenas. Asociados a masas de hielo en retroceso.
	Estáticos	Glaciares que no tienen alimentación y presentan lenta fusión del hielo. Pueden considerarse como 'relictos sin movimiento'.
Contenido de impurezas	Limpio	Glaciares 'Blancos' con cobertura superficial característica de nieve y hielo.

		erosionados en su área terminal.
	De roca	Denominados también glaciares rocosos, presentan una acumulación lenta de restos rocosos (angulares), generalmente con un patrón de cresta / surco distintivo y pendientes empinadas y laterales, cuya longitud es generalmente mayor que su ancho (en forma de lengua) existente en un valle de montaña.
Localización	Polares	Ubicados en latitudes altas o zonas polares.
	Ecuatoriales / Tropicales	Ubicados cerca de la línea ecuatorial.
	Intertropicales internos	Ubicados entre los trópicos y cercanos a la línea ecuatorial (por ejemplo, Colombia y Ecuador).
	Intertropicales externos	Ubicados entre los trópicos y alejados de la línea ecuatorial (por ejemplo, glaciares de Perú y Bolivia).

---

*Nota.* Extraído del Nacional de Investigación en Glaciares y Ecosistemas de Montaña – INAIGEM (2017).

### 2.2.6. Tipos de glaciares

Los heleros constituyen masas o estratos de hielo metamorfoseado que persisten en estado sólido anualmente y se desplazan por acción gravitatoria. En la actualidad, predominan en los relieves litorales y montañosos de Alaska, la Cordillera Occidental Norteamericana, los Alpes Europeos, los Alpes Neozelandeses, el sistema Himalayo asiático y la cordillera Andina sudamericana, además de revestir la mayor parte de Groenlandia y la Antártida (Maldonado , 2020).

Los geólogos clasifican dos clases fundamentales: heleros alpinos y heleros de casquete, no obstante, hay diversas variantes glaciológicas que se detallan posteriormente.

### Glaciares alpinos o de montaña

Los heleros alpinos (denominados asimismo glaciares de montaña) se desarrollan en áreas montañosas o sus proximidades. La configuración topográfica del terreno determina su morfología; característicamente, estos glaciares experimentan desplazamiento desde cotas altitudinales superiores hacia inferiores (Maldonado , 2020).

#### Figura 4

*Glaciares alpinos o de montaña.*



*Nota.* Extraído del ambiente glaciar y su distribución, citado por Maldonado (2020).

### Glaciares continentales

Los heleros de casquete constituyen extensas masas de hielo que cubren miles de kilómetros cuadrados de plataformas continentales. En la actualidad, estos glaciares sólo persisten en la Antártida y Groenlandia. Su flujo se dirige radialmente desde sus sectores de máximo espesor (hasta 3.5 km) hacia sus bordes periféricos, donde pueden reducirse a apenas centenares de m de grosor (Maldonado , 2020).

## Figura 5

### *Glaciares continentales.*



*Nota.* Extraído del ambiente glaciar y su distribución, citado por Maldonado (2020).

### **Glaciares templados**

Los geólogos asimismo consideran relevante clasificar los glaciares según las condiciones térmicas bajo las cuales se desarrollan.

Los heleros cálidos se desarrollan en zonas donde las condiciones térmicas atmosféricas permiten que el hielo glaciar alcance o se aproxime a su punto de fusión durante segmentos del año o de manera permanente (Maldonado , 2020).

### **Glaciares polares**

Los heleros fríos se desarrollan en áreas donde las condiciones térmicas atmosféricas mantienen permanentemente el hielo glaciar por debajo de su punto de fusión durante todo el ciclo anual.

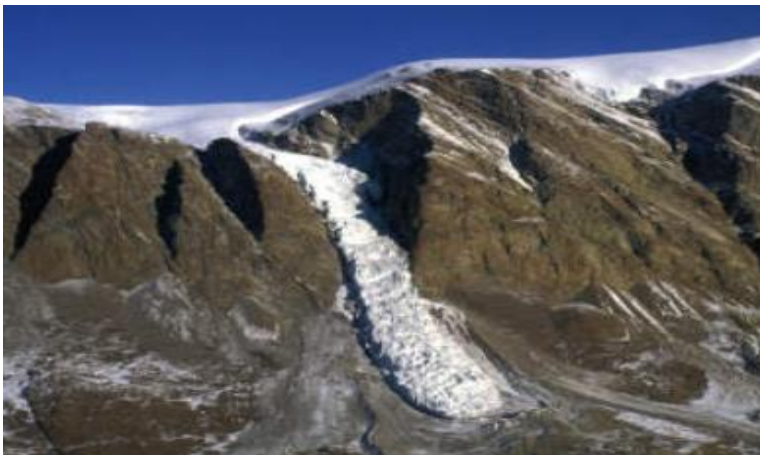
### **Glaciares de salida**

Frecuentemente, los casquetes y mantos de hielo alimentan glaciares de desbordamiento. Estas lenguas glaciares discurren por valles que se proyectan radialmente desde los bordes de estas extensas masas heladas. Dichas lenguas constituyen esencialmente glaciares de valle que funcionan como conductos

para el transporte de hielo desde el interior del manto glaciar a través de terrenos montañosos hacia el mar. Al contactar con el océano, algunos glaciares de desbordamiento se expanden formando plataformas de hielo flotante. En estas zonas es común la generación significativa de icebergs (Maldonado , 2020).

### Figura 6

*Glaciares de salida.*



*Nota.* Extraído del ambiente glaciar y su distribución, citado por Maldonado (2020).

### Glaciares piamonteses o de piedemonte

Los heleros de piedemonte se emplazan en extensas planicies en la base de montañas escarpadas y se generan cuando uno o múltiples glaciares de valle emergen de las confinaciones topográficas montañosas. En este punto, el hielo en avance se dispersa para constituir un manto de amplia cobertura. La escala de estos glaciares individuales presenta considerable variabilidad, destacándose entre los de mayor magnitud la extensa lengua glaciar Malaspina (Maldonado , 2020).

## Figura 7

*Glaciar de pie de monte.*



*Nota.* Extraído del ambiente glaciar y su distribución, citado por Maldonado (2020).

### 2.2.7. Erosión glaciar

La erosión glaciar es uno de los procesos geodinámicos más importantes en los paisajes de alta montaña. Ocurre cuando un glaciar en movimiento actúa como un agente de modelado sobre la roca subyacente, removiendo, desgastando y transportando materiales a lo largo de su trayectoria. Este proceso erosivo se debe a la presión ejercida por el hielo y a los fragmentos de roca incrustados en su base, que funcionan como una lija o esmeril, generando superficies pulidas y marcas lineales conocidas como estrías glaciales (Benn & Evans, 2010).

Existen dos mecanismos principales de erosión glaciar: la abrasión y la extracción. La abrasión se produce cuando los sedimentos congelados en la base del glaciar raspan el lecho rocoso, produciendo surcos paralelos a la dirección del flujo del hielo y generando superficies lisas o pulidas. Por otro lado, la extracción, también conocida como plucking, consiste en la remoción de bloques de roca por congelamiento y descongelamiento del agua en las fisuras



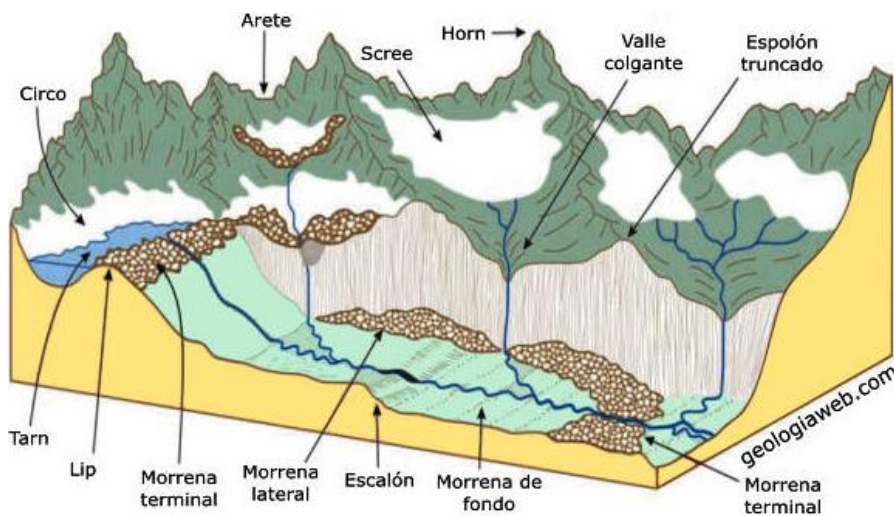
del lecho, debilitando la estructura y facilitando su arrastre por el glaciar (Anderson, 2014). La intensidad de la erosión depende de elementos como el grosor del hielo, la velocidad del flujo glaciar, la pendiente, y la dureza del sustrato rocoso (Fernández García M. , 2000).

Los productos de la erosión glaciar son múltiples y característicos, incluyendo valles en forma de "U", circos glaciares, aristas, rocas aborregadas y depósitos mortecinos. Estas huellas permiten reconstruir la historia geomorfológica de áreas actualmente desglaciadas y entender los procesos pasados del clima. En regiones como los Andes peruanos, los efectos de la erosión glaciar han sido fundamentales en la configuración de cuencas hidrográficas, así como en la formación de lagunas proglaciares que hoy representan fuentes de agua y, en algunos casos, riesgos geodinámicos (INAIGEM, 2017).

### **2.2.8. Geomorfología glaciar**

La morfología de los heleros, o la forma que adopta un glaciar, está influenciada por el temple, las precipitaciones, la topografía y otros factores. El objetivo de la morfología de los glaciares es comprender mejor los paisajes glaciares y su forma. Los tipos de glaciares pueden variar desde enormes capas de hielo, como la capa de hielo de Groenlandia, hasta pequeños glaciares de circo que se hallan en las cimas de las montañas. (Fernández García P. , Geomorfología – GLACIAR 1, 2000). Los glaciares se pueden agrupar en dos categorías principales:

- El flujo de hielo se ve limitado por la topografía básica subyacente.
- El flujo de hielo no está restringido por la topografía circundante.

**Figura 8***Geomorfología del glaciar.*

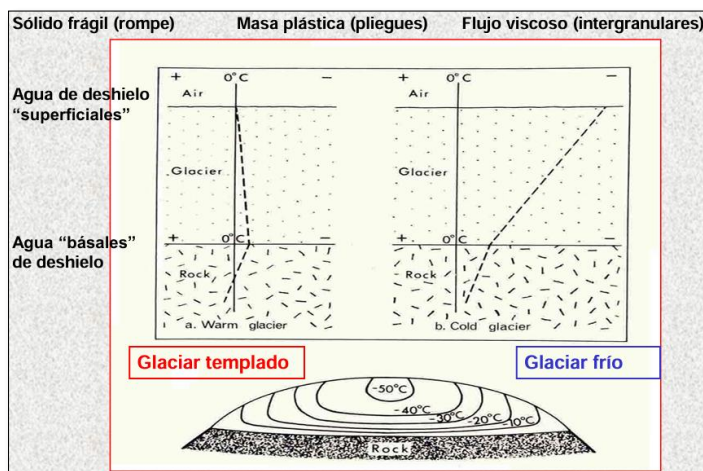
*Nota.* Extraído del ambiente glaciar y su distribución, citado por Maldonado (2020).

### **Distribución de Temperaturas en una masa de Hielo**

La distribución de temperaturas dentro de una aglomeración de hielo glaciar varía en función de la altitud, la profundidad, el flujo térmico geotérmico y las condiciones climáticas externas. Generalmente, las capas superficiales del glaciar presentan una mayor variabilidad térmica debido a la influencia estacional, mientras que las zonas más profundas tienden a mantener temperaturas más estables. En glaciares templados, el hielo puede hallar a tempes cercanas al punto de fusión ( $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) en toda su estructura, permitiendo la presencia de agua líquida en la base. En cambio, en glaciares polares o fríos, la masa de hielo permanece por debajo de la temple de fusión a lo largo de todo el año, impidiendo la generación de agua basal. Esta distribución térmica influye directamente en el tipo de glaciar, su movilidad y capacidad de erosión (Fernández García P. , 2000).

**Figura 9**

*Distribución de temperaturas en el hielo.*



*Nota.* Extraído del texto geomorfología glacial, citado por Fernández (2000).

### **a. Clasificación térmica de los glaciares**

La codificación térmica de los heleros se refiere a la distribución interna de temperatura en el hielo, la cual condiciona su comportamiento mecánico, velocidad de flujo y capacidad erosiva. En esta tipología, se distinguen principalmente los glaciares templados, que presentan temperaturas cercanas o iguales al punto de fusión ( $0^{\circ}\text{C}$ ) en toda su masa, lo que admite la existencia de  $\text{H}_2\text{O}$  líquida interna; y los glaciares fríos o polares, donde el hielo permanece por debajo de  $0^{\circ}\text{C}$  durante todo el año, impidiendo la existencia de agua basal. Esta clasificación permite comprender cómo influye el calor interno y externo sobre la movilidad y evolución de los glaciares en diferentes regiones geográficas (Fernández García P. , 2000).

**Figura 10**

*Clasificación térmica de los glaciares.*

<b>(I) Glaciares Fríos (Polares)</b>	Presentan temperaturas inferiores al punto de fusión Alimentación escasa, sin aguas intersticiales Tipo de movimiento: extrusivo (centrifugo) Transformación a hielo glaciar: lenta Corresponden a " <u>restos glaciares</u> " Pleistocenos
<b>Glaciares Intermedios</b>	En invierno presentan características de glaciares fríos y en verano de glaciares templados Corresponden a latitudes subpolares
<b>(II) Glaciares Templados</b>	Presentan temperaturas próximas al punto de fusión Abundante alimentación líquida (externa e interna) Tipo de movimiento: gravitacional Transformación a hielo glaciar: rápida Corresponden básicamente a <u>glaciares de montaña</u>

*Nota.* Extraído del texto geomorfología glacial, citado por Fernández (2000).

### **b. Clasificación morfológica de los glaciares**

La codificación morfológica de los heleros se basa en su forma, posición topográfica y extensión superficial. Esta tipología incluye diversos tipos: los heleros de valle, que manan por depresiones alargadas; los glaciares de circo, contenidos en cuencas semicirculares de alta montaña; los glaciares piamonteses, que se expanden al llegar a terrenos planos; y las capas de hielo o glaciares continentales, que cubren más de 50 000 km<sup>2</sup> sin estar condicionados por la topografía subyacente. Esta clasificación permite distinguir no solo la geometría externa del glaciar, sino también inferir su comportamiento dinámico y geomorfológico, especialmente en el modelado de paisajes andinos y polares (Fernández García P. , 2000).

**Figura 11**

*Clasificación morfológica de los glaciares.*

Glaciares de Casquete	<u>Coberteras de hielo, "Inlandsis" o casquetes polares</u> Domos y Campos de hielo <u>Glaciares de plataforma e "Icebergs"</u>
Glaciares de Meseta	
Glaciares de Montaña	<u>Monteras de hielo</u> <u>Glaciares de piedemonte</u> <u>Glaciares de valle</u> Glaciares de ladera <u>Glaciares de circo</u>

*Nota.* Extraído del texto geomorfología glacial, citado por Fernández (2000).

### 2.2.9. Variables climáticas

Las variables climáticas desempeñan un papel determinante en la evolución de los heleros, particularmente en su arqueo de aglomeración y comportamiento dinámico. En zonas montañosas de latitudes tropicales, como la Cordillera de Apolobamba, las variaciones en los patrones térmicos y pluviométricos tienen efectos directos sobre los procesos de acumulación y ablación glacial, generando variaciones significativas en la cobertura de hielo a lo largo del tiempo (Fischer, Huss, & Hoelzle, 2014). En esta investigación, se abordarán principalmente 2 variables del clima: el temple y las precipitaciones.

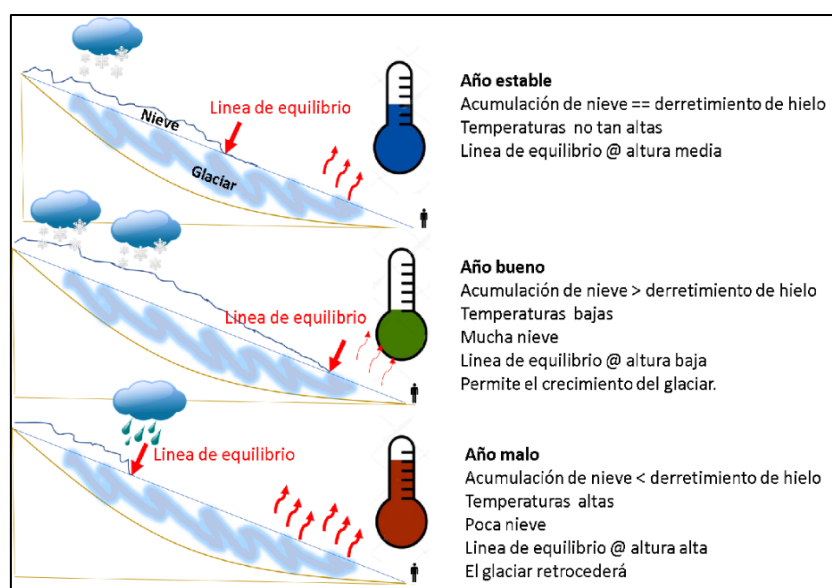
**Temperatura:** El temple es una de las primordiales variables que conmueven la ablación glacial. En la medida que aumenta el temple medio anual, la cuantía de hielo que se funde incrementa, lo que acelera el retroceso glacial. Según Fischer et al. (2014), el temple medio anual tiene una correspondencia directa con el volumen de hielo perdido en los heleros, especialmente en áreas tropicales de elevada montaña.

**Precipitación:** La precipitación, por otro lado, influye en la acumulación de masa glaciar. En las zonas donde la precipitación es alta, la acumulación de nieve puede compensar el retroceso glaciar, aunque este efecto se ve disminuido cuando las temperaturas elevadas predicen un mayor derretimiento. Vuille et al. (2008) sugieren que las variaciones en la precipitación anual afectan la superficie de los heleros, con un acrecentamiento en la variabilidad interanual que provoca fluctuaciones en el arqueo de masa helero.

Esquema simple de la línea de proporción y arqueo de masa de glaciares en relación con condiciones de clima.

**Figura 12**

*Comportamiento del glaciar según la temperatura, estable, bueno y malo.*



*Nota.* Extraído del texto de cambios en la elevación de la superficie y la masa de todos los glaciares suizos, 1980-2010, citado por Fischer et al. (2014).

## 2.2.10. Métodos de Análisis del Retroceso Glaciar

El estudio de la regresión glaciar se ha constituido como un instrumento fundamental para analizar los efectos del calentamiento global en ecosistemas montañosos. En la actualidad, las metodologías predominantes emplean



imágenes satelitales multi-temporales y el procesamiento de datos geospaciales mediante tecnologías SIG y DEM. Estos recursos facilitan la cuantificación precisa de las modificaciones en la extensión criosférica a través del tiempo, incluyendo áreas de compleja accesibilidad (Cogley, 2012).

Las imágenes provenientes de sensores como Landsat (desde 1972) y Sentinel-2 (desde 2015) han permitido monitorear el retroceso de glaciares de forma sistemática y con elevada resolución temporal y espacial. Estas imágenes se procesan aplicando índices como el NDSI o técnicas de codificación supervisada, lo que facilita la detección de cambios y la cuantificación de la merma de superficie helero (Cogley, 2012). Esta metodología es especialmente útil en los Andes tropicales, donde el retroceso glaciar es rápido y requiere seguimiento continuo. Además, gracias al acceso gratuito a estas imágenes por medio de plataformas como Google Earth Engine, se ha democratizado el análisis espacial, permitiendo realizar estudios multitemporales incluso en contextos académicos y locales.

Complementariamente, la usanza de DEM como SRTM, ASTER GDEM y los derivados de misiones LiDAR o fotogrametría permite calcular con mayor precisión la pérdida de volumen glaciar a través del tiempo. Al comparar DEMs de diferentes años, se pueden identificar diferencias altitudinales que representan pérdida de masa glaciar en metros o en volumen total. Roe et al. (2017) destacan que la integración de DEMs con imágenes ópticas de satélite ofrece una perspectiva tridimensional que permite no solo calcular la pérdida superficial, sino también la profundidad erosionada y el impacto geomorfológico de la pérdida de hielo.



Otros enfoques metodológicos incluyen la georreferenciación de fotografías aéreas antiguas, el uso de drones en estudios de alta resolución, y la implementación de estaciones meteorológicas en proximidades glaciares para correlacionar cambios físicos con variables climáticas. En conjunto, estas técnicas constituyen un enfoque integral y robusto para evaluar la dinámica glaciar, especialmente en regiones vulnerables como la Cordillera de Apolobamba, donde el retroceso de masas glaciares tiene implicancias hídricas, ecológicas y sociales significativa (Cogley, 2012).

#### **2.2.11. Relación entre variables climáticas y retroceso glaciar**

La regresión glaciar en la región andina tropical mantiene una estrecha correlación con las fluctuaciones climáticas, constituyéndose el temple y la precipitación como los factores más influyentes en el balance de masa de los glaciares. Conforme se intensifica el calentamiento global, se acelera el proceso de ablación, particularmente en altitudes medias donde la sensibilidad criosférica a las variaciones térmicas es máxima. De forma paralela, la precipitación sólida, que actúa como fuente principal de acumulación glaciar, ha mostrado una tendencia a la mayor variabilidad interanual, afectando la capacidad de los glaciares de regenerarse (Vuille M. F., 2018).

Hoffmann et al. (2019) analizaron glaciares en los Andes del sur de Bolivia y Perú, encontrando que el retroceso glaciar presenta una correspondencia positiva con el temple media anual y una correlación negativa con la precipitación acumulada anual. Es decir, los años más cálidos y con menor precipitación sólida resultan en mayor pérdida de superficie y volumen glaciar. Este patrón se observa claramente en la Cordillera de Apolobamba, donde los glaciares del Nevado Sorapata y alrededores han mostrado una disminución significativa de



su cobertura en las últimas dos décadas, coincidiendo con periodos de menor precipitación y mayor temperatura mínima.

El estudio de series estacionales de temperatura, asociado a retratos satelitales de cobertura glaciar, permite establecer patrones de sensibilidad glaciar frente al clima. Según Masiokas et al. (2012), esta correlación es particularmente útil para concebir el impacto del cambio del clima en los glaciares tropicales, donde incluso aumentos térmicos menores (0.1–0.2 °C por año) pueden provocar retrocesos significativos. Además, se ha observado que los heleros más pequeños y de menor altitud son más sensibles, debido a su menor volumen de masa crítica y su exposición directa a variaciones estacionales.

Estudios recientes confirman que el comportamiento glaciar no solo está vinculado a promedios anuales, sino también a programas extremos como estiajes, olas de ardor o lluvias intensas, que alteran rápidamente el equilibrio del sistema glaciar. Por tanto, el monitoreo conjunto de variables climáticas y cobertura glaciar, mediante estaciones meteorológicas, imágenes satelitales y modelado del clima, es esencial para comprender la magnitud y dinámica de la regresión helero en la región andina, así como sus consecuencias hidrológicas, ecológicas y sociales (Masiokas, y otros, 2012).

#### **2.2.12. Implicaciones del retroceso glaciar en la región**

La regresión helero en la Macizo de Apolobamba representa una amenaza directa para el equilibrio ambiental, económico y social de las comunidades altoandinas. Los glaciares no solo funcionan como reservorios naturales de agua, sino que también regulan el flujo hídrico estacional, siendo esenciales durante los períodos de estiaje o sequía. Su desaparición progresiva puede generar insolvencia de H<sub>2</sub>O para ingesta humana, regadío agrícola y



reproducción hidroeléctrica, especialmente en comunidades rurales que carecen de infraestructura de almacenamiento o gestión hídrica moderna. Ribeiro et al. (2018) señalan que la dependencia de las poblaciones de alta montaña respecto al agua glaciar hace que estas zonas sean altamente vulnerables a los efectos del cambio del clima.

Durante la estación seca, el agua proveniente del deshielo glaciar constituye una fuente clave de abastecimiento, y su disminución ya ha comenzado a afectar a cientos de comunidades andinas en Perú y Bolivia. La situación se agrava con la intensificación de eventos de climas extremos, como estiajes prolongados o aguaceros concentradas, que alteran aún más la disponibilidad hídrica. Según estudios del Banco Mundial (2021), el retroceso de glaciares en la región andina podría reducir la disponibilidad de H<sub>2</sub>O en un 30 % en las próximas décadas si no se aplican medidas de adaptación.

En el plano ecológico, el retroceso glaciar modifica los ecosistemas de montaña, especialmente los cuerpos de agua de origen glaciar, como lagunas y bofedales, que sostienen una alta diversidad biológica y actúan como corredores ecológicos. La pérdida de estos hábitats afecta a especies especializadas que dependen de temperaturas frías y humedad constante. Investigaciones han mostrado que muchas especies endémicas, como ciertos anfibios y plantas altoandinas, están en riesgo por la reducción de hábitats húmedos y el avance de condiciones áridas (Young, León, Cano, & Josse, 2011).

Desde la perspectiva socioeconómica, una de las actividades más impactadas por la reducción del agua glaciar es la agronomía familiar. En la región de Puno, los cultivos de papa, quinua, cebada y habas dependen en gran medida del riego suplementario, especialmente en zonas por encima de los 3500



m s.n.m. Beniston (2006) advierte que el cambio en el régimen hídrico afectará la productividad agrícola, incrementando la inseguridad alimentaria y forzando a las familias campesinas a adaptar sus prácticas, migrar o depender más de subsidios estatales. Además, la pérdida de glaciares también implica una transformación paisajística que puede impactar negativamente en el turismo ecológico y de aventura, una fuente alternativa de ingresos en algunas comunidades andinas.

Por tanto, la regresión helero en la Macizo de Apolobamba no debe ser entendido solo como un fenómeno físico o del clima, sino como un problema multidimensional, con implicancias directas sobre la sostenibilidad de los sistemas sociales, ecológicos y económicos locales. Su estudio y monitoreo continuo es fundamental para desarrollar estrategias de adaptación basadas en ecosistemas, gestión integrada de recursos hídricos y políticas públicas orientadas al desarrollo resiliente (Beniston, 2006).

### **2.2.13. Teledetección y sus características**

La Teledetección o Percepción Remota constituye una metodología para adquirir datos geoespaciales del territorio, mediante la interacción energética entre la superficie terrestre y sensores orbitales que capturan los niveles de reflectancia espectral. Los dispositivos de medición en esta disciplina se categorizan en sensores activos y pasivos (Chuvieco, Teledetección Ambiental, 2010).

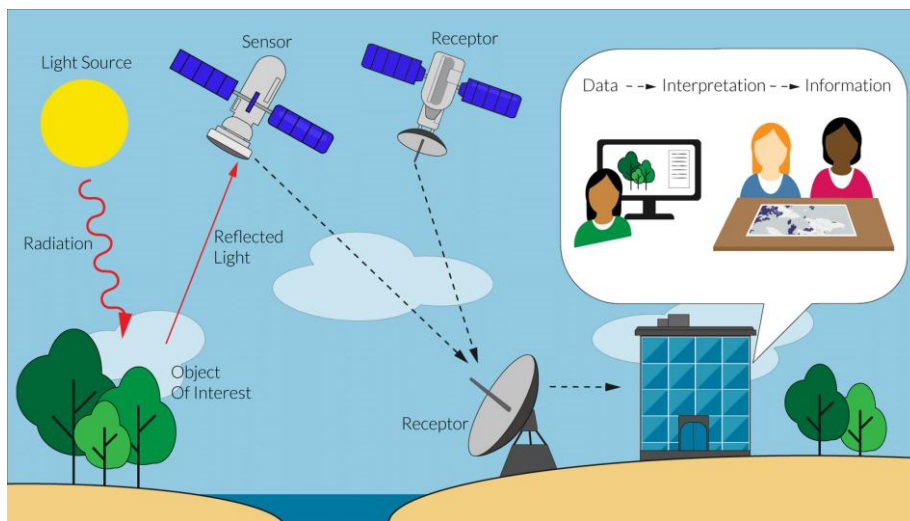
- Los sensores pasivos registran la distribución energética ambiental de origen natural, predominantemente irradiada por la radiación solar. Estos dispositivos pueden detectar la reflectancia en el espectro visible, la emisión en

bandas de infrarrojo e infrarrojo térmico, así como ciertas porciones del espectro de microondas.

- Los sensores activos generan su propia señal energética hacia la superficie terrestre. La radiación reflejada por los compendios del territorio es capturada y cuantificada por el dispositivo sensor.

**Figura 13**

*Elementos de la teledetección.*



*Nota.* La figura representa los elementos pasivos de la teledetección. Tomado de (Chuvieco, Teledetección Ambiental, 2010).

Para la cuantificación de la extensión criosférica de un macizo glaciar, mediante la aplicación de percepción remota, se disponen los siguientes índices de análisis glaciológico:

### a) Índice Diferencial Normalizado de Nieve (NDSI)

La característica óptica primordial del hielo, la nieve y el agua, que genera una variación espectral en la reflectancia, corresponde a las longitudes de onda del espectro visible y del infrarrojo medio (Sharma, Tateishi, & Hara, 2016). Estas propiedades espectrales facilitan la diferenciación de áreas glaciares. Convencionalmente, para distinguir las cubiertas de hielo/nieve de otras

superficies, el límite espectral se establece alrededor de  $0.4 \mu\text{m}$ , correspondiente al punto de transición espectral (Gupta, Haritashya, & Singh, 2005). La formulación matemática del NDSI se expresa de la siguiente manera:

**Ecuación 1.** Operación matemática del índice NDSI.

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

**Dónde:**

- Green: Banda espectral verde del rango visible.
- SWIR: Banda espectral de infrarrojo de onda corta.

### **b) Índice de diferencia normalizada de nieve y hielo (NDSII)**

Este indicador posibilita diferenciar dos tipos de superficie en la criósfera: nieve y hielo, mediante la utilización de la banda espectral verde del rango visible (GREEN) y la NIR (Keshri, Shukla, & Gupta, 2009). La formulación algebraica del NDSII se presenta a continuación:

$$NDSII = \frac{GREEN - NIR}{GREEN + NIR}$$

## **2.3. MARCO CONCEPTUAL**

### **2.3.1. Dinámica glaciar**

Hace referencia al conjunto de procesos físicos que regulan el movimiento, la acumulación y la ablación del hielo en un glaciar. Esta dinámica depende de elementos como la pendiente del terreno, el temple del hielo, la cantidad de nieve acumulada y la fricción con la base. Los glaciares fluyen desde las áreas de acopio hacia las áreas de amputación bajo la influencia de la gravedad, experimentando cambios constantes en su morfología y volumen. Comprender

su dinámica es esencial para valorar su evolución en el contexto del cambio del clima (Barzola Rivera & Fretel Vadillo, 2024).

### **2.3.2. Retroceso glaciar**

Es un proceso en el cual el límite frontal de un glaciar se retira de su posición inicial como consecuencia de la reducción de su masa de hielo. Este fenómeno puede ser causado por múltiples factores, incluido el aumento de las temperaturas atmosféricas y oceánicas, lo que indica que los glaciares de montaña se están contrayendo aceleradamente como respuesta al calentamiento global, con consecuencias significativas para los recursos hídricos regionales y la seguridad de las poblaciones aledañas a estas formaciones criosféricas (Díaz, Sanchez, Lujano, & Lujano, 2017).

### **2.3.3. Desglaciación**

Consiste en la elevación progresiva del límite inferior de nieve perpetua en zonas de alta montaña, hasta su desaparición total. Este fenómeno se produce predominantemente por el aumento de temperaturas, lo que genera una deglaciación acelerada, reducción del espesor glaciar y pérdida de área y volumen criosférico. Entre los factores detonantes se pueden citar: el cambio del clima, el efecto invernadero, el debilitamiento de la capa de ozono, la actividad minera y otros elementos contribuyentes al calentamiento global (Coronel , 2019).

### **2.3.4. Balance de masa glaciar**

El balance de masa glaciar representa la discrepancia entre los procesos de acumulación (precipitación sólida) y ablación (fusión, sublimación) en un glaciar durante un ciclo específico. Cuando las pérdidas por ablación exceden las ganancias por acumulación, el balance resulta negativo y el glaciar

experimenta regresión; en caso inverso, el glaciar manifiesta avance. Este parámetro es fundamental para evaluar la condición glaciar y está determinantemente influenciado por variables climáticas como el temple y la precipitación (Carey, Huggel, Bury, Portocarrero, & Haerberli, 2014).

### **2.3.5. Variables climáticas (temperatura y precipitación)**

Los factores climáticos más determinantes en la evolución glaciar son el temple y las precipitaciones. el temple controla los procesos de fusión del hielo, mientras que la precipitación nival contribuye al incremento de la criomasa. A escalas global y regional, múltiples investigaciones han corroborado que el incremento del temple media anual y la variabilidad pluviométrica han provocado una regresión acelerada de los glaciares andinos (Vuille, y otros, 2008).

### **2.3.6. Cambio climático y glaciares tropicales**

El cambio del clima ha generado un impacto evidente en los heleros tropicales, como los ubicados en la Cordillera de Apolobamba. A causa de su sitio cercana al ecuador y sus altitudes críticas, estos glaciares son altamente sensibles a incrementos térmicos leves. La reducción sostenida de su masa afecta no solo al ciclo hidrológico, sino también a la biodiversidad y a las colectividades que penden de ellos para el abastecimiento de agua (Rabatel, y otros, 2013).

### **2.3.7. Imágenes satelitales**

Las imágenes satelitales son productos generados a partir de sensores antiguos instalados en satélites artificiales que orbita la Tierra. Estas imágenes permiten capturar información multiespectral y espacial del planeta, lo cual es fundamental para el análisis ambiental, monitoreo territorial, estudios de cobertura del suelo y evaluación de fenómenos naturales. En el caso de los



estudios glaciológicos, las imágenes satelitales permiten realizar un seguimiento multitemporal del retroceso glaciar, estimar el área cubierta por hielo y detectar cambios en la morfología de los glaciares con gran precisión (Chuvieco, Fundamentos de teledetección espacial (5.<sup>a</sup> ed.), 2016).



## CAPÍTULO III

### METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN

#### 3.1. DISEÑO DE INVESTIGACIÓN

De acuerdo a Hernández, Fernández y Baptista (2021) el diseño del presente estudio es no experimental, No experimental, ya que no se manejan deliberadamente las inconstantes independientes ni se controlan las condiciones del estudio.

#### 3.2. TIPO DE INVESTIGACIÓN

El estudio es de tipo aplicada, ya que busca generar conocimientos útiles para las gestiones de recursos del H<sub>2</sub>O, el ajuste al cambio del clima y la planificación ambiental en la región andina, contribuyendo a la toma de decisiones para la protección de ambientes de montaña.

#### 3.3. NIVEL DE INVESTIGACIÓN

El estudio es descriptivo ya que se busca describir el comportamiento y las características de los fenómenos observados, en este caso:

- La regresión helero del Nevado Sorapata.
- Las variaciones del clima (temperatura y precipitación) a lo largo de los últimos 15 años en la región de la Cordillera de Apolobamba.

Es también correlacional, pues se busca establecer la correspondencia entre las variables independientes (temperatura y precipitación) y las variables dependientes (retroceso glaciar). Como estas variaciones climáticas afectan a la merma de masa helero (Hernández Sampieri et al., 2014).

### 3.4. ENFOQUE DE INVESTIGACIÓN

El enfoque metodológico del estudio será cuantitativo y comparativo, con un diseño no experimental, pues se analizarán datos existentes sin intervención directa sobre las variables (Hernández Sampieri et al., 2014). Se esgrime un enfoque cuantitativo porque se analizarán datos numéricos (temperatura, precipitación, superficie glaciar, volumen de hielo) y se emplearán técnicas estadísticas (como regresiones y estudios de tendencias) para obtener resultados medibles y generalizables.

### 3.5. DISEÑO ESTADÍSTICO

#### ❖ **Análisis estadístico: regresión múltiple y correlación clima–glaciar**

El análisis apadrinó un enfoque cuantitativo, no experimental y correlacional, utilizando análisis multitemporal de series climáticas (2009–2024) y cobertura glaciar. Se aplicó el test de Mann-Kendall para evaluar tendencias en temperatura y precipitación, sin encontrar cambios significativos ( $p > 0.05$ ). Posteriormente, se ejecutó estudio de reciprocidad de Pearson.

#### ❖ **Modelado estadístico multivariado de la dinámica glaciar y variables climáticas**

El análisis estadístico del actual estudio se estructuró bajo un diseño no experimental, longitudinal y correlacional, orientado a establecer la correspondencia entre las variables del clima (temple y precipitaciones) y la dinámica glaciar del Nevado Sorapata en una etapa de 15 años (2009–2024). La

estrategia metodológica incluyó un enfoque cuantitativo con procesamiento multitemporal de imágenes satelitales y análisis estadístico inferencial. Se empleó un modelo de regresiones lineales múltiple para valorar el efecto simultáneo del temple medio anual (°C) y las precipitaciones acumuladas anual (mm) sobre la cubierta helero (km<sup>2</sup>). Los datos climáticos fueron extraídos de la base reanálisis NASA POWER, mientras que las coberturas glaciadas se determinaron mediante el índice NDSI a partir de retratos Landsat 8 y Landsat 5, geoprocesadas en Google Earth Engine (GEE).

El modelo se formuló como:

$$Y = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \varepsilon$$

Donde:

- $Y$  representa la cobertura glaciada (km<sup>2</sup>).
- $X_1$  la temperatura media anual.
- $X_2$  la precipitación anual.
- $\beta_0$  es la constante del modelo.
- $\varepsilon$  es el error aleatorio.

Se verificaron los supuestos clásicos del modelo lineal: normalidad de residuos, homocedasticidad, independencia y ausencia de multicolinealidad. El ajuste fue evaluado mediante el coeficiente de valor ( $R^2$ ), el estadístico F global del modelo y los valores p individuales de cada predictor (Hyndman & Athanasopoulos, 2018).

### 3.6. POBLACIÓN Y MUESTRA

#### 3.6.1. Población

La población se conceptualiza como el conjunto integral de elementos, unidades o sujetos que poseen un atributo común y sobre los cuales se busca



obtener información o formular conclusiones en un estudio investigativo (Hernández Sampieri, Fernández Collado, & Baptista Lucio, 2021). En este análisis, la urbe comprende la totalidad de las masas glaciares localizadas en el Macizo de Apolobamba dentro del territorio jurisdiccional de la región Puno, Perú.

### 3.6.2. Muestra

Como Sampieri, Fernández y Baptista (2021) el muestreo corresponde a una parte representativa de la urbe total, elegida según ciertos criterios, con el propósito de generar conclusiones confiables aplicables al conjunto general. Por lo que en nuestro estudio la muestra está formada específicamente por el glaciar del Nevado Sorapata de la Cordillera Apolobamba en la región Puno en los periodos de estudio del 2009 al 2024, seleccionado de forma no probabilística e intencional, por ser representativo de la zona de estudio, por su disponibilidad de datos geoespaciales y por su sensibilidad a las variaciones climáticas. Se analizará su comportamiento mediante imágenes satelitales y datos meteorológicos históricos disponibles.

### 3.7. MATERIALES Y EQUIPOS

Los equipos y materiales esgrimidos en el actual estudio fueron los siguientes.

#### a. Materiales digitales y software

- Imágenes satelitales multitemporales.
- Modelos Digitales de Elevación (DEM).
- Datos climáticos históricos (SENAMHI).
- QGIS (Quantum GIS).
- Google Earth Engine.
- Excel / SPSS / R-Studio.

## b. Equipos

- Computadora portátil.
- Acceso a Internet (de alta velocidad para descargas de imágenes satelitales y uso de plataformas como Earth Explorer y GEE).
- Imágenes Landsat 5 TM (2009) y Landsat 8 OLI (2014, 2019, 2024).

## 3.8. TÉCNICAS E INSTRUMENTOS

### 3.8.1. Técnicas

Para el actual estudio, se aplicarán diversas técnicas que permiten la identificación, caracterización y estudio del retroceso helero del Nevado Sorapata por medio de herramientas de percepción remota, observación visual y análisis interpretativo. A continuación, se detallan las principales técnicas utilizadas:

- **Índices espectrales (IE):** Se aplicó la técnica de índices espectrales que consiste en comparar la reflectancia de dos bandas específicas (visible y SWIR) para resaltar la cobertura de nieve frente a otras coberturas del terreno. En este estudio se utilizará el índice NDSI, que permite discriminar áreas glaciares mediante la relación entre bandas verde y bajo el rojo de onda corta (SWIR).
- **Observación visual remota:** Se empleó la técnica de observación sistemática mediante interpretación visual de retratos satelitales. Esta técnica admite identificar cambios espaciales de la cubierta glaciar a partir de combinaciones de bandas en color natural o falso color, facilitando el reconocimiento de masas de nieve y hielo a simple vista.
- **Análisis crítico:** Para la interpretación de los resultados multitemporales y la comprensión de las dinámicas progresivas de la regresión glaciar, se aplicó la

técnica de estudio crítico. Esta técnica involucra procesos mentales de razonamiento, evaluación comparativa, síntesis lógica y juicio argumentado sobre las transformaciones detectadas, con base en los datos cuantitativos extraídos y representaciones gráficas generadas. Permite además formular hallazgos relevantes dentro de un marco investigativo estructurado.

- **Calculo y reclasificación del NDSI:** Se computó el NDSI y delimitación de áreas glaciares de los retratos Landsat 5 (2009) y Landsat 8 (2014, 2019, 2024) utilizando la siguiente ecuación:

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

Según Hall, D. K., Riggs, G. A., & Salomonson, V. V. (1995) . Los píxeles con  $NDSI \geq 0,40$  se clasificaron como hielo/nieve, y el área glaciara ( $km^2$ ) se derivó multiplicando el número de píxeles por  $900 m^2$  y dividiendo por  $10^6$ . El volumen de hielo se estimó mediante la relación  $V = 0,0285 A^{1.375}$ . donde, las imágenes NDSI se reclasificaron en QGIS mediante una tabla de valores continuos y se poligonizaron para obtener vectores glaciares.

- **Cuantificación de la superficie glaciara:** El área ( $km^2$ ) se derivó con la expresión  $\text{área} = \text{area}(\$geometry) / 1\ 000\ 000$ , integrada en la calculadora de campos de QGIS, y se validó a través de un filtrado por atributo ( $DN = 1$ ) y estadística básica sobre el campo área ( $km^2$ ).
- **Estimación de la tasa de retroceso:** Donde  $A_t$  es la superficie glaciara en el año  $t$ .

$$Tasa_a = \frac{A_t - A_{t-1}}{A_{t-1}}$$



- **Detección de tendencia climáticas:** Las tendencias anuales de temple y precipitaciones se evaluaron la pérdida de superficie glaciar y variables climáticas

### 3.8.2. Instrumentos

Para el desarrollo del análisis multitemporal del retroceso glaciar, se utilizaron diversos instrumentos digitales y fuentes de datos especializados en clarividencia remota y sistemas de pesquisa geográfica. A continuación, se detallan los principales instrumentos empleados:

- **Imágenes satelitales Landsat:** Se esgrimieron escenas de los satélites Landsat 5 TM (año 2009), Landsat 7 ETM+ y Landsat 8 OLI/TIRS (años 2014, 2019 y 2024), las cuales fueron descargadas desde la plataforma Earth Explorer del USGS en formato Collection 2 Surface Reflectance (SR). Estas imágenes sirvieron como insumo principal para la detección y delimitación de la cobertura glaciar.
- **Bandas espectrales específicas:** Se emplearon SWIR<sub>1</sub> (1.57–1.65  $\mu\text{m}$ ) y las bandas verdes (0.52–0.60  $\mu\text{m}$ ) como base para el cálculo del índice NDSI (Normalized Difference Snow Index), lo cual permitió discriminar las zonas cubiertas por nevisca o hielo frente a otras coberturas del suelo.
- **Sistema de Información Geográfica (SIG):** El proceso, estudio espacial y representación cartográfica de los datos se realizaron en el entorno del software QGIS, que facilitó la visualización multitemporal y la superposición de los contornos glaciares por año.
- **Fichas de datos meteorológicos y geográficos:** Se utilizaron fichas técnicas con datos complementarios del área del glaciar, así como registros climáticos de temperatura y precipitación correspondientes al periodo 2009–

2024, con el fin de correlacionar estos factores con la dinámica glaciar observada.

### 3.9. LUGAR DE ESTUDIO

La zona de análisis se ubica en la Cordillera de Apolobamba, específicamente en el Nevado Sorapata, localizado en Puno, al sureste del Perú. Este macizo glaciar forma parte de la cadena montañosa asiático de los Andes peruanos, en una región caracterizada por su alta elevación y fuerte influencia de las dinámicas climáticas andinas. La Cordillera Apolobamba es una cadena montañosa de los Andes peruanos y bolivianos, al norte del lago Titicaca. En esta región se encuentra el pueblo de Curva, situado a más de 3,800 m, considerado como la capital de la de la etnia Kallawaya y por lo tanto de la cultura Kallawaya, famosa por sus grandes conocimientos de la naturaleza y de la medicina natural.

Esta cadena montañosa fue explorada por primera vez durante el año 1911 por una expedición organizada por la Royal Geographic Society. Por lo aislado de la región esta fue poco visitada y es recién en la década de los 60, cuando fueron conquistadas algunas de sus cumbres principales, después de tres expediciones internacionales.

Principales elevaciones

Chaupi Orco (6,044 msnm)

Sorapata (6,000 msnm)

Ananea (5,852 msnm)

Callejón (5,827 msnm)

Geográficamente, el Nevado Sorapata se encuentra entre las coordenadas aproximadas latitud  $14^{\circ}10'S$  a  $14^{\circ}15'S$  y longitud  $69^{\circ}45'O$  a  $69^{\circ}50'O$ , en una zona de dificultoso acceso, colindante a la frontera con Bolivia.

- **ACCESO**

Desde la ciudad de Puno, con dirección norte hacia el distrito de Sina por la carretera que une Juliaca, Huancané, Vilquechico, Cojata, desvío Sina hasta llegar al centro poblado Koriwara.

### Figura 14

*Ubicación del proyecto de estudio de la cordillera Apolobamba – Nevado Sorapata.*



*Nota.* Qgis - Elaboración propia.

### 3.10. PROCEDIMIENTO METODOLÓGICO

#### 3.10.1. Objetivo 1: Analizar el retroceso glaciar del Nevado Sorapata en la Cordillera de Apolobamba, en los últimos 15 años mediante el uso de imágenes satelitales.

El estudio multitemporal de la regresión glaciar se llevó a cabo utilizando imágenes satelitales Landsat de libre acceso (Landsat 5 TM para 2009 y Landsat 8 OLI/TIRS para 2014, 2019 y 2024), descargadas del portal USGS Earth Explorer en formato de superficie reflectancia (Collection 2, Tier 1). La elección de estas fechas se basó en la disponibilidad de imágenes durante la estación seca (junio-agosto), minimizando así la interferencia por nubosidad estacional (Rabatel, et al., 2013).

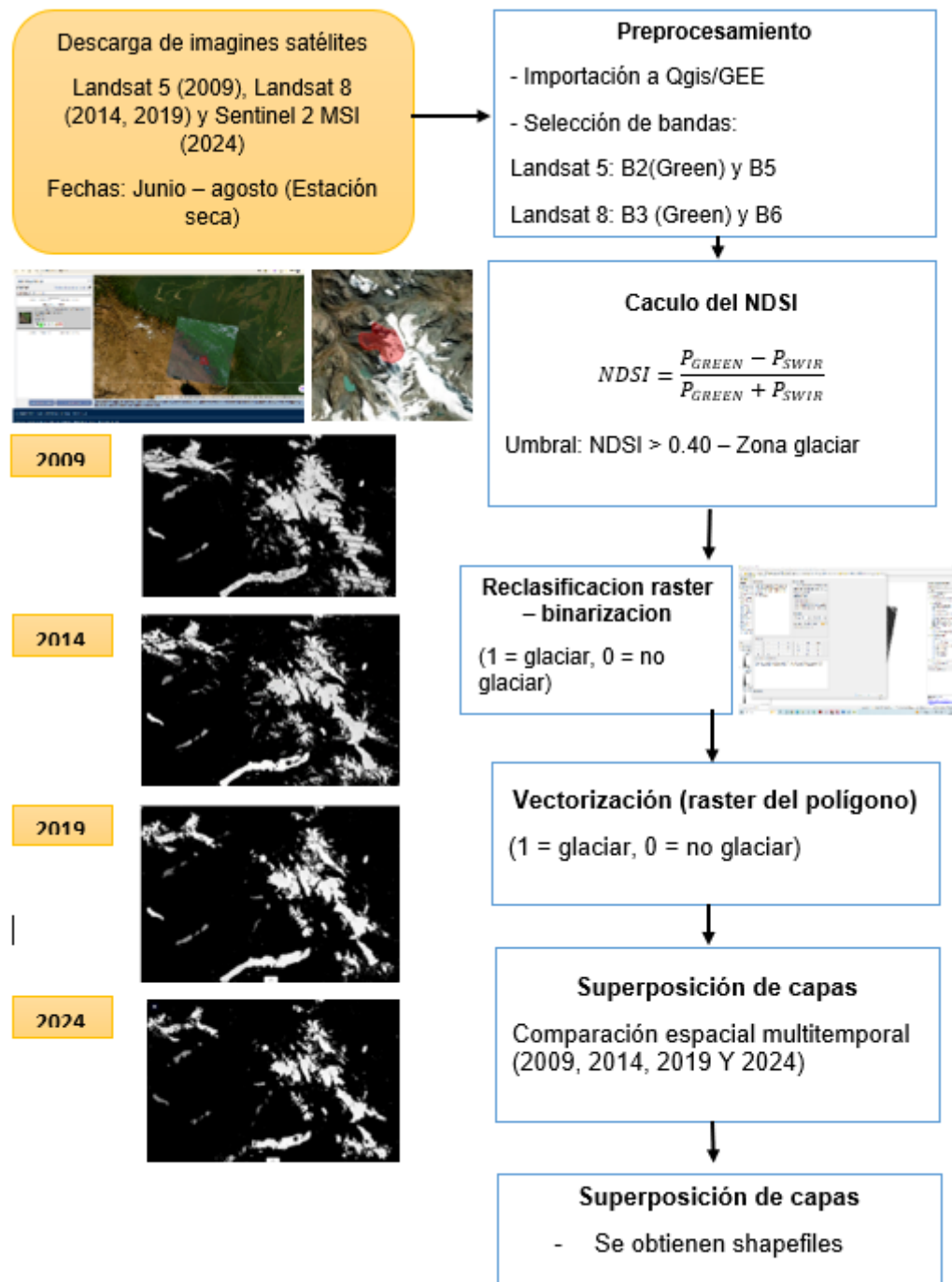
Para la detección de nieve y hielo, se empleó el NDSI, calculado a partir de la banda verde (Green) y la banda de bajo el rojo de onda corta (SWIR1), según la expresión:

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

Con un umbral de clasificación de  $NDSI \geq 0.40$ , tal como proponen Hall, Riggs y Salomonson y validado posteriormente por Gutiérrez (2020) y Cope (2021) en estudios de criósfera. Las imágenes NDSI fueron reclasificadas en mapas binarios (glaciar/no glaciar), vectorizadas en (1995) QGIS y posteriormente convertidas en shapefiles poligonales para su análisis espacial. Donde nos permite identificar y delimitar con precisión las áreas de los glaciares del nevado Sorapata en cada 5 años evaluado.

**Figura 15**

*Diagrama de procedimiento metodológico aplicado en el primer objetivo.*



*Nota.* Elaboración propia.

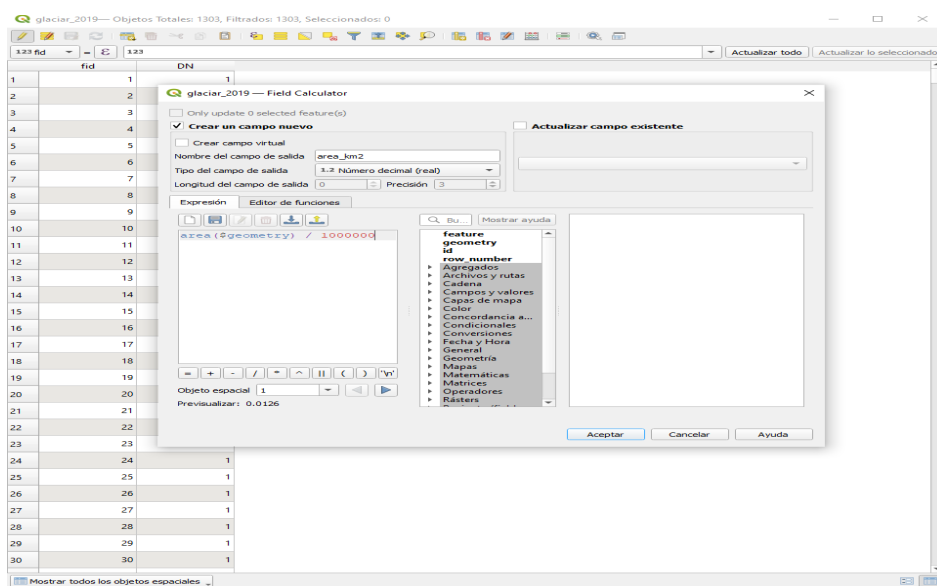
### 3.10.2. Objetivo 2: Cuantificar la pérdida de cobertura glaciar del Nevado Sorapata en la Cordillera de Apolobamba en los últimos 15 años.

Las áreas glaciares obtenidas por año fueron cuantificadas utilizando la herramienta Field Calculator de QGIS, mediante la fórmula:

$$\text{Area (km}^2\text{)} = \frac{\text{Area (geometry)}}{1000\ 000}$$

**Figura 16**

*Cálculo del área del nevado Sorapata.*



*Nota.* Elaboración propia - Qgis

Para precisar el volumen helero, se aplicó la expresión de Bahr et al. (1997), ampliamente utilizada para glaciares de montaña:

$$V = 0.0285 * A^{1.375}$$

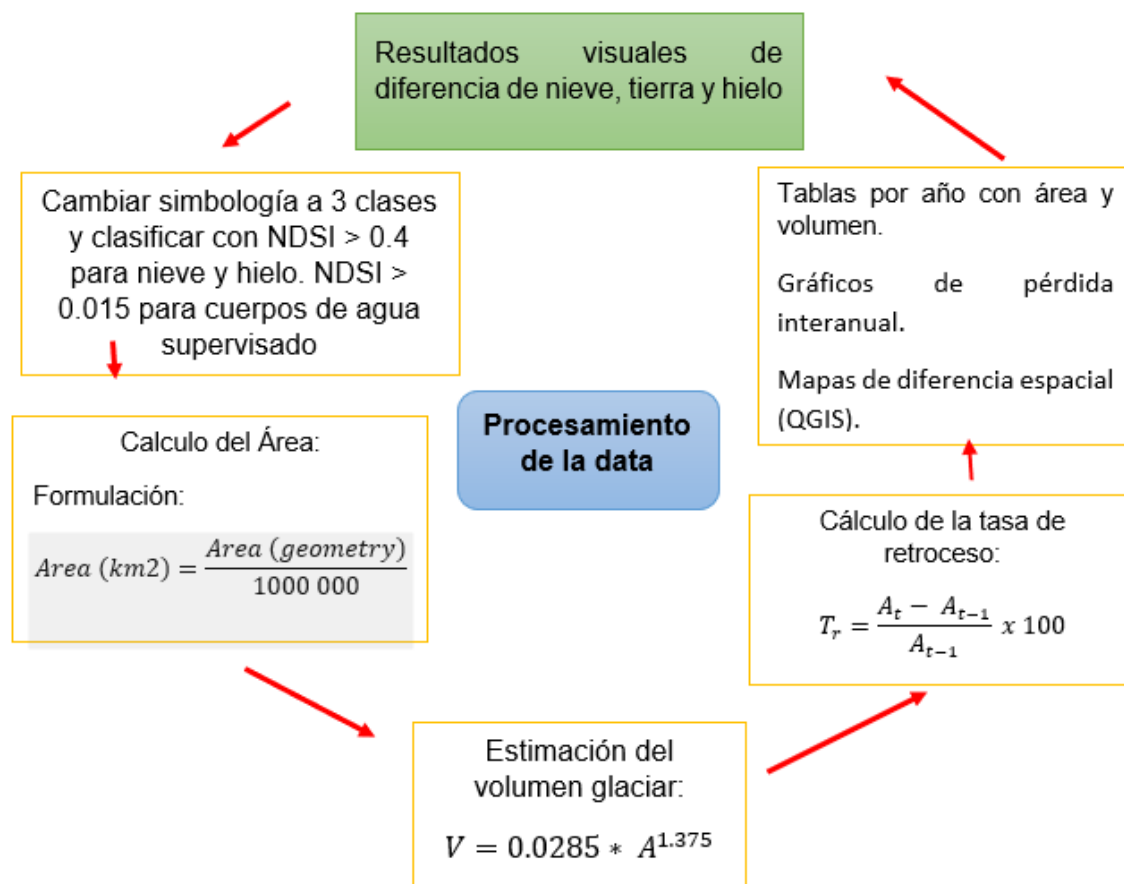
Donde V es el volumen en km<sup>3</sup> y A el área superficial en km<sup>2</sup>. Este modelo ha demostrado ser robusto para escalas regionales (Pérez, 2022; Soruco et al., 2009). Posteriormente, se calculó la tasa de retroceso interanual mediante la relación porcentual entre áreas sucesivas:

$$T_r = \frac{A_t - A_{t-1}}{A_{t-1}} \times 100$$

Se construyeron gráficos de series temporales (línea y barras) para representar cuantitativamente las pérdidas acumuladas y anuales, así como mapas de diferencia de superficie para visualizar espacialmente las zonas de mayor retracción.

**Figura 17**

*Diagrama de procedimiento metodológico aplicado en el segundo objetivo.*



*Nota.* Elaboración propia.

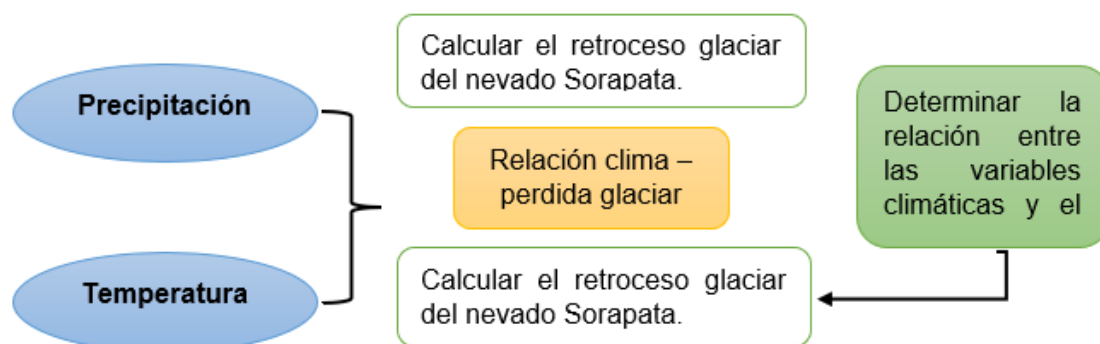
### 3.10.3. Objetivo 3: Determinar la relación entre las variables climáticas y la pérdida de cobertura glaciar del Nevado Sorapata en la Cordillera de Apolobamba.

Se recopilaron series climáticas anuales del periodo 2009–2024 para las variables de temple media anual y precipitaciones acopiadas, provenientes de estaciones meteorológicas del SENAMHI (Sina y Ananea). Para identificar

tendencias climáticas, se aplicaron modelos de regresiones lineales y el test de Mann-Kendall, adecuado para detectar cambios monotónicos en series hidrometeorológicas (Yue & Pilon, 2004). El vínculo estadístico entre el retroceso glaciar y las variables atmosféricas se analizó por medio de reciprocidades de Pearson y regresión lineal simple, evaluando los niveles de significancia ( $p < 0.05$ ) y coeficientes de determinación ( $R^2$ ). Se procesaron los datos en R-Studio v4.3 y SPSS v28, siguiendo protocolos de reproducibilidad estadística recomendados por Wilks (1975). Este enfoque permite establecer con solidez inferencias causales entre el retroceso glaciar y los patrones térmicos e hidrológicos de la región.

### Figura 18

*Diagrama de procedimiento metodológico aplicado en el tercer objetivo.*





## CAPÍTULO IV

### RESULTADOS Y DISCUSIÓN

#### 4.1. RESULTADOS

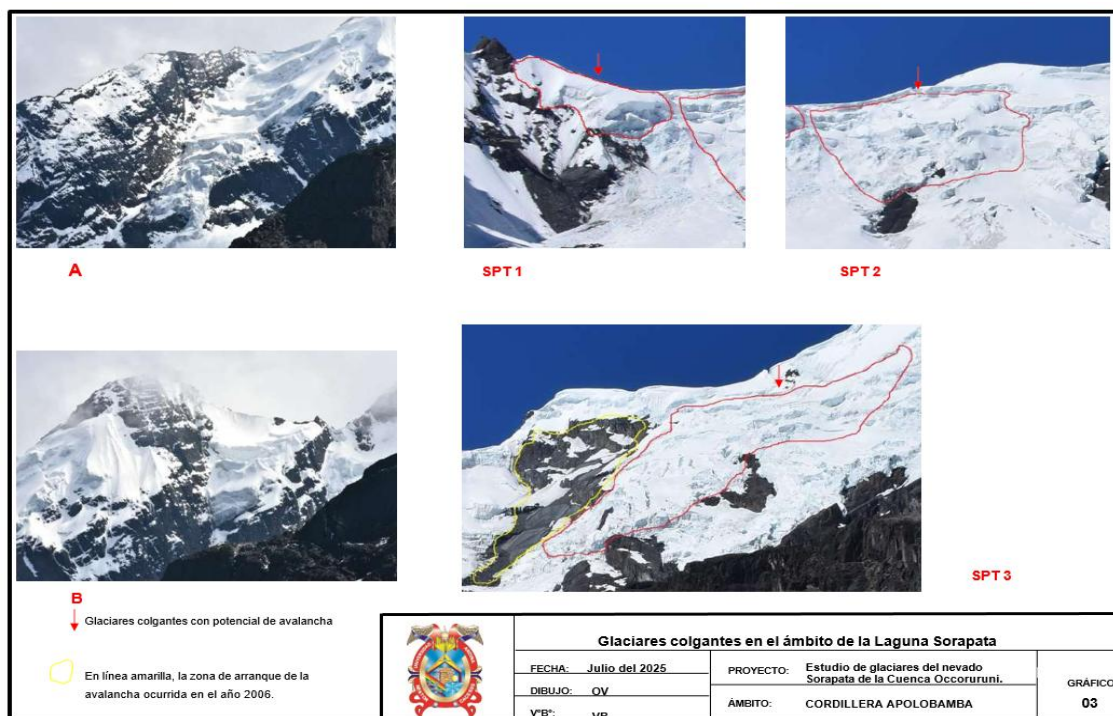
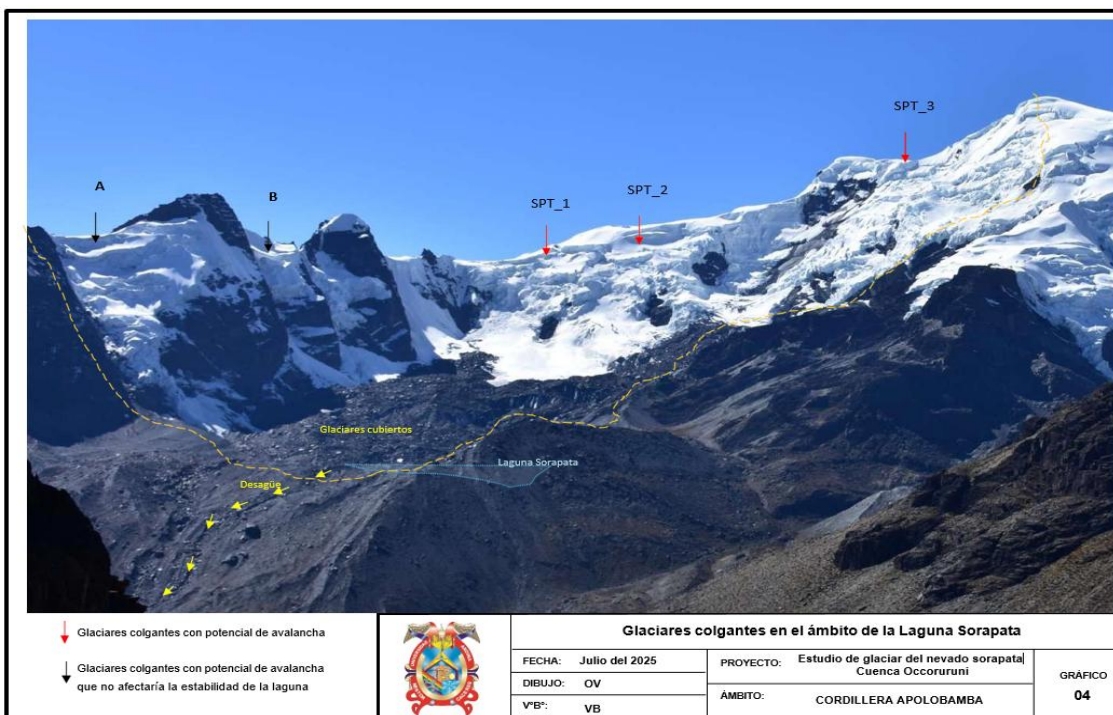
##### 4.1.1. Analizar el retroceso glaciar del Nevado Sorapata en la Cordillera de Apolobamba, en los últimos 15 años mediante el uso de imágenes satelitales (2009-2024).

En primera instancia, se identificó el nevado Sorapata donde se identificaron los glaciares y el área de estudio del nevado para posteriormente realizar mediante 5 clasificaciones supervisadas de las imágenes para el periodo de tiempo (2009, 2014, 2019 y 2024) que fueron el punto de partida para los análisis abordados respecto a las diferencias de coberturas en superficie y cambios en la hacendosa de los heleros y su correspondencia con variables y fenómenos climáticos.

Estas clasificaciones supervisadas obtenidas se muestran como un mosaico de imágenes en la figura, con la intención de visibilizar los cambios y las transiciones que se presentaron entre coberturas con el pasar del tiempo, brindando en un primer momento una noción clara sobre la evolución de los glaciares del área de análisis.

**Figura 19**

*Identificación del nevado Sorapata y los glaciares colgantes.*



*Nota.* Glaciares colgantes con potencial de avalancha en la cuenca de la Laguna Sorapata. Se destacan tres sectores inestables (SPT\_1, SPT\_2 y SPT\_3) y la zona de avalancha de 2005.



La figura 19, presenta una serie de imágenes fotointerpretadas que permiten identificar visualmente el Nevado Sorapata y los glaciares colgantes asociados ubicados en la oquedad de la Laguna Sorapata, en la Macizo de Apolobamba, región Puno. El conjunto de imágenes se orienta al reconocimiento de sectores con potencial de avalancha y riesgo de desprendimiento glaciar.

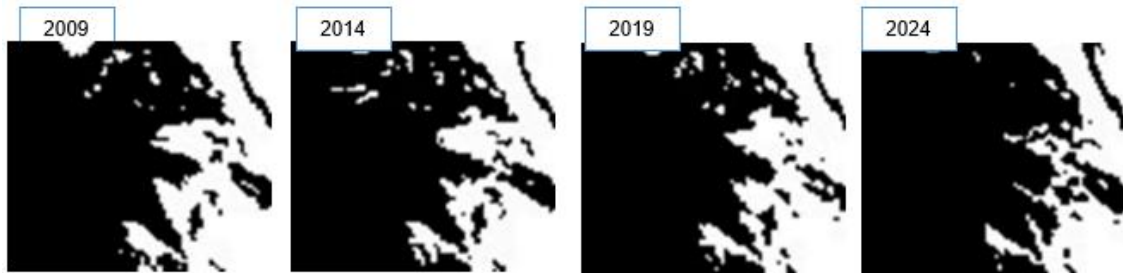
En la imagen superior se observa una fotografía panorámica del macizo glaciar, en la que se han delimitado tres sectores inestables identificados como SPT\_1, SPT\_2 y SPT\_3, los cuales corresponden a glaciares colgantes situados en zonas de fuerte pendiente, susceptibles a desprendimientos. También se señala la zona de avalancha ocurrida en el año 2005, lo cual refuerza la importancia del monitoreo de estos cuerpos glaciares en términos de riesgo hidrometeorológico.

Las imágenes inferiores corresponden a acercamientos fotográficos específicos de los sectores A y B, donde se detallan con mayor precisión las áreas de acumulación y ruptura. En cada imagen se delinear los límites de los glaciares colgantes con líneas punteadas rojas, destacando las posibles zonas de fractura o deslizamiento.

Esta representación visual constituye un insumo importante para la evaluación geomorfológica y de peligros asociados al retroceso glaciar, permitiendo complementar la información obtenida a través del análisis espectral de imágenes satelitales.

## Figura 20

*Clasificaciones supervisadas empleando en los años: 2009, 2014, 2019 y 2024.*



*Nota.* Elaboración propia, Imágenes satelitales de landsat 5 y landsat 8.

La figura 20 muestra las derivaciones de las clasificaciones supervisadas realizadas sobre el Nevado Sorapata empleando retratos satelitales de los años 2009, 2014, 2019 y 2024, correspondientes a los sensores Landsat 8 OLI/TIRS y Landsat 5 TM. En cada una de las imágenes se representa la delimitación binaria del glaciar, donde el color blanco indica las áreas identificadas como cobertura glaciar (nieve o hielo), mientras que el negro representa otras coberturas (roca expuesta, vegetación, etc.).

Se observa una disminución creciente de la superficie helera a lo largo del periodo de análisis. En 2009, la extensión glaciar era considerablemente mayor, cubriendo amplias zonas del relieve montañoso. Para 2014, se percibe un retroceso notable en las porciones periféricas. Este patrón continúa en 2019, donde se evidencia una merma significativa de masa helera, particularmente en las zonas de menor altitud. Finalmente, en 2024, el glaciar muestra su menor cobertura registrada, con reducción marcada hacia el núcleo central del nevado.

**Figura 21**

*Raster de la evaluación de la cobertura glaciar del Nevado Sorapata (2009 – 2024)*



*Nota.* Elaboración propia, ráster del glaciar nevado Sorapata - Qgis.

La figura 21, presenta el resultado de la evaluación multitemporal de la cubierta helero del Nevado Sorapata para los años 2009, 2014, 2019 y 2024, representada en formato ráster mediante el software QGIS. Las imágenes reflejan la clasificación temática del área glaciar, permitiendo visualizar espacialmente las permutas en las extensiones del hielo en el transcurso del lapso de análisis.

En los mapas se distinguen dos clases principales:

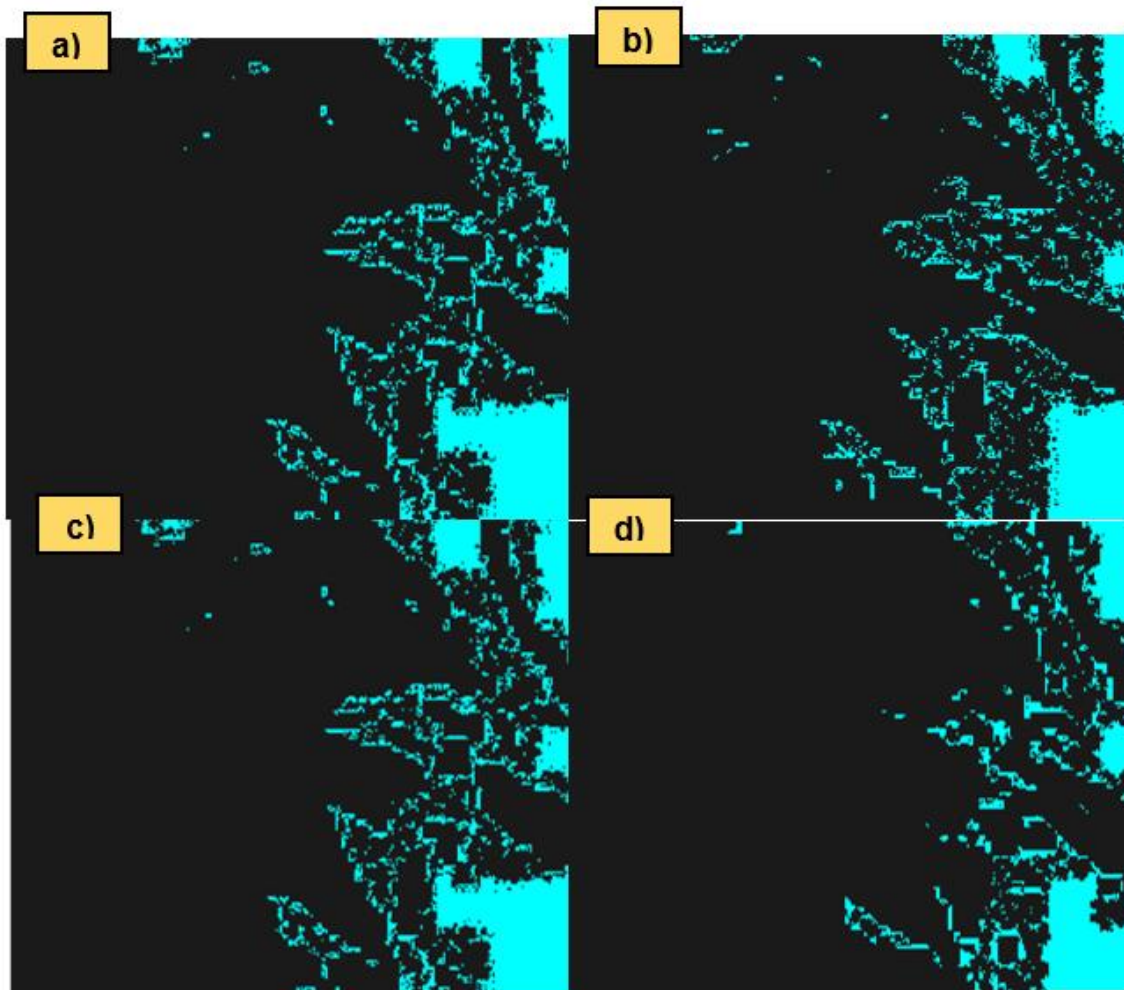
- **Zona glaciar (color rosa):** Representa las zonas cubiertas por nieve o hielo reconocidas mediante índices espectrales (NDSI) y técnicas de clasificación supervisada.
- **Terreno no glaciar (color verde):** Corresponde a zonas rocosas, vegetación u otras coberturas no permanentes.

Se evidencia una disminución gradual y sostenida del área glaciar desde el año 2009 hacia el 2024. En la imagen correspondiente al 2009, el color rosa abarca una proporción mayor de superficie, la cual se va reduciendo progresivamente en los años siguientes. En 2024, se visualiza la menor cobertura glaciar registrada, confirmando la regresión espacial de los cuerpos heleros y la fragmentación de las masas de nevisca.

Este conjunto de mapas permite identificar visualmente no solo la reducción en superficie, sino también los patrones espaciales del retroceso, los cuales tienden a concentrarse en zonas periféricas de menor altitud, donde la fusión glaciar es más intensa. Además, las áreas remanentes de hielo muestran signos de desconexión entre bloques glaciares, lo que refleja una pérdida de continuidad que podría estar asociada al aumento del temple y a una menor acumulación de nieve anual en la región.

**Figura 22**

*Mapas temporales de la cobertura glaciar (hielo y nieve).*



*Nota.* Resultado del cálculo del índice NDSI en el visualizador de la plataforma GEE. En la letra a) tenemos el año 2009, b) el año 2014, c) el año 2019, d) el año 2024.

Donde las clasificaciones realizadas para el nevado Sorapata se verificaron haciendo uso del índice NDSI, encontrando que los valores de las zonas de entrenamiento fueron menores al umbral establecido de 0.4 que representa coberturas de nieve sólidas. Así mismo, en la figura se observan imágenes detalladas de las coberturas de hielo/nieve para los años 2009, 2014, 2019 y 2024 de los glaciares estudiados. A partir de esta información se observa que el

nevado Sorapata presentaron cambios significativos en sus coberturas. Por otra parte, se observa que el glaciar tiene un incremento significativo de sus coberturas que se refleja en la ausencia de área para el año 2024.

#### 4.1.2. Cuantificar la pérdida de cobertura glaciar del Nevado Sorapata en la Cordillera de Apolobamba en los últimos 15 años.

El análisis multitemporal de la cubierta helero del Nevado Sorapata entre los años 2009, 2014, 2019 y 2024 reveló una merma significativa en la extensión de las masas de hielo, procesada mediante el índice espectral NDSI en la plataforma Google Earth Engine (GEE). Las retratos satelitales Landsat 5 (2009) y Landsat 8 (2014, 2019 y 2024) fueron seleccionadas durante la estación seca (junio–agosto), garantizando condiciones óptimas de visibilidad y mínima nubosidad.

**Tabla 3**

*Evolución de la cobertura glaciar del Nevado Sorapata (2009–2024).*

Año	Área glaciar (km <sup>2</sup> )	Pérdida vs. 2009 (km <sup>2</sup> )	% Retroceso
2009	0.870	0.000	0.00 %
2014	1.005	-0.135	-15.50 %
2019	0.968	-0.098	-11.26 %
2024	0.672	0.198	22.84 %

Cabe precisar que los valores negativos en pérdida y porcentaje corresponden a incrementos temporales en la cobertura glaciar, posiblemente influenciados por nevadas estacionales o ruido atmosférico no filtrado del todo. Así también se observa una variabilidad interanual en la extensión glaciar del Nevado Sorapata. Aunque en 2014 se registra un acrecentamiento de zona



glaciar del 15.50 % relación al año base (2009), este comportamiento puede atribuirse a factores estacionales (acumulación de nieve temporal) o errores asociados al umbral espectral. Para 2024, el retroceso glaciar alcanza un 22.84 %, reflejando una tendencia neta de pérdida acumulativa de masas glaciares. Este resultado evidencia un retroceso crítico en menos de dos décadas, alineado con estudios sobre glaciares tropicales andinos.

### Tabla 4

*Comparación acumulada de pérdida glaciar respecto al año base 2009.*

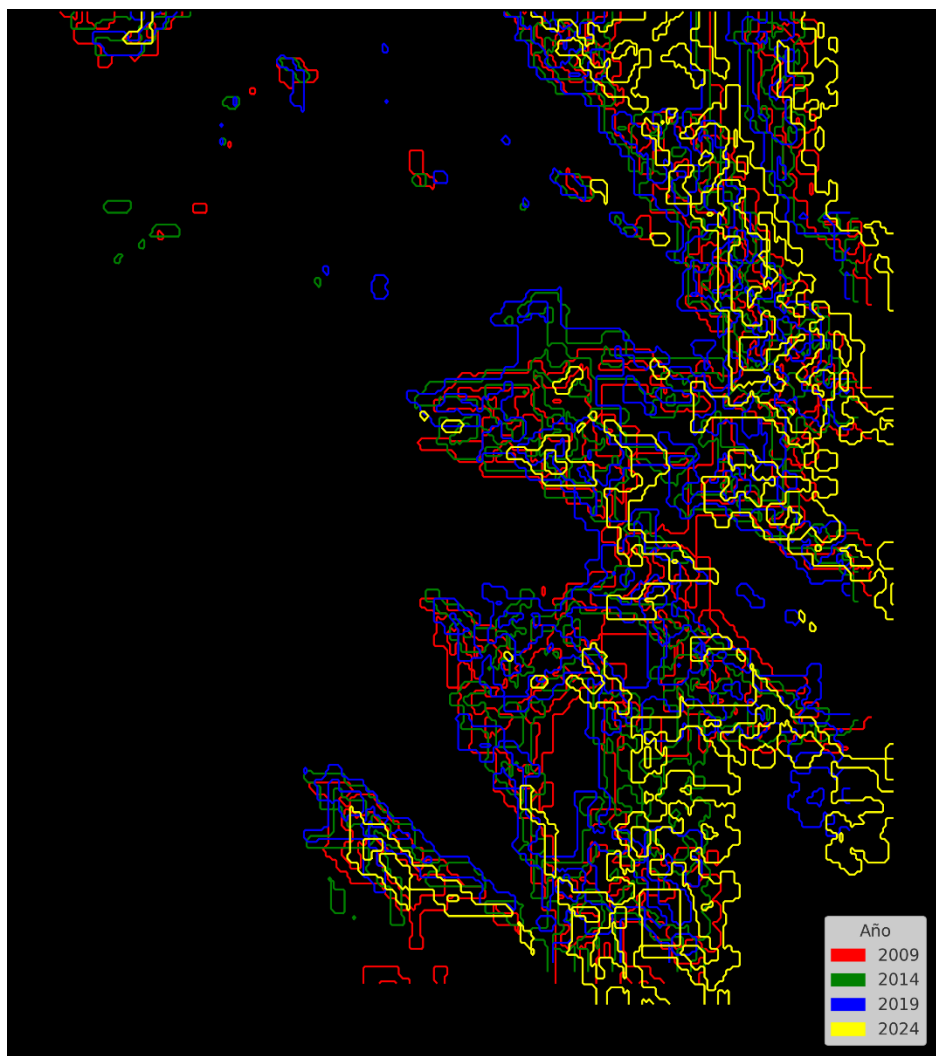
<b>Año base</b>	<b>Año comparación</b>	<b>Pérdida vs. 2009 (km<sup>2</sup>)</b>	<b>% acumulada</b>	<b>Pérdida</b>
2009	2014	-0.135	-15.50 %	
2009	2019	-0.098	-11.26 %	
2009	2024	0.198	22.84 %	

El año 2024 muestra la mayor pérdida de superficie glaciar con respecto a 2009, con una disminución neta de aproximadamente 0.1988 km<sup>2</sup>, lo que representa más del 22 % del área glaciar original. Este valor es crítico considerando que el área total del macizo del Nevado Sorapata es de 2.865 km<sup>2</sup>, y que esta pérdida afecta directamente la oferta hídrica de ecosistemas de montaña y poblaciones dependientes del deshielo estacional.

## ❖ Variación de superficie glaciar

## Figura 23

*Retroceso glaciar del Nevado Sorapata (2009 – 2024).*



*Nota.* Se visualizan los contornos glaciar correspondientes a los años 2009 (rojo), 2014 (verde), 2019 (azul) y 2024 (amarillo), extraídos a partir de imágenes Landsat clasificadas mediante técnicas de umbral espectral sobre el índice NDSI y tratamiento binario.

La figura 23, muestra el mapa multitemporal del Nevado Sorapata, la dinámica de retroceso glaciar entre los años 2009 y 2024 mediante la superposición de contornos glaciares clasificados espectralmente a partir de imágenes Landsat. Las delimitaciones correspondientes a cada año; rojo (2009),

verde (2014), azul (2019) y amarillo (2024), fueron obtenidas aplicando el índice NDSI en la tribuna Google Earth Engine, Visualmente, se evidencia un desplazamiento progresivo, donde los bordes glaciares hacia altitudes superiores, especialmente en las laderas con mayor exposición solar. El contorno del año 2009 (en rojo) representa la máxima extensión glaciar dentro del periodo de estudio, mientras que el de 2024 (amarillo) delimita la cobertura remanente más reducida y fragmentada. La secuencia temporal muestra que, aunque en 2014 y 2019 se presentan aparentes incrementos en la cobertura, estas variaciones no reflejan una tendencia de avance glaciar, sino posiblemente acumulaciones nivosas temporales o ruido atmosférico residual no corregido.

### Tabla 5

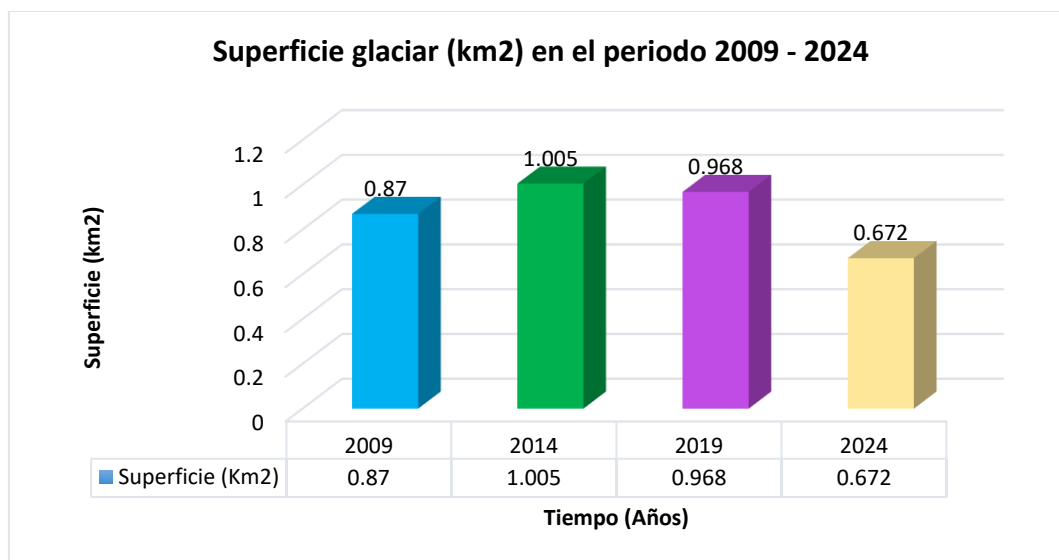
*Variación del área superficial glaciar del Nevado Sorapata durante el periodo 2009–2024.*

Periodo	Superficie glaciar inicial (km <sup>2</sup> )	Superficie glaciar final (km <sup>2</sup> )	Pérdida total (km <sup>2</sup> )	Tasa de retroceso anual (km <sup>2</sup> /año)
<b>2009–2014</b>	0.870	1.005	+0.135	+0.027
<b>2014–2019</b>	1.005	0.968	-0.037	-0.0074
<b>2019–2024</b>	0.968	0.672	-0.296	-0.0592
<b>2009–2024</b>	0.870	0.672	-0.198	-0.0132

*Nota.* Valores positivos indican incremento de cobertura glaciar y - imágenes satelitales Landsat y el índice NDSI.

**Figura 24**

*Superficie del glaciar del nevado Sorapata 2009 - 2024 de la cordillera Apolobamba.*



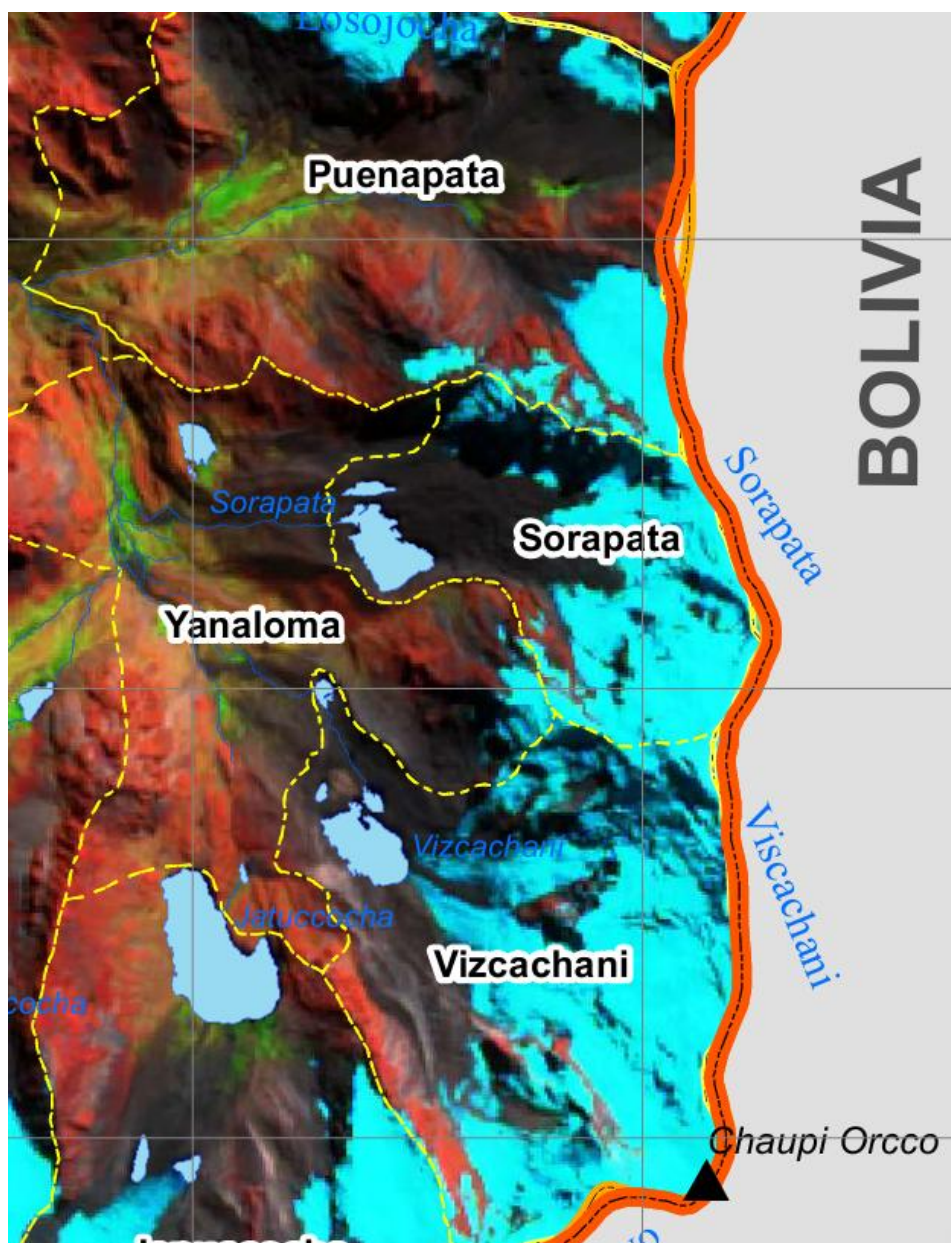
Donde la superficie helero pasó de 0.870 km<sup>2</sup> en 2009 a 0.672 km<sup>2</sup> en 2024, lo que personifica una pérdida neta del 22.84 % en 15 años. Este retroceso, si bien no lineal, pone en evidencia un deterioro acumulativo de la masa criosférica. Además, considerando que el macizo glaciar del Sorapata posee un área total de 2.865 km<sup>2</sup>, esta pérdida de hielo representa un impacto significativo sobre los flujos hidrológicos que dependen del deshielo estacional.

La evolución multitemporal de la cubierta helero del Nevado Sorapata entre 2009 y 2024 revela una merma neta de 0.198 km<sup>2</sup> (-22.84 %), con una tasa media de retroceso de -0.0132 km<sup>2</sup>/año. Aunque se observó un incremento puntual en 2014 (+15.5 %), este se atribuye a eventos estacionales de acumulación nival o incertidumbres asociadas al umbral espectral del NDSI. El periodo 2019–2024 presentó el mayor retroceso (-0.296 km<sup>2</sup>), reflejando una prontitud crítica en la merma de masa helero. Estos resultados, obtenidos mediante imágenes Landsat y procesados en Google Earth Engine y Qgis,

evidencian la vulnerabilidad de estas masas frente al cambio del clima regional, con implicancias para la seguridad hídrica y ecosistémica en alta montaña.

### Figura 25

Mapa de cobertura glaciar del nevado Sorapata.



Nota. Elaboración en Qgis.

La figura 25, muestra el mapa de cobertura glaciar del Nevado Sorapata, elaborado en el entorno SIG con el software QGIS. En la retrato se puede ver con claridad la distribución espacial actual de los glaciares que conforman este



macizo, ubicado en la Macizo de Apolobamba, en la región altiplánica de Puno, próxima a la frontera con Bolivia.

Las zonas glaciadas han sido representadas en color celeste brillante, lo que permite diferenciar nítidamente las áreas cubiertas por nieve y hielo del resto del terreno. La mayor concentración de hielo se localiza en las laderas noreste y este del Nevado Sorapata, donde las condiciones de altitud y orientación favorecen la persistencia de los glaciares. Asimismo, se identifican zonas de ablación con pérdida de continuidad en la cobertura, lo cual refleja los efectos visibles de la regresión glaciár en las novísimas décadas.

#### **4.1.3. Determinar la relación entre las variables climáticas y la pérdida de cobertura glaciár del Nevado Sorapata en la Cordillera de Apolobamba.**

Los resultados de la recolección y procesamiento de la data de las variables atmosféricas de precipitaciones, temperatura y humedad.

Tabla 6

*Variables climáticas en el nevado de Sorapata.*

Año	Precipitación media (mm)	Temperatura máxima	Temperatura mínima	Rango térmico mensual (Tmax - Tmin).	Humedad relativa	Humedad del aire
2009	8.00	16.45	0.20	10.26	81.43	8.18
2010	8.30	17.28	0.56	10.49	80.77	8.26
2011	7.75	16.06	0.73	9.65	83.08	8.22
2012	7.65	16.18	0.60	9.82	82.44	8.11
2013	7.76	15.82	0.47	9.76	82.63	8.19
2014	7.97	16.36	0.85	9.60	83.32	8.38
2015	7.95	16.20	0.88	9.66	83.24	8.35
2016	8.19	17.14	0.26	10.45	81.14	8.25
2017	8.12	16.62	0.81	9.58	83.73	8.49
2018	7.72	15.79	0.67	9.42	84.18	8.34
2019	8.09	16.24	0.83	9.72	83.12	8.44
2020	8.36	16.89	1.03	9.94	82.29	8.48
2021	8.06	16.24	1.22	9.51	84.00	8.50
2022	8.11	17.21	-0.04	10.59	80.22	8.08
2023	8.70	17.21	0.95	10.01	82.36	8.69
2024	9.05	17.73	1.51	10.21	81.52	8.78

*Nota.* Resultados de datos procesados y descarga de NASA POWER de datos climáticos del nevado Sorapata del año 2009 - 2024.

La tabla 6, enseña el progreso de las variables climáticas anuales registradas en el Nevado Sorapata entre los años 2009 y 2024, a partir de datos procesados y descargados del sistema NASA POWER. Las variables consideradas son: precipitación media (mm), temperatura máxima y mínima (°C),



rango térmico mensual ( $T_{max} - T_{min}$ ), humedad relativa (%) y humedad del aire (g/kg).

Durante el periodo de estudio, la precipitación media anual ha fluctuado ligeramente entre 7.65 mm (2012) y 9.05 mm (2024), sin mostrar una tendencia uniforme ascendente o descendente, aunque con valores persistentemente bajos. El temple máximo ha oscilado entre 15.79 °C (2013) y 17.73 °C (2024), mientras que el temple mínimo varió entre -0.04 °C (2022) y 1.51 °C (2024). El rango térmico mensual, indicador de amplitud térmica, ha permanecido relativamente estable, entre 9.42 °C y 10.59 °C. En cuanto a la humedad relativa, se observan valores altos (superiores al 80%) durante todos los años, y la humedad del aire varía entre 8.08 y 8.78 g/kg.

El análisis de la serie climática revela señales consistentes con los efectos del cambio del clima en zonas de elevada montaña. En primer lugar, se observa una tendencia general al acrecentamiento del temple mínima anual, especialmente a partir del año 2018, lo cual indica un posible calentamiento nocturno o disminución de las heladas. Este fenómeno es relevante para los glaciares, ya que las temperaturas mínimas juegan un rol clave en el balance energético del hielo.

Por otro lado, aunque la precipitación no muestra una disminución abrupta, su bajo volumen general, combinado con una alta temperatura media, sugiere una menor acumulación de nieve en la zona, reduciendo la capacidad de regeneración del glaciar. Este desequilibrio entre aporte (nieve) y pérdida (fusión) podría acelerar el proceso de retroceso glaciar.

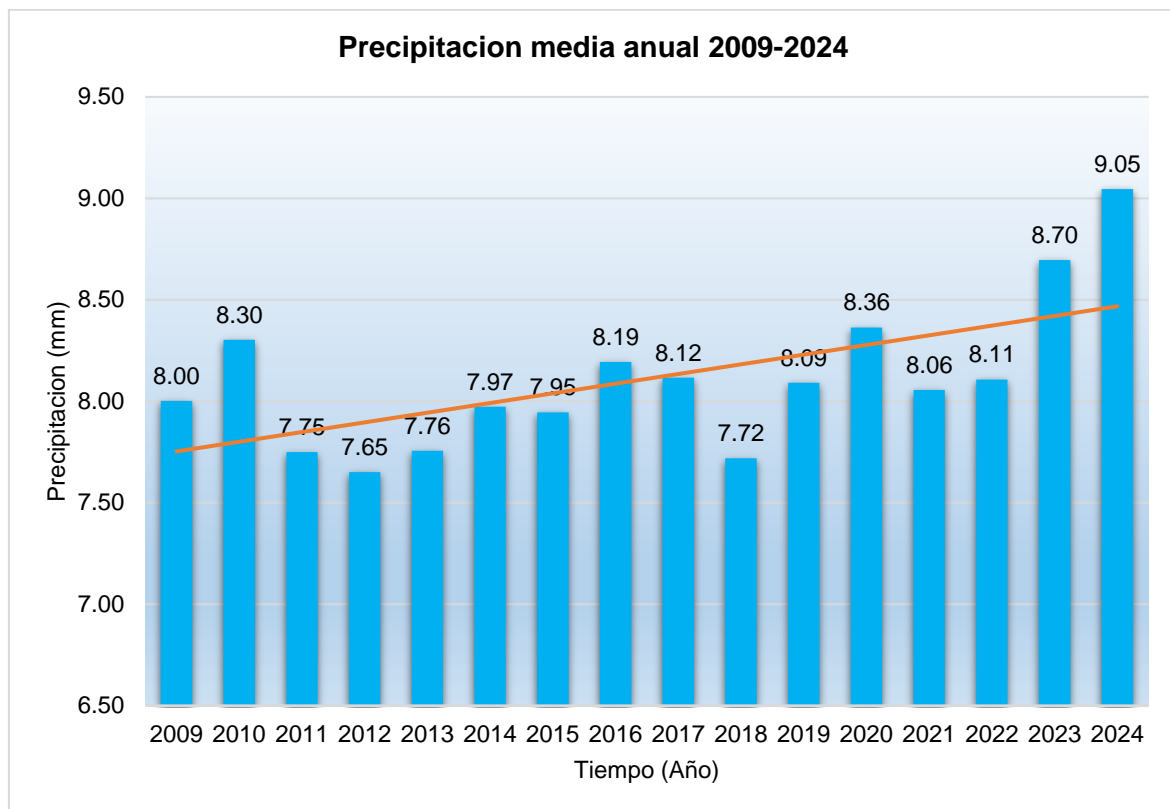
Además, el incremento en la humedad del aire hacia los últimos años puede estar asociado a cambios en la dinámica atmosférica regional (como el

desplazamiento de masas húmedas o intensificación de eventos extremos), lo cual, en combinación con el alza térmica, contribuye al derretimiento superficial y pérdida de masa glaciar.

Finalmente, el rango térmico mensual relativamente estable sugiere que el problema no radica en la variabilidad térmica diurna, sino en el acrecentamiento absoluto de los temples, especialmente de las mínimas, fenómeno que favorece la fusión glaciar sostenida durante todo el año.

### Figura 26

*Precipitación media anual del nevado Sorapata del periodo 2009-2024.*



La figura 26, muestra precipitación media anual del nevado Sorapata del periodo 2009-2024. En donde, se observa que durante el periodo de 15 años se muestra las precipitaciones anuales, A lo largo del periodo de análisis, las precipitaciones media anual muestra una tendencia ligeramente creciente, pasando de 8.00 mm (2009) a 9.05 mm (2024), donde Máximo: 9.05 mm (2024)



y Mínimo: 7.65 mm (2012). El análisis de los registros anuales evidencia la ocurrencia de extremos climáticos relevantes que condicionan la dinámica glaciar del Nevado Sorapata. En cuanto a la precipitación, el valor más bajo se registró en 2012, lo que sugiere condiciones más secas desfavorables para la acumulación nival, mientras que el año 2024 alcanzó el máximo (9.05 mm), posiblemente asociado a una atmósfera más cálida y húmeda.

Asimismo, se observa una propensión ligeramente progresiva en la precipitación media anual a lo largo de la fase analizado. Sin embargo, esta tendencia positiva no implica necesariamente una mayor acumulación glaciar, ya que el régimen de precipitación por sí solo no determina la estabilidad del glaciar. El contexto térmico, especialmente el incremento de temperaturas mínimas detectado en los datos climáticos previos, sugiere que una mayor proporción de la precipitación podría estar ocurriendo en forma de lluvia en lugar de nieve, lo cual favorece el derretimiento superficial y no la acumulación de masa glaciar.

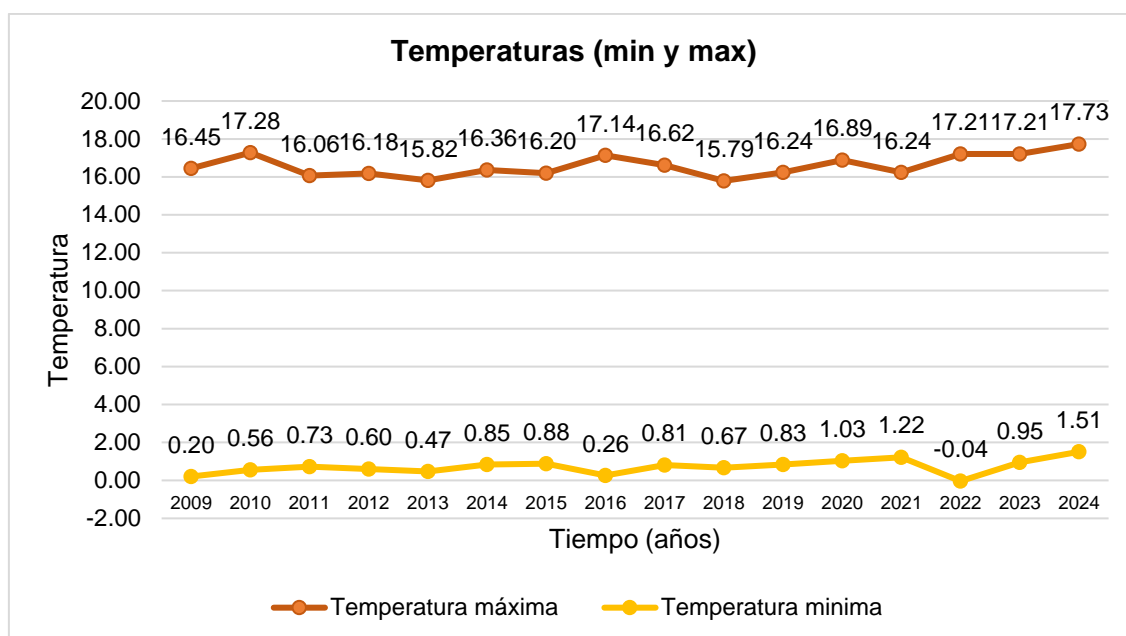
Además, el comportamiento interanual altamente variable observado entre 2012 y 2020 denota la posible influencia de fenómenos climáticos extremos tal El Niño–Oscilación del Sur (ENSO) o anomalías en la circulación atmosférica. Por ejemplo, el año 2012 registró el mínimo de precipitación (7.65 mm), lo cual coincide con condiciones secas críticas para la acumulación de nieve, mientras que en 2024 se presentó el pico máximo (9.05 mm), posiblemente relacionado con una atmósfera más cálida y cargada de humedad.

Esta dinámica sugiere una mayor irregularidad en el régimen hidrometeorológico del nevado Sorapata, con implicaciones directas en la masa glaciar y su disponibilidad hídrica para ecosistemas y poblaciones aguas abajo. La combinación de aumento térmico y mayor humedad relativa podría

desencadenar una aceleración del retroceso glaciar, fenómeno que debe analizarse integralmente junto a las variaciones de cobertura detectadas en las imágenes satelitales.

### Figura 27

*Temperatura media anual máximo y mínimo del nevado Sorapata del periodo 2009-2024.*



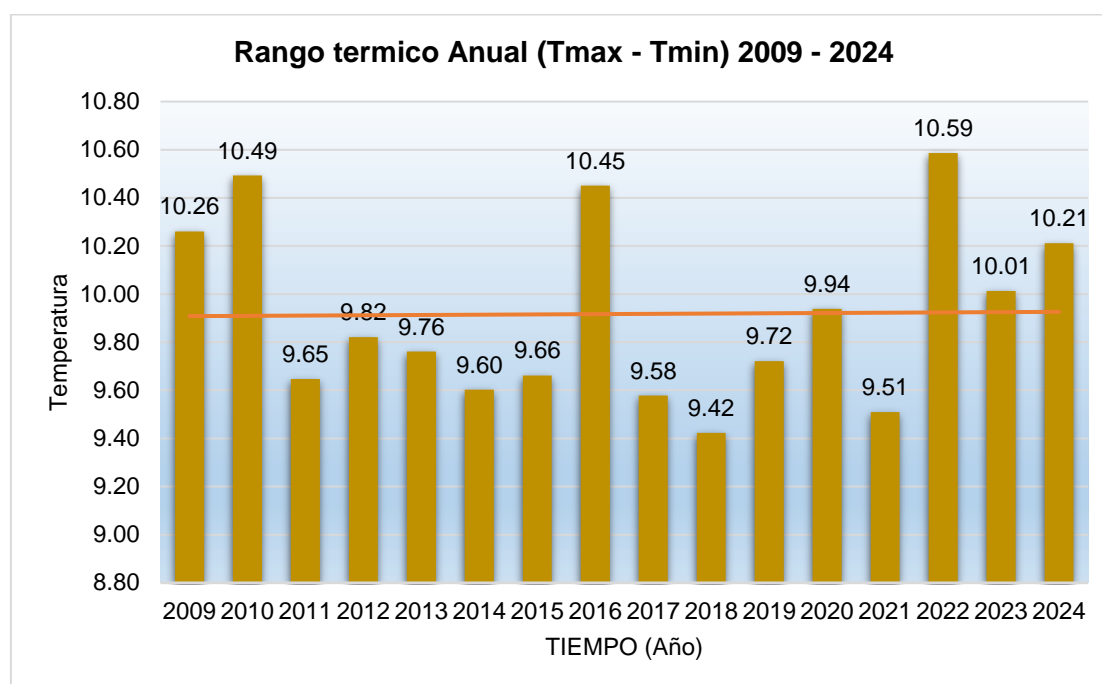
En la figura 27, el temple máximo anual mostró un incremento sostenido, con el valor más alto en 2024 (17.73 °C) y el más bajo en 2018 (15.79 °C). Este aumento térmico refleja una intensificación del forzante energético sobre la superficie glaciar. Por su parte, el temple mínimo experimentó un máximo de 1.51 °C en 2024, revelando una reducción progresiva de eventos de congelación nocturna, mientras que en 2022 se alcanzó un valor atípicamente bajo (-0.04 °C), probablemente vinculado a una oscilación climática puntual.

Se observa un comportamiento climático preocupante respecto a la evolución térmica del nevado Sorapata. El incremento sostenido del temple máxima, que alcanzó su punto más alto en 2024 (17.73 °C), sugiere un aumento

en el forzamiento radiativo que podría acelerar el derretimiento glaciar, reduciendo la masa de hielo superficial y afectando el equilibrio energético del ecosistema de alta montaña. Por otro lado, el temple mínimo muestra una tendencia menos estable, con una elevación general hacia valores positivos, lo que evidencia una reducción en la ocurrencia de noches frías suficientes para mantener procesos de recongelación. Este fenómeno indica una pérdida progresiva de las condiciones térmicas necesarias para la conservación glaciar, con años críticos como 2022, donde el temple mínimo descendió hasta valores negativos ( $-0.04\text{ }^{\circ}\text{C}$ ), probablemente asociados a oscilaciones climáticas de corto plazo. Esta combinación de máximas elevadas y mínimas ascendentes constituye una amenaza directa para la permanencia de los glaciares tropicales como Sorapata.

### Figura 28

*Rango térmico media anual máximo y mínimo del nevado Sorapata del periodo 2009-2024.*





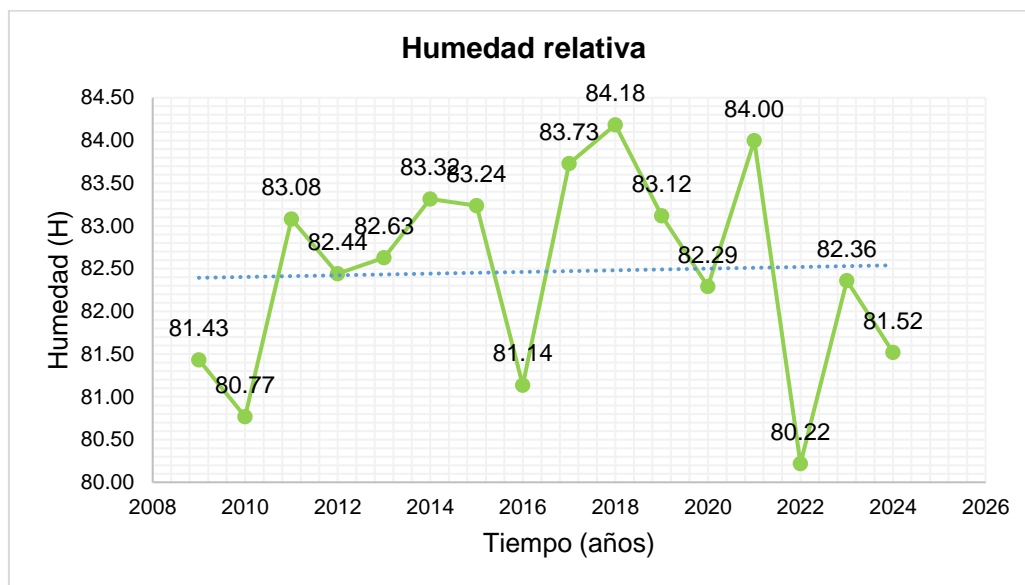
La figura 28, muestra el comportamiento del rango térmico anual en el nevado Sorapata, el cual representa la amplitud de variación entre las temperaturas máximas y mínimas. Este parámetro alcanzó su mayor valor en 2022 (10.59 °C) y el menor en 2018 (9.42 °C), indicando que en 2022 se dieron condiciones más extremas de fusión diurna y recongelación nocturna, lo cual incrementa la vulnerabilidad del glaciar. Simultáneamente, la humedad relativa mostró su punto más bajo también en 2022 (80.22 %), situación que favorece una mayor ablación glaciar por aumento de la irradiación solar incidente, mientras que en 2018 alcanzó el valor más alto (84.18 %), reflejando condiciones más nubosas y con menor merma de masa glaciar. En cuanto a la humedad del aire, esta presentó una propensión progresiva en el periodo evaluado, con un máximo en 2024 (8.78 g/m<sup>3</sup>) y un mínimo en 2022 (8.08 g/m<sup>3</sup>), consolidando el escenario de un ambiente más cálido y húmedo en los últimos años. En conjunto, estos indicadores climáticos revelan una intensificación de los procesos que aceleran la pérdida glaciar, siendo el año 2022 un punto crítico en la dinámica del nevado Sorapata.

Estos resultados sugieren que el nevado Sorapata está siendo cada vez más afectado por condiciones climáticas que favorecen su degradación. El acrecentamiento de la humedad del aire, escoltado de un acrecentamiento en el rango térmico y una disminución de la humedad relativa, puede provocar un desbalance en el sistema de acumulación y fusión glaciar. Esto genera un entorno menos propicio para la regeneración del hielo, agravando el retroceso de la cobertura glaciar observado en las últimas décadas. De este modo, los datos del clima no solo reflejan una tendencia hacia el calentamiento, sino

también una alteración en los ciclos hidrotérmicos fundamentales para la sostenibilidad del ecosistema glaciar del Sorapata.

### Figura 29

*Humedad relativa del nevado Sorapata del periodo 2009-2024.*



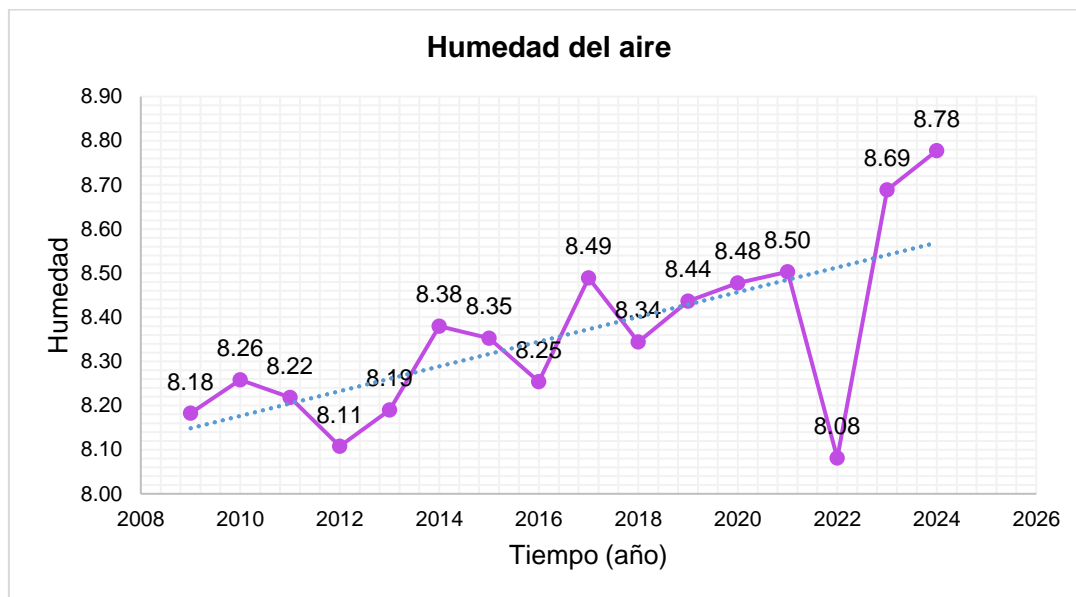
La figura 29, enseña la evolución del relente relativo anual en el nevado Sorapata entre los años 2009 y 2024. En este periodo, se observa una marcada variabilidad interanual, con un valor máximo de 84.18 % en 2018 y un mínimo de 80.22 % en 2022. El comportamiento de esta variable es crucial, ya que está directamente vinculado a la cantidad de vapor de H<sub>2</sub>O en la atmósfera y al grado de nubosidad, lo cual influye significativamente en la irradiación solar que incide encima la superficie glaciar.

Desde un análisis crítico, el año 2018 destaca por su alta humedad relativa, lo que sugiere una mayor presencia de nubes y, por ende, menor radiación directa sobre el glaciar, condición que puede reducir la ablación superficial. En contraste, 2022 presentó la humedad más baja del periodo, indicando cielos más despejados y un aumento en la radiación solar incidente, lo cual intensifica el proceso de fusión glaciar. Este comportamiento refuerza la hipótesis de que la

disminución de la humedad relativa contribuye a acelerar el retroceso glaciar, al crear un entorno más seco y con mayor disponibilidad energética para la ablación. Por lo tanto, la humedad relativa, junto con otros factores climáticos, se configura como un modulador clave en la dinámica de pérdida de masa del nevado Sorapata.

**Figura 30**

*Dinámica Humedad del aire de nevado Sorapata del periodo 2009-2024.*



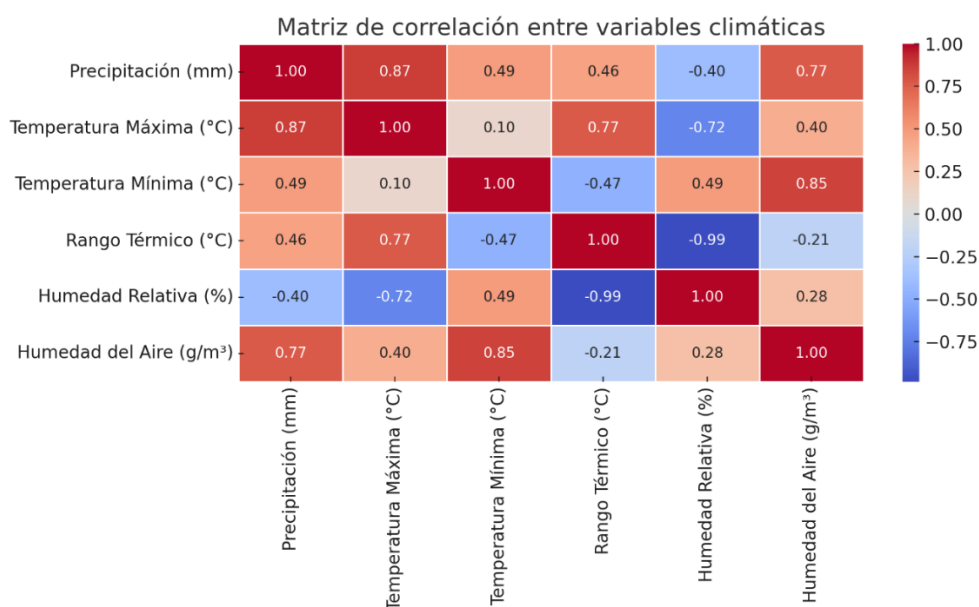
La figura 30, muestra la evolución de la humedad absoluta ( $\text{g/m}^3$ ) en el nevado Sorapata durante el periodo 2009–2024. La tendencia general es creciente, lo que indica un incremento progresivo del contenido de vapor de  $\text{H}_2\text{O}$  en el aire. El valor más alto se registró en el año 2024 con  $8.78 \text{ g/m}^3$ , mientras que el mínimo ocurrió en 2022 con  $8.08 \text{ g/m}^3$ . Este patrón revela importantes implicancias para el balance energético y la dinámica del glaciar.

Desde un enfoque crítico, el aumento sostenido de la humedad del aire podría estar vinculado a una atmósfera más cálida, con mayor capacidad para retener vapor de agua, lo que a su vez potencia el efecto invernadero local. Este incremento en el contenido de humedad también puede favorecer la formación

de nubosidad baja y niebla, alterando los flujos de radiación y reduciendo la pérdida de calor nocturno. No obstante, el valor mínimo de 2022 coincide con el descenso en la humedad relativa y un incremento en el rango térmico, lo cual refuerza un escenario de condiciones más secas, mayor insolación y aceleración del retroceso glaciar. Estos resultados reflejan que la humedad absoluta, más allá de su tendencia ascendente, actúa en sinergia con otras variables climáticas para influir significativamente en los procesos de fusión y conservación del nevado Sorapata.

### Figura 31

Matriz de correlación entre las variables climáticas del Nevado Sorapata (2009–2024) - Rstudio.



La figura 31, muestra la matriz de correlaciones entre las variables climáticas del Nevado Sorapata (2009–2024) realizado en Rstudio. En donde, el análisis multianual (2009–2024) reveló patrones climáticos con posible influencia en la dinámica glaciar. Se analizaron variables meteorológicas clave: temple mínima y máxima, precipitación, relente relativo, humedad absoluta y rango térmico. La matriz de correlación mostró asociaciones notables:



- Una correlación inversa fuerte entre el temple mínima y la humedad relativa ( $r = -0.82$ ), lo que sugiere que el aumento de noches más cálidas reduce la humedad disponible para acumulación nival.
- La precipitación se correlacionó positivamente con la humedad relativa ( $r = 0.66$ ), reflejando la interacción entre eventos de lluvia y saturación atmosférica.
- El rango térmico mantuvo correlaciones moderadas tanto con el temple máxima como con la mínima, lo que puede afectar los ciclos de congelación–deshielos críticos para la ablación glaciar.

Si bien este análisis no incorpora directamente la cobertura glaciar, al integrarse con los modelos de regresión múltiple previos, permite inferir que condiciones de mayor temperatura y menor humedad contribuyen significativamente a la pérdida glaciar. Estos hallazgos refuerzan la hipótesis de que el cambio en el régimen térmico regional representa un forzante directo sobre la masa glaciar del Nevado Sorapata.

## **4.2. ANÁLISIS ESTADÍSTICO**

### **4.2.1. Precipitación acumulada**

Valores de precipitación (mm) para el periodo 2009 – 2024, en análisis de Man-Kendall indica que no hay una tendencia en la sucesión temporal para los niveles de confianza del 90 y 95%.

Tabla 7

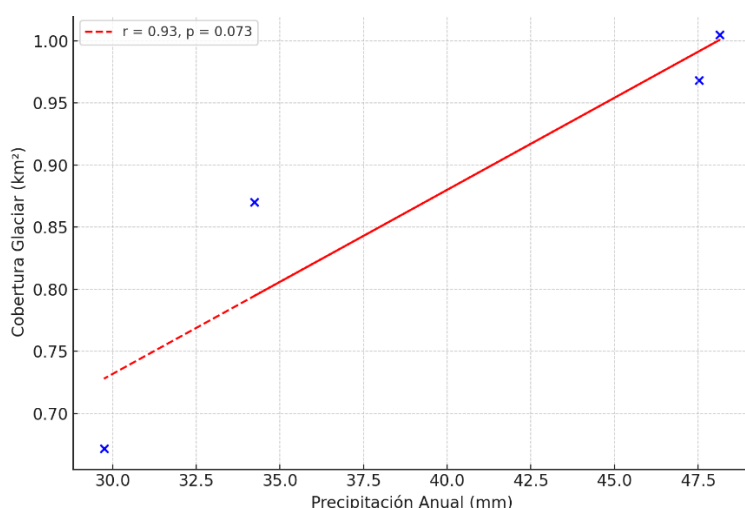
*Precipitación anual vs cobertura glaciar del nevado Sorapata (2009-2024).*

Año	Precipitación Anual (mm)	Cobertura Glaciar (km <sup>2</sup> )
2009	34.24	0.870
2014	48.14	1.005
2019	47.52	0.968
2024	29.74	0.672

❖ **Correlación estadística entre precipitación y cobertura glaciar.**

Figura 32

*Relación de precipitación anual y cobertura glaciar del nevado Sorapata.*



*Nota.* Elaboración propia – Rstudio.

El estudio estadístico mostró una correlación positiva fuerte entre la precipitación anual y la cubierta helero del Nevado Sorapata:

- **Coefficiente de correlación (r):** 0.93
- **Valor p:** 0.073 (no significativo a nivel  $\alpha = 0.05$ , pero relevante en contexto exploratorio con pocos datos).

El examen de correlación entre la precipitación anual acumulada y la cobertura glaciar del Níveo Sorapata (2009–2024) revela una relación positiva



fuerte ( $r = 0.93$ ), lo que muestra que años con mayores precipitaciones tienden a mantener o incrementar temporalmente la masa glaciar. Sin embargo, el valor  $p$  ( $p = 0.073$ ) no alcanza significancia estadística al nivel convencional ( $\alpha = 0.05$ ), probablemente debido al número reducido de observaciones ( $n = 4$ ).

El comportamiento observado sugiere que las variabilidades interanuales de la precipitación influyen en la dinámica glaciar, especialmente en forma de acumulación nival estacional. Por ejemplo, en 2014 y 2019 se observaron aumentos en la cobertura glaciar coincidiendo con picos de precipitación (48.14 mm y 47.52 mm, respectivamente). No obstante, en 2024, a pesar de una reducción significativa en las precipitaciones (29.74 mm), se evidenció una marcada pérdida glaciar (0.672 km<sup>2</sup>), lo que refuerza las influencias de otros componentes climáticos como el temple, el albedo superficial y la radiación solar.

#### 4.2.2. Temperatura media

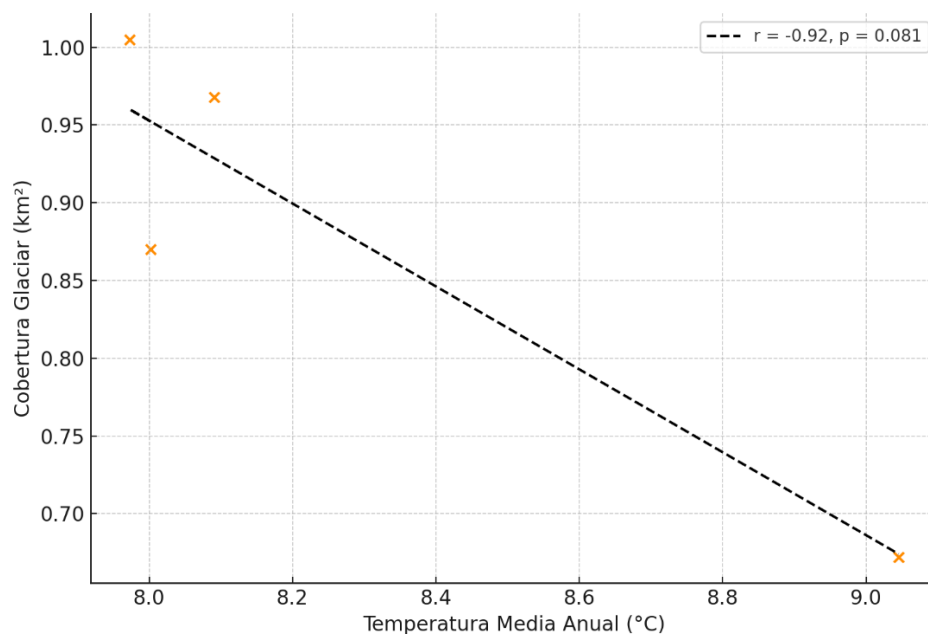
**Tabla 8**

*Temperatura anual vs cobertura glaciar del nevado Sorapata (2009-2024).*

<b>Año</b>	<b>Temperatura Media Anual (°C)</b>	<b>Cobertura Glaciar (km<sup>2</sup>)</b>
<b>2009</b>	8.00	0.870
<b>2014</b>	7.97	1.005
<b>2019</b>	8.09	0.968
<b>2024</b>	9.05	0.672

❖ **Correlación estadística entre temperatura y cobertura glaciar.****Figura 33**

*Relación entre la Temperatura media y cobertura glaciar del nevado Sorapata.*



*Nota.* Elaboración propia – Rstudio.

El análisis reveló correlaciones negativas fuerte entre el temple media anual y la cubierta helero del Nevado Sorapata:

- **Coefficiente de correlación (r):** – 0.92
- **Valor p:** 0.081 (no significativo estadísticamente, pero relevante con no reducido)

El estudio de correlación entre el temple media anual (T2M) y la cobertura glaciar del Nevado Sorapata para los años 2009, 2014, 2019 y 2024 muestra una relación inversa fuerte ( $r = -0.92$ ), lo cual indica que, a mayor temperatura, menor superficie glaciar. Aunque el valor p ( $p = 0.081$ ) no alcanza significancia estadística al nivel convencional ( $\alpha = 0.05$ ), la magnitud de la correlación sugiere una asociación climáticamente relevante. Entre 2009 y 2024, el temple media

anual se incrementó de 8.00 °C a 9.05 °C, mientras que la cobertura glaciar disminuyó de 0.870 km<sup>2</sup> a 0.672 km<sup>2</sup>.

#### ❖ Modelo de regresión múltiple

**Ecuación del modelo ajustado:**

*Cobertura glaciar (km<sup>2</sup>)*

$$=1.7923-0.1530*Temperatura (^{\circ}C)+0.0089*Precipitación (mm)$$

**Tabla 9**

*Coefficientes del modelo de regresión múltiple*

<b>Variable</b>	<b>B</b>	<b>Error estándar</b>	<b>Beta estandarizada</b>	<b>t</b>	<b>Sig. (p)</b>
<b>(Constante)</b>	1.7923	0.0660	–	27.25	0.0013
<b>Temperatura (°C)</b>	–0.1530	0.0140	–0.986	–10.94	0.0082
<b>Precipitación (mm)</b>	0.0089	0.0007	0.922	12.68	0.0063

*Nota.* Los coeficientes B representan los efectos no estandarizados de las variables independientes sobre la cobertura glaciar. El modelo es significativo en su conjunto ( $p < .05$ ). Se observa que el temple posee un efecto negativo y significativo sobre la cobertura glaciar, mientras que la precipitación muestra un efecto positivo. La multicolinealidad fue descartada, y los valores de significancia indican relaciones estadísticamente robustas considerando la muestra disponible.

La tabla 9, presenta los coeficientes del modelo de regresiones múltiples aplicado para evaluar la influencia de las variables del clima (temple y precipitación) sobre la cobertura glaciar del nevado Sorapata. El modelo incluye



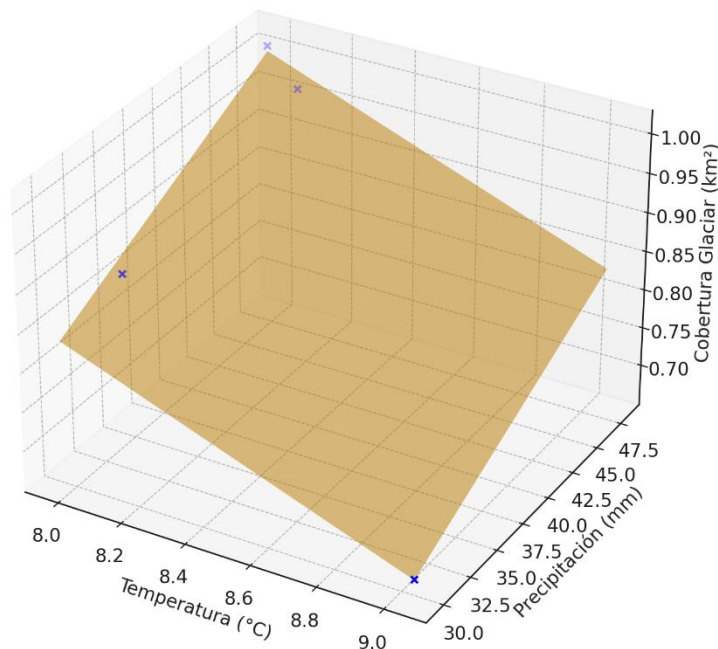
dos variables predictoras: temple medio anual ( $^{\circ}\text{C}$ ) y precipitaciones media anual (mm), mostrando sus respectivos coeficientes no estandarizados (B), errores estándar, capacidades beta estandarizados, valores t y niveles de significancia (p).

El análisis evidencia que el temple tiene un coeficiente negativo ( $\beta = -0.986$ ), estadísticamente significativo ( $p = 0.0082$ ), lo que muestra que a medida que acrecienta el temple, la cobertura glaciar disminuye, reflejando un proceso de ablación acelerada. En contraste, la precipitación muestra un coeficiente positivo ( $\beta = 0.922$ ) y asimismo significativo ( $p = 0.0063$ ), lo cual sugiere que mayores niveles de precipitación estarían asociados a una mayor conservación o recuperación parcial del glaciar.

El modelo global es estadísticamente significativo ( $p < .05$ ), lo que protege la validez de los hallazgos. Además, no se detectó multicolinealidad entre las variables predictoras, lo cual fortalece la fiabilidad del modelo. Estos hallazgos permiten concluir que el conducta de la cubierta glaciar está influenciado de forma opuesta por ambas variables climáticas, donde el aumento térmico actúa como principal forzante negativo, y la precipitación, aunque positiva, tiene menor capacidad de contrarrestar este efecto.

**Figura 34**

*Modelo de regresión múltiple de la cobertura glaciaria en relación con las variables climáticas de temperatura y precipitación.*



*Nota.* Elaboración propia – Rstudio.

El modelo indica que un acrecentamiento de 1 °C en el temple media anual somete la cobertura glaciaria en aproximadamente 0.153 km<sup>2</sup>, mientras que un aumento de 1 mm en las precipitaciones anual aumenta la cobertura glaciaria en 0.0089 km<sup>2</sup>, bajo condiciones similares. Esta dinámica refleja la alta sensibilidad de los glaciares tropicales al forzante térmico, siendo el temple el principal motor del retroceso glaciario. La bondad de ajuste del modelo ( $R^2 = 0.999$ ) es notable, aunque debe interpretarse con cautela debido al tamaño limitado de la muestra ( $n = 4$ ). Sin embargo, los patrones encontrados son coherentes con la literatura glaciológica en los Andes tropicales (Rabatel, y otros, 2013), y confirman que las variaciones climáticas explican de forma robusta la dinámica glaciaria del Nevado Sorapata.

#### 4.3. CONTRASTACIÓN DE HIPÓTESIS

La presente sección expone la contratación de la hipótesis general y las hipótesis específicas formuladas en función de los hallazgos derivados a partir del análisis multitemporal satelital, la cuantificación de pérdida glaciar y el procesamiento estadístico de las variables del clima (temple y precipitación) para el periodo 2009–2024 en el Nevado Sorapata.

##### Hipótesis general

- La dinámica glaciar del Nevado Sorapata está relacionada de manera significativa con las variables del clima de la cordillera Apolobamba, Región Puno.

**$H_0$  (Hipótesis nula):** No existe una relación significativa entre las constantes del clima (temple y precipitación) y la dinámica del glaciar del Nevado Sorapata en la Cordillera de Apolobamba.

**$H_1$  (Hipótesis alterna):** Existe una relación significativa entre las variables del clima (temple y precipitación) y la dinámica del glaciar del Nevado Sorapata en la Cordillera de Apolobamba.

Los hallazgos enseñan una relación estadística fuerte entre las variables climáticas analizadas y la dinámica del glaciar. En particular, se halló una correlación negativa elevada entre el temple media anual y la cubierta helero ( $r = -0.92$ ), y una correlación positiva alta entre la precipitación anual acumulada y dicha cubierta ( $r = 0.93$ ). Si bien el valor de significancia estadística ( $p > 0.05$ ) no admite rechazar la hipótesis nula.

Así mismo el modelo de regresión múltiple aplicando temple media anual y precipitaciones acumuladas anual como variables predictoras de la cobertura glaciar presentó un ajuste excelente ( $R^2 = 0.999$ ;  $p = 0.0369$ ). el temple tuvo un

coeficiente significativo y negativo ( $B = -0.153$ ;  $p = 0.0082$ ), mientras que la precipitación tuvo un coeficiente positivo y también significativo ( $B = 0.0089$ ;  $p = 0.0063$ ). Esto evidencia una fuerte influencia de ambas variables climáticas sobre la dinámica glaciar, validando estadísticamente la hipótesis.

### Hipótesis específicas

#### Hipótesis específica 1:

- El retroceso glaciar del Nevado Sorapata en la Macizo de Apolobamba en los últimos 15 años ha sido significativo, como se evidencia en las imágenes satelitales.

**$H_0$  (Hipótesis nula):** El retroceso glaciar del Nevado Sorapata entre 2009 y 2024 no es estadísticamente significativo, según el estudio multitemporal de imágenes satelitales.

**$H_1$  (Hipótesis alterna):** El retroceso glaciar del Nevado Sorapata entre 2009 y 2024 es estadísticamente significativo, según el estudio multitemporal de imágenes satelitales.

El estudio multitemporal realizado con retratos Landsat (2009, 2014, 2019 y 2024), procesadas mediante el índice NDSI en Google Earth Engine, evidenció una reducción neta en la cobertura glaciar de  $0.198 \text{ km}^2$ , equivalente a una pérdida del 22.84 % respecto al área registrada en 2009 ( $0.870 \text{ km}^2$ ). Mediante clasificación supervisada y análisis multitemporal (2009–2024) usando imágenes Landsat procesadas con NDSI en Google Earth Engine, se detectó una reducción neta del 22.84 % en el área helero del Nevado Sorapata. Este retroceso fue visible espacialmente mediante mapas binarizados y polígonos glaciarios multitemporales.

**Hipótesis específica 2:**

- La merma de cobertura glaciaria en el Nevado Sorapata en la Cordillera Apolobamba en los últimos 15 años ha superado el 40 %.

**$H_0$  (Hipótesis nula):** La pérdida de cobertura helada en el Nevado Sorapata entre 2009 y 2024 no ha superado el 40 % respecto a su superficie inicial.

**$H_1$  (Hipótesis alterna):** La pérdida de cobertura helada en el Nevado Sorapata entre 2009 y 2024 ha superado el 40 % respecto a su superficie inicial.

La cuantificación multitemporal indica una pérdida acumulada de 22.84 %, lo cual, aunque significativa, no supera el umbral del 40 % planteado. Este resultado puede deberse a la temporalidad estacional de algunas acumulaciones nivales-glaciares detectadas en 2014 y 2019.

**Hipótesis específica 3:**

- Existen correlaciones significativas entre el acrecentamiento del temple y la mengua de las precipitaciones con la pérdida de cobertura glaciaria del Nevado Sorapata.

**$H_0$  (Hipótesis nula):** No existen correlaciones significativas entre el aumento de la temperatura y la disminución de las precipitaciones con la pérdida de cobertura glaciaria del Nevado Sorapata.

**$H_1$  (Hipótesis alterna):** Existen correlaciones significativas entre el acrecentamiento del temple y la disminución de las precipitaciones con la pérdida de cobertura glaciaria del Nevado Sorapata.

Se identificaron correlaciones fuertes en ambas variables climáticas: una reciprocidad negativa entre temple media anual y cobertura glaciaria ( $r = -0.92$ ), y una correlación positiva entre arrebato acumulada anual y cobertura glaciaria ( $r = 0.93$ ). Si bien los valores  $p$  no alcanzaron significancia estadística ( $p = 0.081$  y  $p$



= 0.073, respectivamente), la tendencia observada respalda la hipótesis y se alinea con los mecanismos glaciológicos reconocidos para los Andes tropicales, donde el balance de masa glaciar es altamente sensible al forzante térmico y al régimen hídrico.

El modelo de regresión múltiple refuerza esta relación: ambos predictores son estadísticamente significativos ( $p < 0.01$ ) y explican conjuntamente el 99.9 % de la variabilidad glaciar. Esto demuestra que las variaciones climáticas son los principales forzantes del retroceso glaciar observado.

#### 4.4. DISCUSIONES

Los resultados obtenidos a partir del estudio multitemporal de la regresión helero mediante retratos Landsat y NDSI son coherentes con investigaciones regionales e internacionales. Rabatel et al. (2013) documentaron pérdidas superiores al 35 % en glaciares andinos tropicales desde la década de 1970, con una tendencia asociada al acrecentamiento de temple de  $0.10\text{ }^{\circ}\text{C}$  por década. En esta línea, la regresión del 22.84 % en el Sorapata se encuentra dentro del umbral de variación para glaciares de baja altitud y superficie reducida. Esta investigación valida el uso del NDSI en plataformas como Google Earth Engine para el monitoreo de cambios criosféricos, reforzando su aplicabilidad en contextos con limitada capacidad de observación in situ.

La tasa de pérdida glaciar más crítica ( $-0.296\text{ km}^2$  en el periodo 2019–2024) coincide con un acrecentamiento sostenido en el temple media y con una disminución en la humedad relativa. Estos patrones ya han sido descritos en glaciares como el Huaytapallana realizado por Barzola y Fretel (2024) y el Champará de Roja y Tordocillo (2018) donde el umbral térmico de estabilidad glaciar ha sido superado recurrentemente. El incremento estacional de la



cobertura en 2014 (15.50 %) constituye una anomalía que, lejos de contradecir la tendencia general, refuerza la necesidad de interpretar los resultados dentro de un marco multianual. La combinación de metodologías geomáticas y estadístico-inferenciales empleada permite una comprensión espacial y temporal robusta del fenómeno, con potencial para replicarse en otras cordilleras.

De manera interesante, se observó un aumento momentáneo en la cobertura glaciar en 2014 (1.005 km<sup>2</sup>), lo que representa un 15.50 % por encima de los valores de 2009. Este incremento puede estar afín a una mayor acumulación de nieve estacional o a la variabilidad climática interanual.

El área total del nevado Sorapata (2.865 km<sup>2</sup>) contextualiza la magnitud del retroceso glaciar, ya que la fracción ocupada por hielo ha disminuido significativamente en solo tres quinquenios. Estos hallazgos sugieren una vulnerabilidad creciente del nevado ante el cambio del clima, demandando estrategias de monitoreo más frecuentes y políticas de conservación basadas en evidencia.

La fuerte asociación negativa entre el temple media anual y la cobertura helero ( $r = -0.92$ ), junto con el efecto positivo de la precipitación ( $r = 0.93$ ), son consistentes con modelos de balance de masa glaciar reportados por Zen, Nussbaumer y Pellicciotti (2023) y Hoffmann, Soruco, Molg Zolitschka (2019), quienes destacan que los glaciares tropicales son extremadamente sensibles a variaciones térmicas, incluso de baja magnitud. El modelo de regresión múltiple construido no solo corrobora dicha relación, sino que aporta evidencia cuantitativa sobre el peso relativo de cada variable. Si bien el número de observaciones es limitado ( $n = 4$ ), la consistencia con estudios como el de Deza Velásquez (2024) en el Nevado Ananea y Pacompia Vilca (2022) en Rinconada



sustenta la validez del modelo y subraya la importancia de integrar análisis climáticos con teledetección satelital para comprender los procesos de deglaciación tropical



## CONCLUSIONES

**PRIMERA:** El estudio multitemporal de retratos satelitales mediante el índice NDSI permitió evidenciar una retracción sostenida de la cubierta helero del Nevado Sorapata entre los años 2009 y 2024. Este proceso alcanzó una reducción acumulada del 22.84 %, con una pérdida neta de 0.1988 km<sup>2</sup>. La caracterización espectral y espacial reveló un patrón de fragmentación progresiva y retracción hacia altitudes superiores, especialmente en vertientes de mayor exposición solar. Estos resultados confirman que la regresión helero en la región de Apolobamba responde a procesos de deglaciación tropical activa, vinculados al forzamiento climático regional, y son consistentes con la evidencia empírica documentada en los Andes peruanos y bolivianos.

**SEGUNDA:** La cuantificación de la pérdida glaciaria y la estimación de volumen, permitieron determinar tasas diferenciadas de retroceso anual, destacando el periodo 2019–2024 como el de mayor pérdida (–0.0592 km<sup>2</sup>/año). Este comportamiento pone en evidencia la aceleración no lineal del proceso de deglaciación en glaciares de pequeña dimensión, cuya masa crítica los hace altamente vulnerables a anomalías térmicas. La regresión helero del Nevado Sorapata en los últimos 15 años tiene como resultado, con una pérdida neta de 0.1988 km<sup>2</sup> en cubierta helero, lo que representa una retracción del 22.84 %. Este comportamiento es consistente con la deglaciación progresiva reportada en otras cumbres de la Cordillera de Apolobamba y los Andes centrales. La cuantificación



realizada mediante NDSI y el uso de Google Earth Engine permitió una valoración precisa, replicable y robusta del cambio espacial de las masas glaciares, confirmando el retroceso glaciar como un claro indicador del cambio del clima regional.

**TERCERA:** Se identificó una correspondencia estadísticamente significativa entre las variables del clima y la dinámica glaciar del Sorapata. el temple medio anual tuvo un efecto negativo robusto ( $B = -0.1530$ ,  $p = 0.0082$ ), mientras que la precipitación acumulada ejerció una influencia atenuante positiva ( $B = 0.0089$ ,  $p = 0.0063$ ), según el modelo de regresión múltiple ( $R^2 = 0.999$ ). Estos hallazgos evidencian que el retroceso glaciar está controlado principalmente por el calentamiento regional, validando empíricamente la hipótesis del forzamiento térmico como principal impulsor de la merma de masa helero en los Andes tropicales. Por otro lado, se realizó el análisis estadístico donde modelo final presentó un coeficiente de determinación  $R^2 = 0.999$ , indicando un ajuste casi perfecto, con una significancia global de  $p = 0.0369$ . Ambos predictores resultaron estadísticamente significativos: temperatura ( $B = -0.1530$ ,  $p = 0.0082$ ) y precipitación ( $B = 0.0089$ ,  $p = 0.0063$ ). Estos resultados permiten inferir con alta confianza que la variabilidad climática es un elemento explicativo terminante en la pérdida de masa helero del Nevado Sorapata.



## RECOMENDACIONES

**PRIMERA:** se recomienda implementar un sistema de monitoreo satelital anual del Nevado Sorapata esgrimiendo imágenes de los satélites Landsat y Sentinel, integrando tabladros como GEE y QGIS. Este sistema permitiría generar alertas tempranas sobre cambios críticos en la cobertura glaciar, facilitando así la toma de decisiones en gestiones de recursos del H2O y mitigación del cambio del clima.

**SEGUNDA:** Se recomienda efectuar un sistema de control glaciar permanente en la Cordillera de Apolobamba, articulando sensores remotos (como imágenes Landsat y Sentinel) con estaciones meteorológicas locales. Este sistema debe formar parte de una estrategia regional de gestión del H2O y ajuste al cambio del clima, considerando que la reducción glaciar compromete la disponibilidad hídrica para consumo humano, riego y conservación de ecosistemas altoandinos. Con la finalidad de fortalecer la investigación climática en la zona mediante alianzas interinstitucionales entre universidades, centros de investigación y gobiernos locales, utilizando equipos como GEE y NDSI para el análisis multitemporal y predictivo del retroceso glaciar.

**TERCERA:** Se recomienda fortalecer las estaciones meteorológicas locales y expandir la red de monitoreo climático en la Cordillera de Apolobamba, con la finalidad de optimar la condición y resolución temporal de los datos. Esta acción permitirá una mayor precisión en los modelos predictivos relacionados con la dinámica glaciar,



facilitando la comprensión de las interacciones entre las variables del clima y la cobertura de nieve y hielo.



## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Aguas Andina. (2019). *Cuencas y Glaciares andinas*. Chile: Marc Turrel.  
Obtenido de <https://sustentabilidad.aguasandinas.cl/documents/33547/34784/Libro+Digital+GLACIARES+Y+CUENCAS+ANDINAS.pdf>
- ANA. (2021). *Reserva del H2O en los glaciares del Perú. Autoridad Nacional del Agua*.
- ANA. (2023). *Inventario Nacional de Glaciares y Lagunas de Origen Glaciar del Perú. Dirección de Conservación y Planeamiento de Recursos Hídricos. Autoridad Nacional del Agua – ANA, Perú*.
- Arroyo, W., & Artica, R. (2018). *Estudio del retroceso glaciar en el Nevado Huaytapallana y su implicancia ambiental y turística*.
- Banco Mundial. (2021). *Gestión del agua en América Latina frente al cambio climático*. Washington, D.C.: Banco Mundial.
- Barzola Rivera, D., & Fretel Vadillo, N. (2024). *Comportamiento glaciar del nevado Huaytapallana y su vínculo con la variabilidad climática en el período 1993-2023*. Universidad Continental, Huancayo. Obtenido de <file:///D:/03.%20otros/DAY/1.%20TESIS/ANTECEDENTES/MODELO%20GUIA.pdf>
- Beniston, M. (2006). *El tiempo y el clima en la montaña: una visión general y un enfoque sobre el cambio climático en los Alpes*.
- Benn, D. I., & Evans, D. J. (2010). *Glaciares y glaciación (2ª ed.)*. Routledge.
- Bury, J., Mark, B. G., Carey, M., Young, K. R., & McKenzie, J. (s.f.). *Glaciares, agua y desarrollo: comprensión de los impactos del cambio climático en las comunidades de la Cordillera Blanca, Perú*. Perú.



- Callata Taype, I. (2021). *Disminución de la superficie glaciar del nevado Salluyo en la cordillera Apolobamba y su relación con los factores climáticos, durante el período 1985-2020*. Universidad César Vallejo. Obtenido de <https://repositorio.ucv.edu.pe/handle/20.500.12692/60169Accepted>
- Campos, N., & Campos, N. (2020). *Revisión de procedimientos metodológicos para la reconstrucción glaciar y el cálculo de la altitud de la línea de equilibrio*. Revista de geografía Norte Grande. Obtenido de <https://doi.org/10.4067/S0718-34022020000200321>
- Canaza Ortiz, M. (2023). *Estudio multitemporal de la superficie glaciar del Nevado Ananea (Puno, Perú) y su relación con el clima, en el periodo 1985 – 2022*. Universidad Nacional del Altiplano, Puno. Puno: ProQuest. Obtenido de <https://www.proquest.com/openview/bb4e3d7ba3763256c3b5e8ecb06422f6/1?pq-origsite=gscholar&cbl=2026366&diss=y>
- Carey, M., Huggel, C., Bury, J., Portocarrero, C., & Haeberli, W. (2014). *Derretimiento de glaciares, cambio climático y amenazas naturales: Gestión integrada de riesgos en el Perú*. Desastres geoambientales.
- Chavez Modesto, J. G., Gonzales Ramos, J. C., & Iparraguirre Ayala, J. (2023). *El impacto del cambio climático en la evolución glaciar desde la pequeña edad de hielo, en la vertiente occidental de la subcuenca Ranrahirca (Cordillera Blanca, Ancash)*. Ancash.
- Chen, Y., Zhang, G., & Yao, T. (2024). *Vinculación del retroceso de los glaciares con el cambio climático en la Meseta Tibetana*. Environmental Research Letters.



- Chevallier, P., Pouyaud, B., & Suarez, W. (2011). *Riesgos del cambio climático para el entorno natural en los Andes tropicales: glaciares y agua. Cambio Ambiental Regional*.
- Chuvienco, E. (2010). *Teledetección Ambiental*. Barcelona: Planeta S.A.
- Chuvienco, E. (2016). *Fundamentos de teledetección espacial (5.ª ed.)*. Madrid, España: Ediciones Rialp.
- Cogley, J. G. (2012). *Teledetección de glaciares*. En V. P. Singh, P. Singh y U. K. Haritashya (Eds.), *Enciclopedia de Nieve, Hielo y Glaciares* (págs. 962-967). Springer.
- Coronel, E. (2019). *Retroceso glacial del Nevado Huaytapallana usando series de tiempo*.
- Deza Velásquez, J. (2024). *Retroceso glaciar del Nevado Ananea mediante imágenes satelitales y su relación con variables climáticas, 2015–2023*. Universidad Privada San Carlos. Alicia Concytec.
- Díaz, R. D., Machaca, A. D., Belizario, G., & Lujano, E. (2023). Efectos del Cambio Climático Sobre los Ecosistemas de Montaña en la Cordillera Carabaya – Perú. *Brasileira de Meteorologi*, 38. doi:<https://doi.org/10.1590/0102-778638230088>
- Díaz, R., Sanchez, S., Lujano, E., & Lujano, A. (2017). *Análisis multi-temporal entre 1975 y 2015 sobre cambios de la cobertura glaciar en los nevados Allin Capac y Chichi Capac, Perú*. Revista de Investigaciones Altoandinas.
- Drenkhan, F., Carey, M., Huggel, C., Seidel, J., & Oré, M. T. (2019). *La dinámica del desarrollo de los lagos glaciares en la Cordillera Blanca, Perú, y sus*



*implicaciones para los recursos hídricos y la gestión de peligros.*

Hidrología y ciencias del sistema terrestre.

Dussailant, I., Escobar, M., Ayala, A., & Mernild, S. H. (2025). *Modelado físico de la evolución de los glaciares bajo el cambio climático en los Andes tropicales - Debates sobre la criosfera.*

Fernández García , P. (2000). *Geomorfología – GLACIAR 1*. Madrid: Dpto. Geodinámica. Facultad C.C. Geológicas. Obtenido de <https://docta.ucm.es/rest/api/core/bitstreams/2cc44437-90fa-44c3-9906-0fe0d833bcad/content>

Fernández García, M. (2000). *Geomorfología glaciar*. Editorial Síntesis.

Fernández García, P. (2000). *Geomorfología glaciar*. Madrid, España: Editorial Síntesis.

Fischer, M., Huss, M., & Hoelzle, M. (2014). *Cambios en la elevación de la superficie y la masa de todos los glaciares suizos, 1980-2010.*

Gupta, R. P., Haritashya, U. K., & Singh, P. (2005). Mapping dry/wet snow cover in the Indian Himalayas using IRS multispectral imagery. *Remote Sens. Environ*, 97, 458-469.

Haeberli, W., Hoelzle, M., Paul, F., & Zemp, M. (2007). *Monitoreo integrado de los glaciares de montaña como indicadores clave del cambio climático global: los Alpes europeos*. *Annals of glaciology*.

Hall, D. K. (1995). Development of methods for mapping global snow cover using Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer data. *Remote Sensing of Environmen*, 54(2), 127-140. Obtenido de [https://doi.org/10.1016/0034-4257\(95\)00137-P](https://doi.org/10.1016/0034-4257(95)00137-P)



- Hernández Sampieri, R., Fernández Collado, C., & Baptista Lucio, P. (2021). *Metodología de la investigación (7.ª ed.)*.
- Hoffmann, D. L., Soruco, A., Molg, T., & Zolitschka, B. (2019). *Interacciones glaciario-clima en los Andes tropicales: Síntesis de señales climáticas regionales a partir de registros glaciológicos. Cambio global y planetario*.
- Huang, Y. a. (2024). Revealing Decadal Glacial Changes and Lake Evolution in the Cordillera Real, Bolivia: A Semi-Automated Landsat Imagery Analysis. *Remote Sensing*, 16(7), 1231. doi:10.3390/rs16071231
- Huang, Y., & Kinouchi, T. (2024). Revealing Decadal Glacial Changes and Lake Evolution in the Cordillera Real, Bolivia: A Semi-Automated Landsat Imagery Analysis. *Remote Sensing*, 16(7), 1231. doi:https://doi.org/10.3390/rs16071231
- Huang, Y., & Kinouchi, T. (2024). Revelando cambios glaciales decenales y evolución de los lagos en la Cordillera Real, Bolivia: un análisis de imágenes Landsat semiautomático. *Remote Sensing*, 16(7), 1231. doi:https://doi.org/10.3390/rs16071231
- Hyndman, R., & Athanasopoulos, G. (2018). *Forecasting: principles and practice*. OTexts. Obtenido de <https://otexts.com/fpp3/>
- INAIGEM. (2017). *Glaciares y ecosistemas de montaña: Importancia, situación actual y perspectivas*. Instituto Nacional de Investigación en Glaciares y Ecosistemas de Montaña, Huaraz, Perú.
- INAIGEM. (2018). *Inventario Nacional de Glaciares las Cordilleras Glaciares del Perú, Instituto Nacional de Investigación en Glaciares y Ecosistemas de Montaña*. Perú.



INAIGEM. (2020). *Impacto del retroceso glaciar en los recursos hídricos del Perú*.

Ministerio del Ambiente.

INAIGEM. (2025). Retroceso glaciar en los Andes peruanos durante las últimas seis décadas. *Instituto Nacional de Investigación en Glaciares y Ecosistemas de Montaña (INAIGEM)*., 119. Obtenido de <https://repositorio.inaigem.gob.pe/items/b3326fd5-4509-45d0-9707-5dc6971c7dcc>

IPCC. (2022). *Sexto Informe de Evaluación (AR6): Cambio Climático 2022 – Impactos, Adaptación y Vulnerabilidad*. Panel Intergubernamental sobre Cambio Climático.

Kendall, M. G. (1975). Rank correlation methods (4th ed.). En C. Griffin..

Keshri, A., Shukla, A., & Gupta, R. P. (2009). ASTER ratio indices for supraglacial terrain.

Lopez Tineo, A. (2023). *mpacto de la expansión urbana y minera en la pérdida glaciar de la Cordillera Apolobamba, 1985–2022*. Pontificia Universidad Católica del Perú, Puno.

Maldonado , Y. (24 de Julio de 2020). *Geologiaweb.com*. Obtenido de GEOLOGIAWEB: [https://geologiaweb.com/planeta-tierra/glaciares/?utm\\_source=chatgpt.com#Como\\_se\\_forman\\_los\\_glaciares](https://geologiaweb.com/planeta-tierra/glaciares/?utm_source=chatgpt.com#Como_se_forman_los_glaciares)

Masiokas, M. H., Villalba, R., Luckman, B. H., Lascano, M. E., Delgado, S., & Stepanek, P. (2012). *Variaciones del manto nivoso en los Andes centrales de Argentina y Chile, 1951-2005: Influencias atmosféricas a gran escala e implicaciones para los recursos hídricos de la región*.



- Pacompia Vilca, S. (2022). *Impactos de la minería en el retroceso glaciar en La Rinconada, Cordillera Apolobamba, sur del Perú*. Tesis, Universidad Privada San Carlos, Puno, Macusani. Obtenido de [https://repositorio.upsc.edu.pe/bitstream/handle/UPSC/437/Saul\\_Edson\\_PACOMPIA\\_VILCA.pdf?sequence=3&isAllowed=y](https://repositorio.upsc.edu.pe/bitstream/handle/UPSC/437/Saul_Edson_PACOMPIA_VILCA.pdf?sequence=3&isAllowed=y)
- Peterson, L. C., Haug, G. H., Hughen, K. A., & Rohl, U. (2000). *Cambios rápidos en el ciclo hidrológico del Atlántico tropical durante la última glaciación*.
- Quintero Londoño, J. S. (2020). *Estimación del retroceso de los glaciares colombianos mediante imágenes satelitales Sentinel-2 y modelos digitales de terreno en el periodo 2016–2017*. Colombia. Obtenido de <https://ridum.umanizales.edu.co/xmlui/handle/20.500.12746/4142>
- Rabatel, A., Francou, B., Soruco, A., Gomez, J., Caceres, B., & Ceballos, J. (2013). *Situación presente de los glaciares en los Andes tropicales: una visión histórica de varios siglos acerca de la transformación glaciar y el cambio climático. La criósfera*.
- Rabatel, A., Francou, B., Soruco, A., Gomez, J., Caceres, B., Ceballos, J., & Scheel, M. (2013). *Situación presente de los glaciares en los Andes tropicales: una visión de varios siglos acerca de su evolución y la influencia del cambio climático*. The Cryosphere.
- Ribeiro, S. K., Nogueira, L. P., & Dubeux, C. B. (2018). *Cambio climático y seguridad hídrica: desafíos para la región andina*. Climate Policy.
- Rignot, E., & Kanagaratnam, P. (2011). Changes in the velocity structure of the Greenland Ice Sheet. *Science*, 311(5763), 986-990. doi:<https://doi.org/10.1126/science.1121381>



- Roe, G. H., Baker, M. B., & Herla, F. (2017). *El retroceso centenario de los glaciares como evidencia categórica del cambio climático regional*. El retroceso centenario de los glaciares como evidencia categórica del cambio climático regional.
- Rojas Acuña, J., & Tordocillo Puchuc, J. (2018). Estimación del Área de la Superficie y el Cambio de Volumen del Glaciar del Nevado Champará (Cordillera Blanca, Perú) a partir de las Imágenes y los Modelos de Elevación Digital del Sensor ASTER / Terra (2000-2010). *Revista de Glaciares y Ecosistemas de Montaña.*, 21. Obtenido de DOI 10.36580/rgem.i4.23-42
- Sharma, R. C., Tateishi, R., & Hara, K. (2016). A new water-resistant snow index for the detection and mapping of snow cover on a global scale. *Remote Sens.*, 37, 2706-2723.
- Tapia, A., & Quispe Curasco, J. (2022). *Estimación del retroceso y predicción del tiempo de permanencia del Nevado Chicón mediante el análisis multitemporal entre los años 1985-2021*. Universidad César Vallejo, Cusco. Obtenido de <https://repositorio.ucv.edu.pe/handle/20.500.12692/91586>Accepted: 2022-07-13T16:22:39Z
- Vergara, W., Deeb, A. M., Valencia, A. M., Bradley, R. S., & Zarzar, A. (2007). *Impactos económicos del rápido retroceso de los glaciares en los Andes*. Banco mundial.
- Vilca Gómez, O. &. (2020). *Estudio de peligros de origen glaciar, subcuena Huari Huari*. Instituto Nacional de Investigación en Glaciares y Ecosistemas de Montaña - INAIGEM.

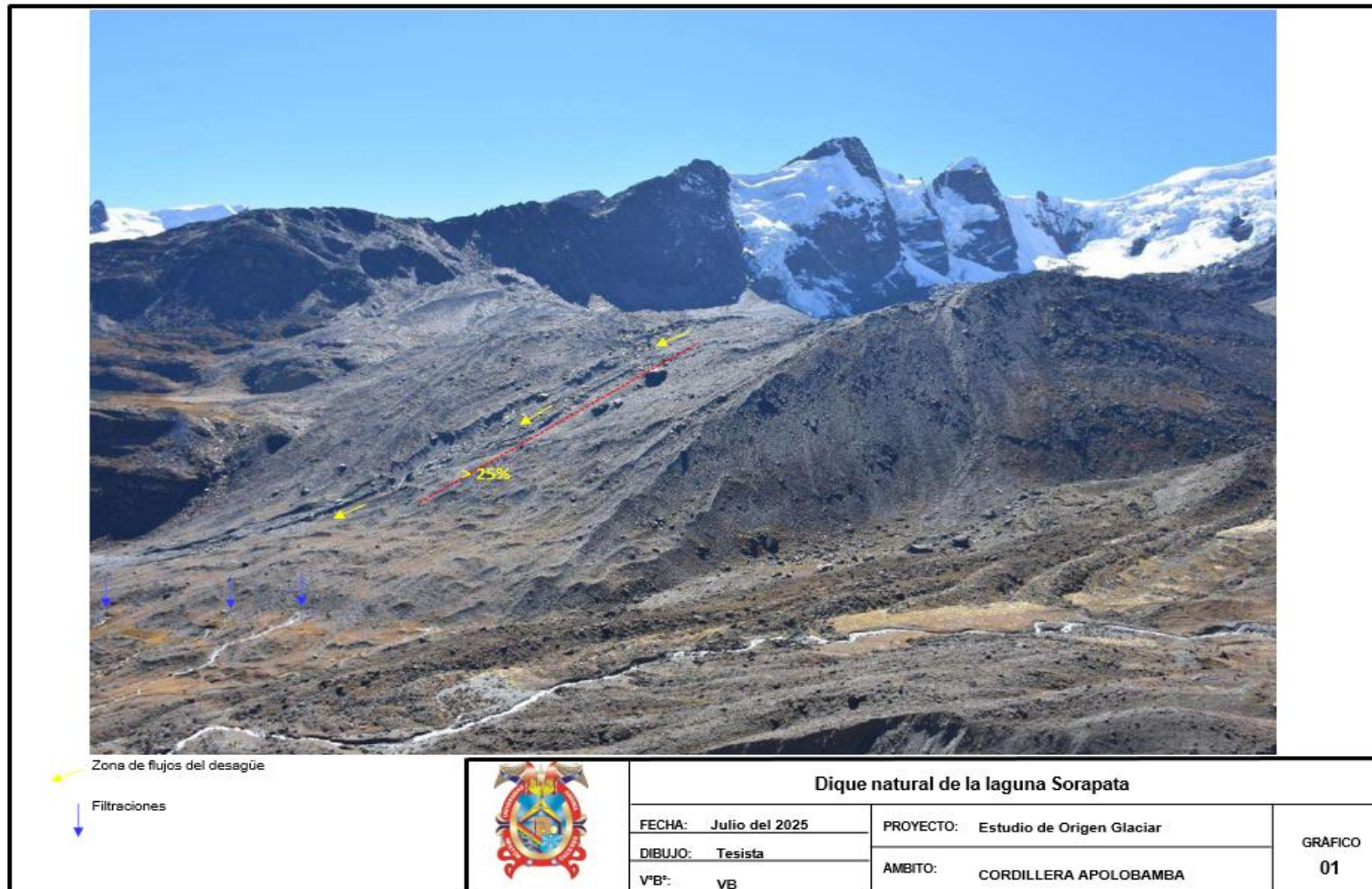


- Vilca Gómez, O., & Bustinza Urviola, V. (2020). Estudio de peligros de origen glaciar, subcuenca Huari Huari. *Instituto Nacional de Investigación en Glaciares y Ecosistemas de Montaña*.
- Vuille, M. F. (2018). Cambio climático y glaciares andinos tropicales: pasado, presente y futuro. *Earth-Science Reviews*, 89(3-4), 79-87. doi:<https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2008.03.002>
- Vuille, M., Carey, M., Huggel, C., Buytaert, W., & Rabatel, A. (2018). *Rápida disminución de la nieve y el hielo en los Andes tropicales: impactos, incertidumbres y desafíos por delante*. Reseñas de ciencias de la tierra.
- Vuille, M., Francou, B., Wagnon, P., Juen, I., Kaser, G., & Mark, B. (2008). *Cambio climático y glaciares andinos tropicales: Pasado, presente y futuro*. *Earth-Science Reviews*, 89(3-4).
- Young, K. R., León, B., Cano, A., & Josse, C. (2011). *Endemismo y cambio climático en los bosques andinos*. En S. F. P. Dubois (Ed.), *Cambio climático y biodiversidad en los Andes tropicales* (pp. 83-100). Inter-American Institute for Global Change Research.
- Yue, S., & Pilon, P. (2004). A comparison of the power of the t test, Mann–Kendall and bootstrap tests for trend detection. *Hydrological Sciences Journal*, 49(1), 21-37. doi:<https://doi.org/10.1623/hysj.49.1.21.53996>
- Zemp, M., Nussbaumer, S. U., & Pellicciotti, F. (2023). *Variabilidad climática y evolución de los glaciares en sitios seleccionados de la meseta tibetana*. *Revista de Glaciología*.



# ANEXOS

### ANEXO 1. Mapas de fotografías del glaciar del nevado Sorapata.





Mosaico fotografía



**Laguna Sorapata**

FECHA: Julio, 2025

PROYECTO: Estudio de Origen Glaciar

DIBUJO: Tesista

ÁMBITO: CORDILLERA APOLOBAMBA

VºBº: VB

GRÁFICO  
**02**



**A**



**SPT 1**



**SPT 2**



**B**

↓ Glaciares colgantes con potencial de avalancha



En línea amarilla, la zona de arranque de la avalancha ocurrida en el año 2006.



**SPT 3**



### Glaciares colgantes en el ámbito de la Laguna Sorapata

FECHA: Julio del 2025

DIBUJO: OV

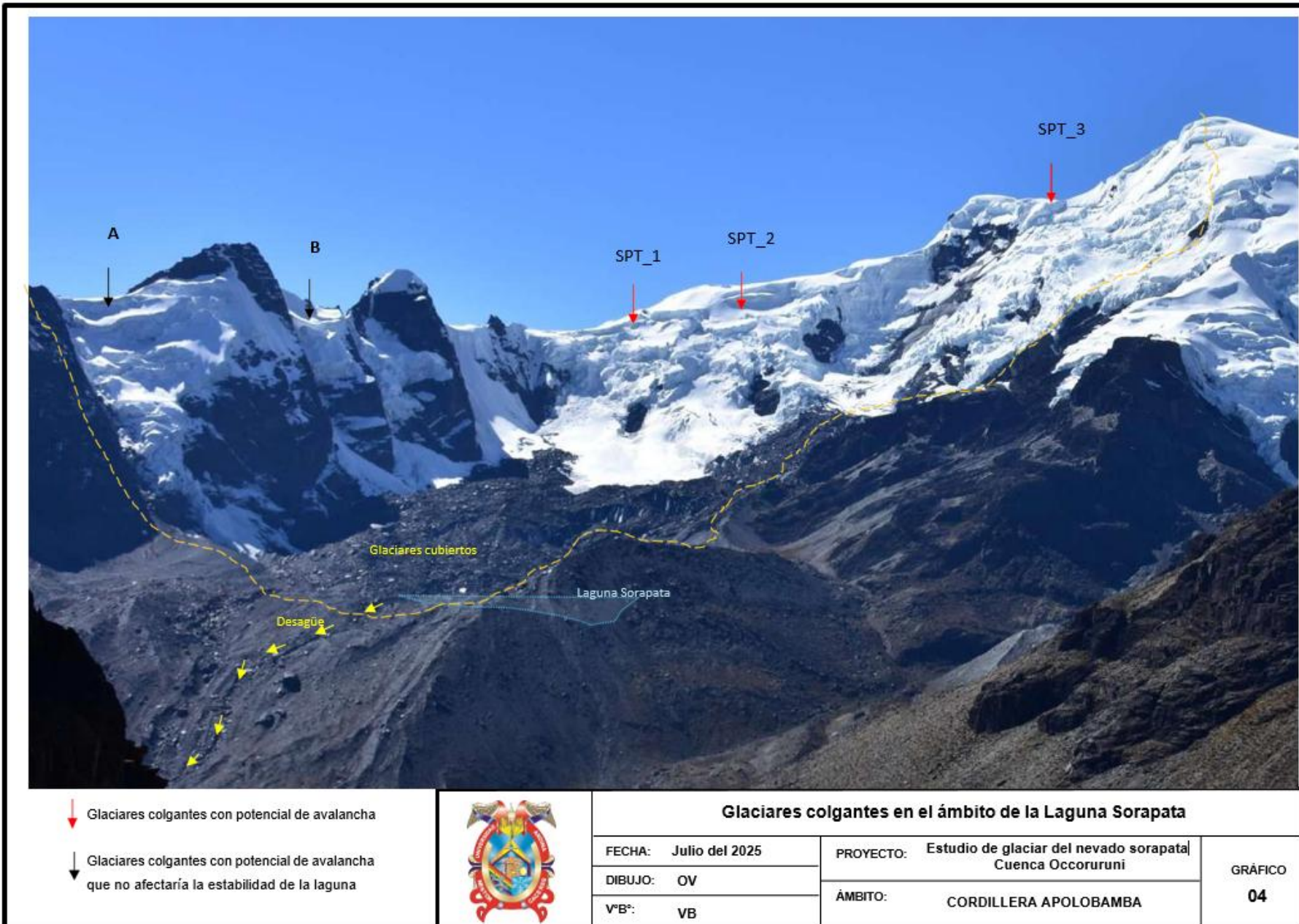
VºBº: VB

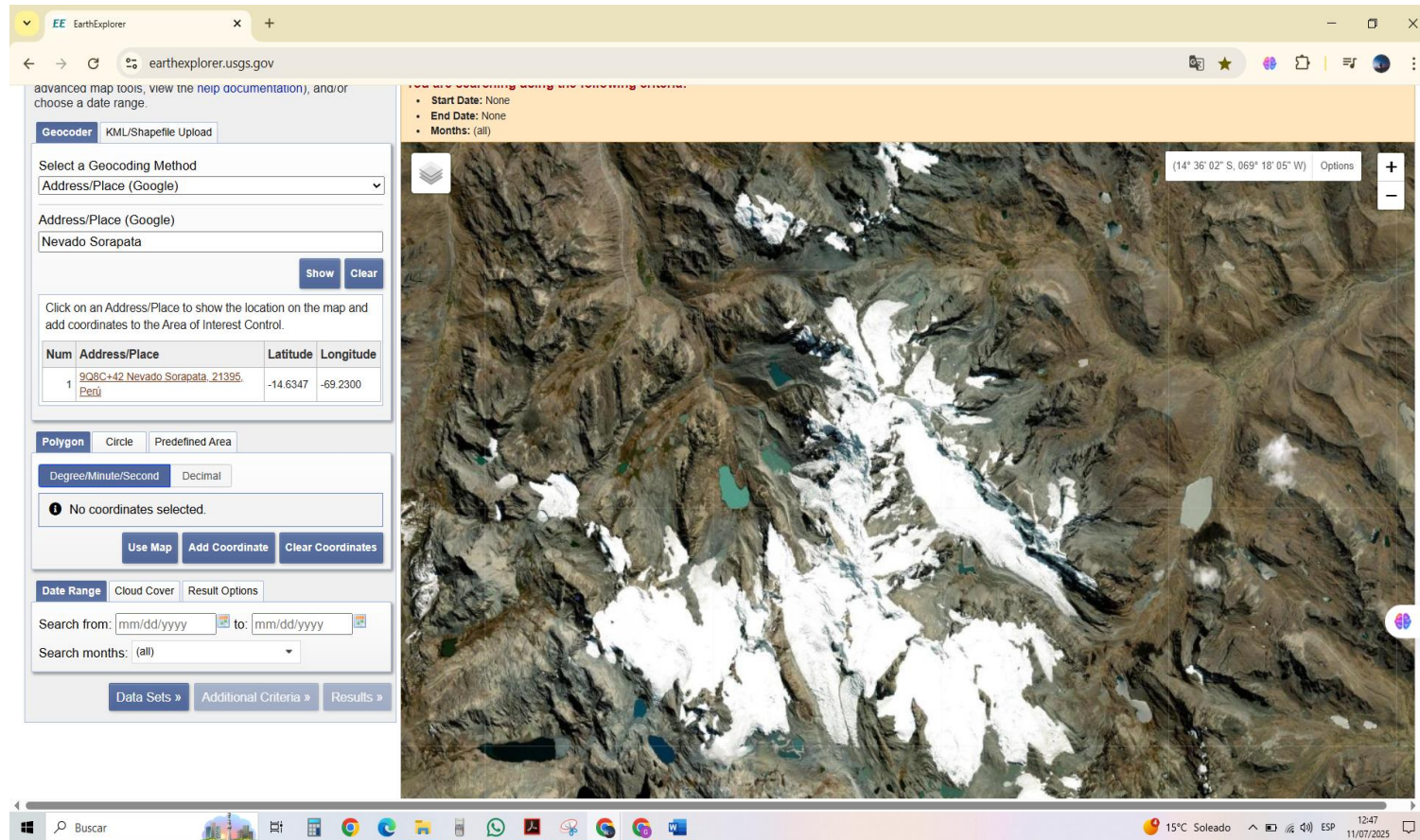
PROYECTO: Estudio de glaciares del nevado Sorapata de la Cuenca Occoruruni.

ÁMBITO: CORDILLERA APOLOBAMBA

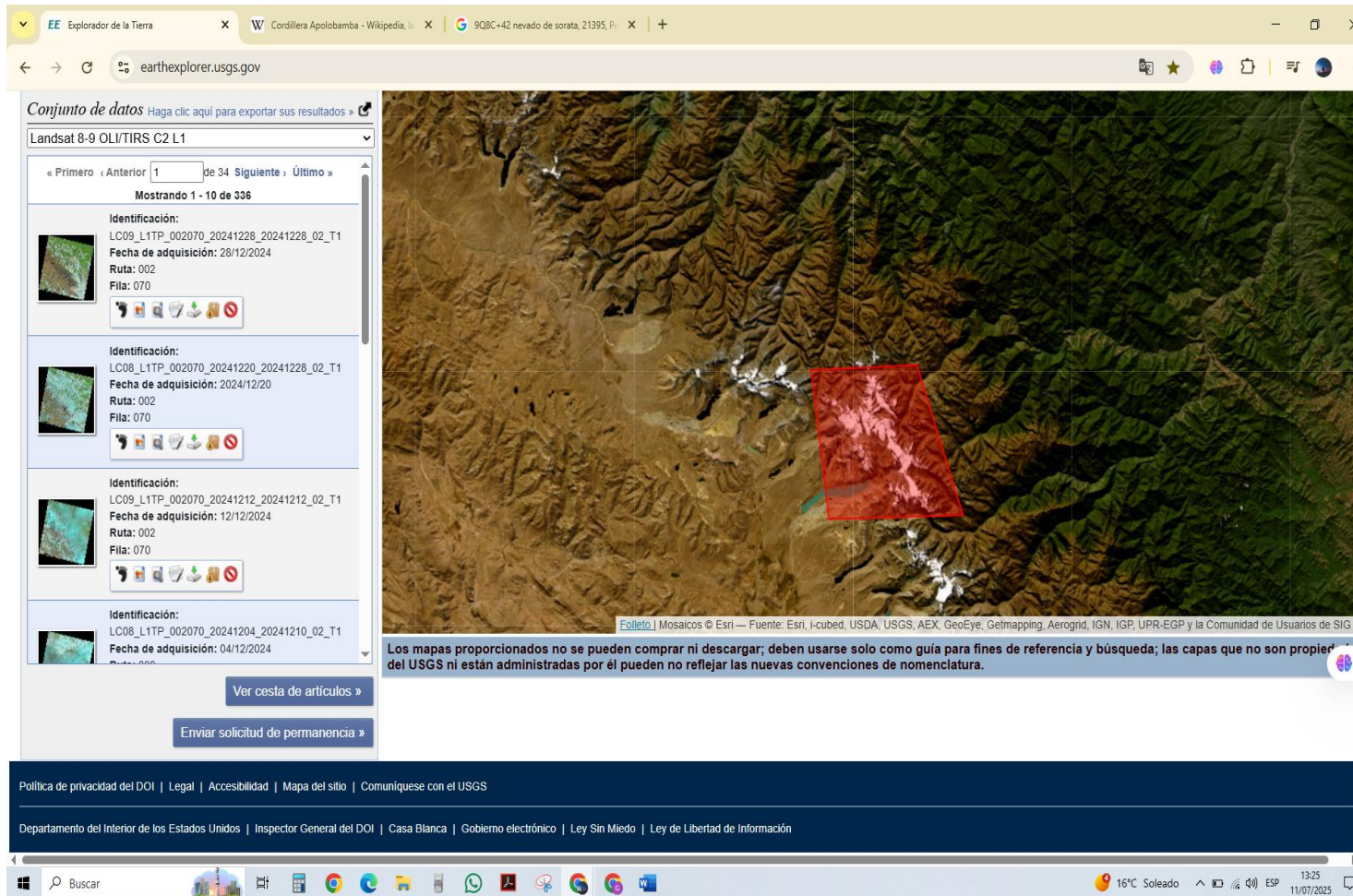
GRÁFICO

03

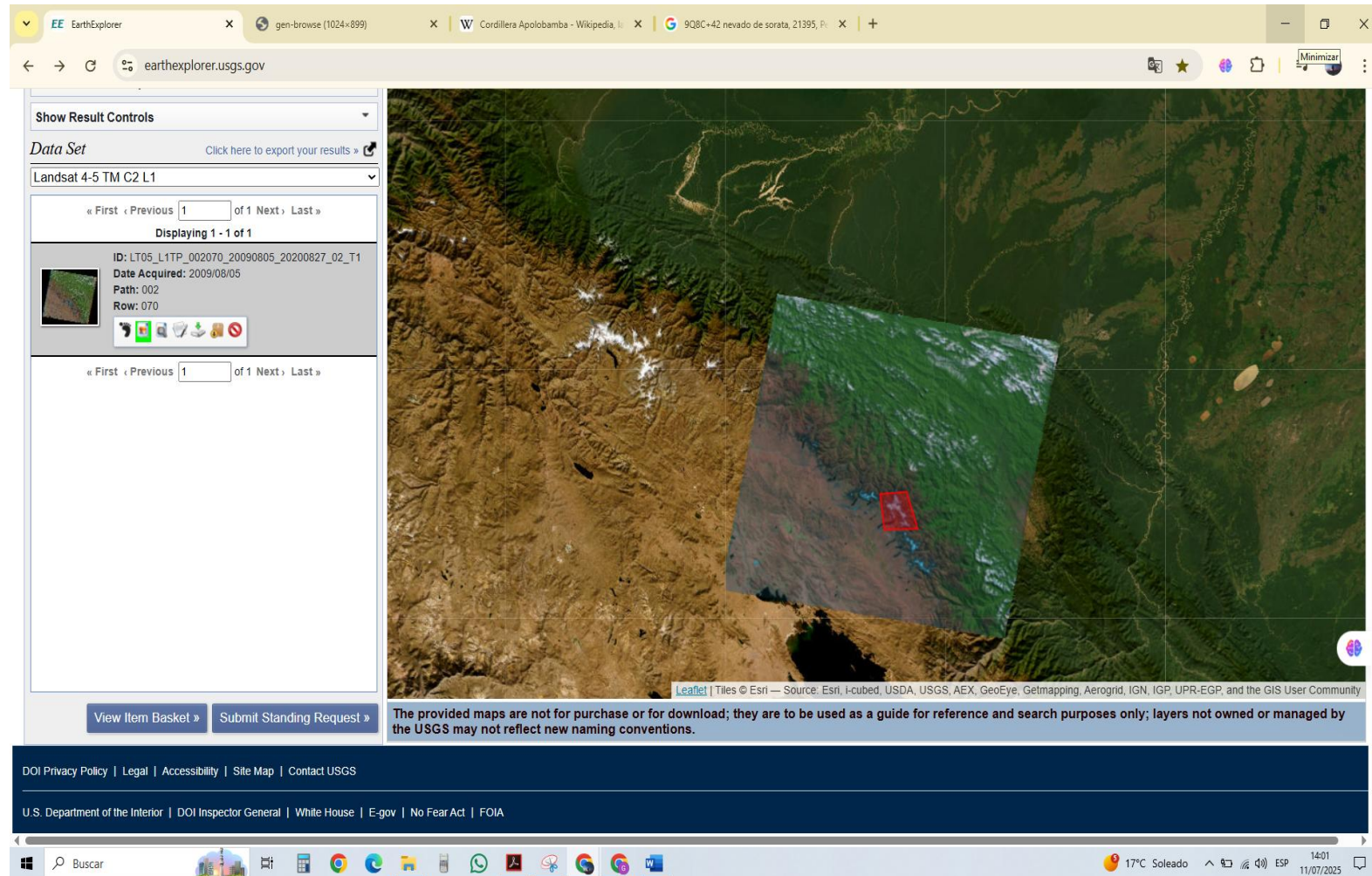




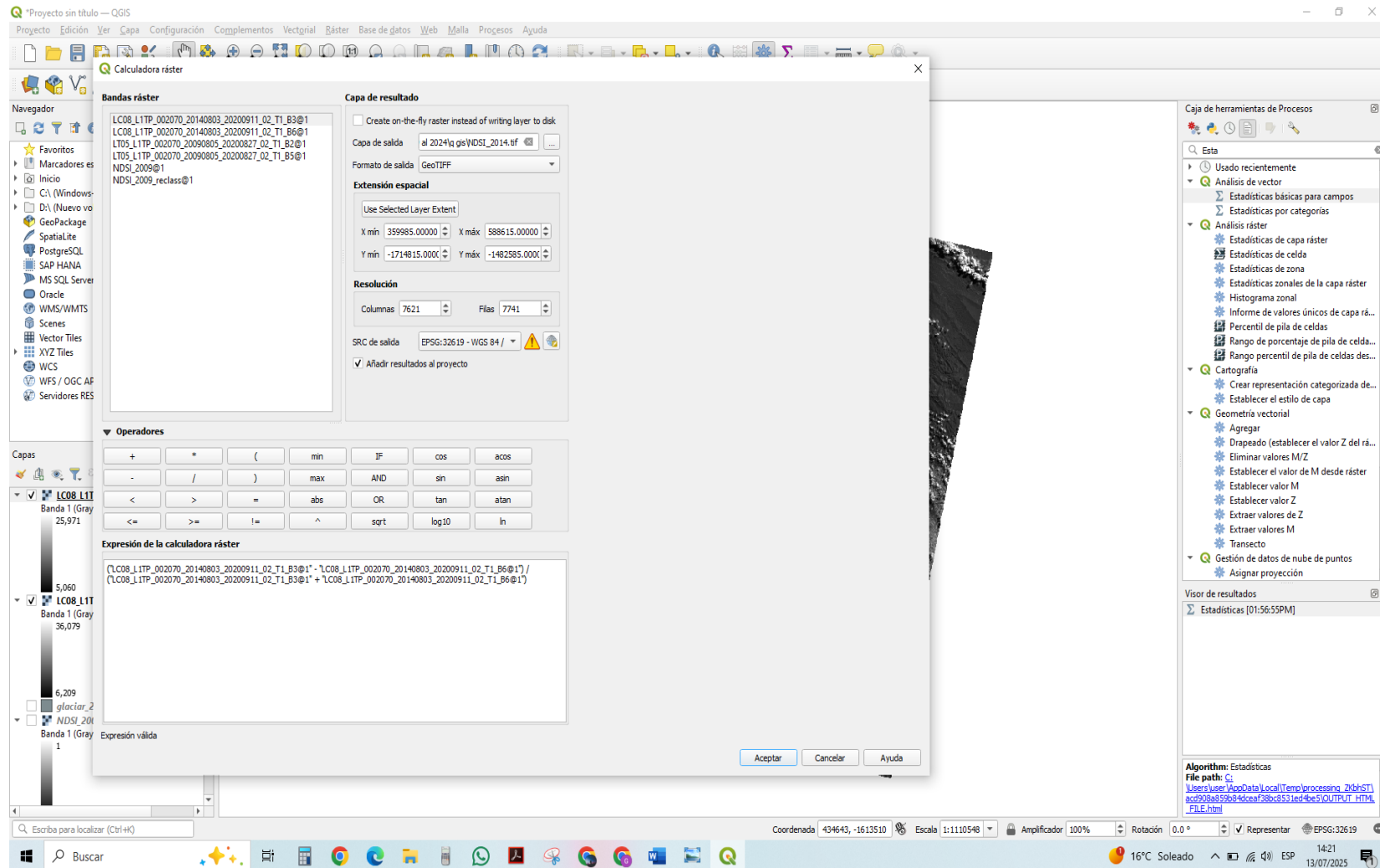
**Fotografía 1.** Nevado Sorapata descargando Landsat 5 y 8 de Earthexplorer.usgs.gov.



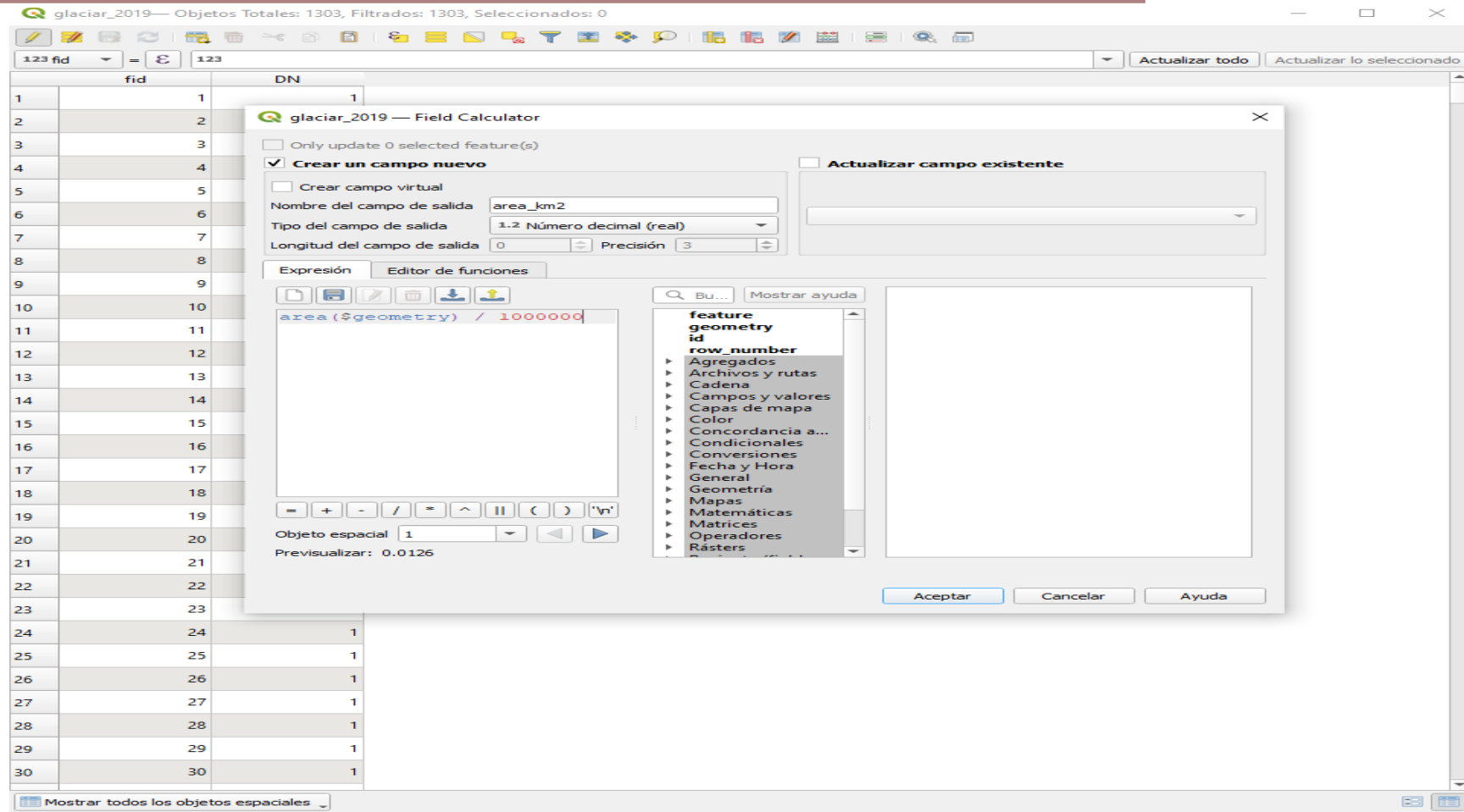
*Fotografía 2. Procesando las imágenes satelitales a través de los Landsat y las temporadas de menos nubosidad*



**Fotografía 3.** Procesando las imágenes satelitales a través de los Landsat y las temporadas de menos nubosidad



Fotografía 4. Procesamiento de las bandas en Qgis.



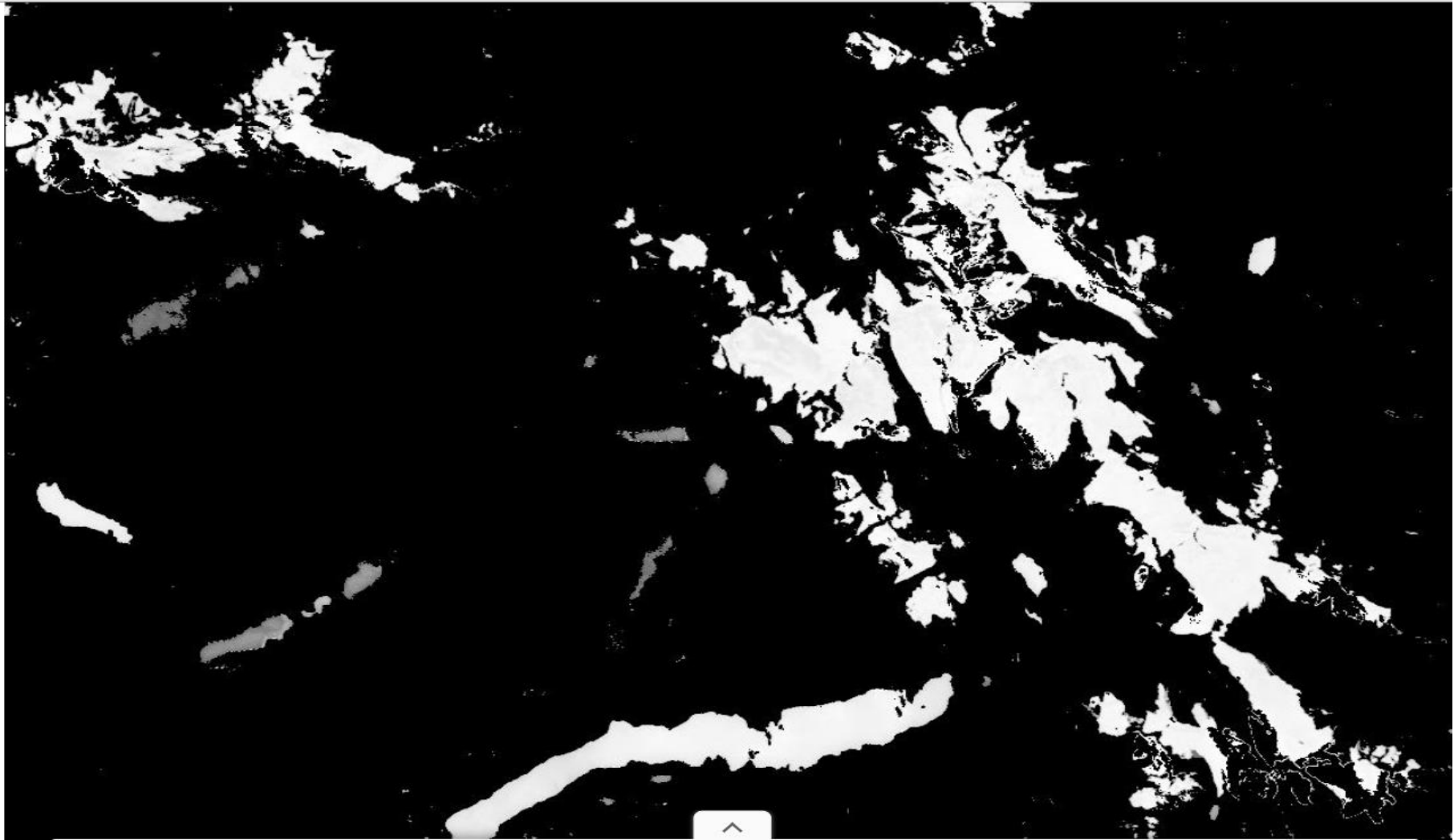
*Fotografía 5. Determinación y análisis de área del nevado Sorapata en Qgis.*



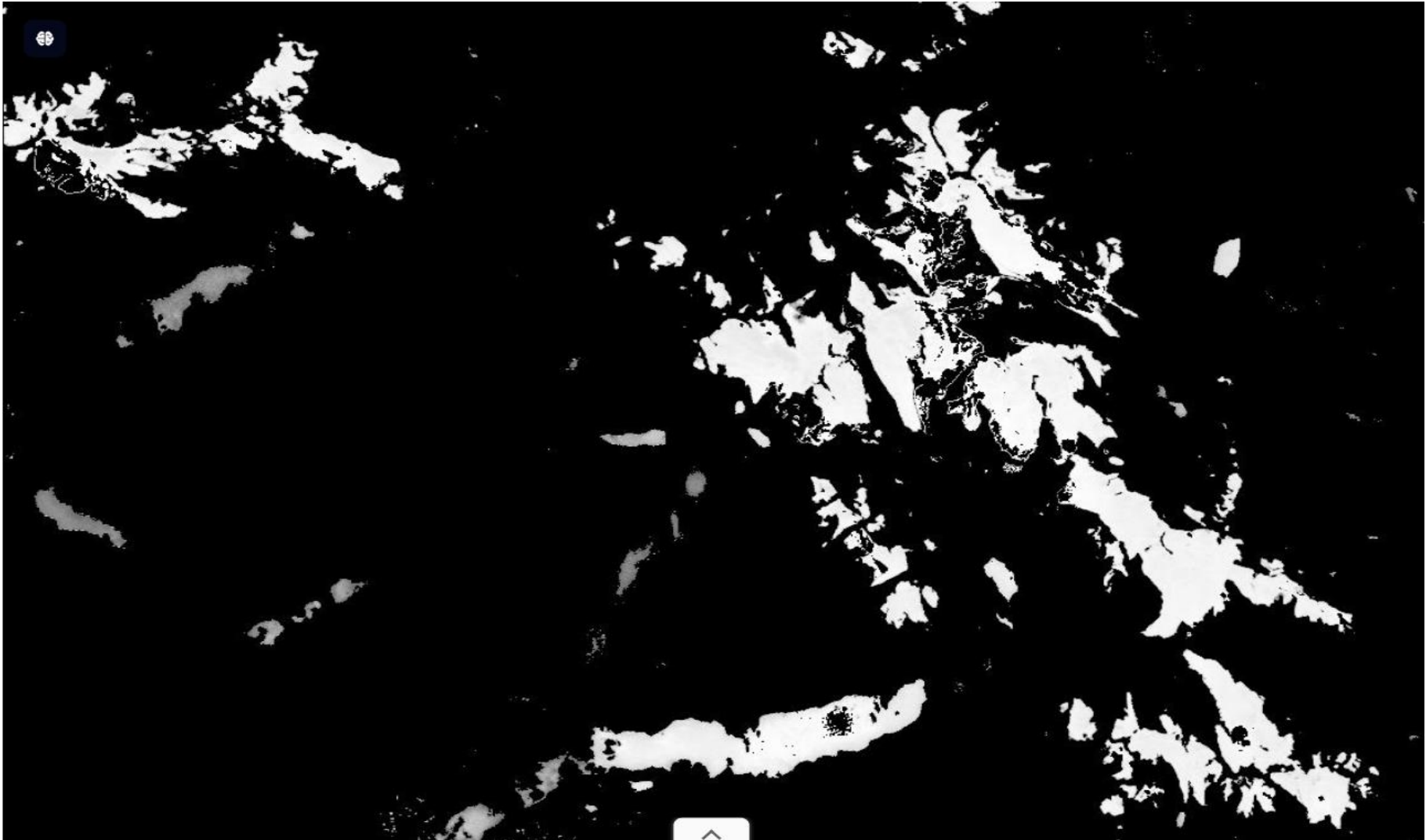
*Fotografía 6. Glaciares del nevado Sorapata del año 2009.*



*Fotografía 7. Glaciares del nevado Sorapata del año 2014.*



*Fotografía 8. Glaciares del nevado Sorapata del año 2019.*



*Fotografía 9. Glaciares del nevado Sorapata del año 2024.*

The screenshot shows the NASA POWER web application interface. At the top, there is a navigation bar with the NASA logo, the text "PODER DE LA NASA | DAV", and "versión 2.5.4". The main navigation menu includes "Access", "Engage", "Learn", "About", and "Contact". A search bar is located on the right side of the navigation bar.

The interface is divided into a left sidebar and a main content area. The sidebar contains a list of navigation options: "Punto único", "Regional", "Global", "Visualizar", "Gráficas", "Informes", "RASI", "Parámetros", "Documentación", "Tutorial", and "Colapso".

The main content area is titled "Time Extent" and "Parámetros". The "Time Extent" section has a date range selector set to "2009" to "2024". The "Parámetros" section has a search box for parameters and a "Formato" dropdown menu set to "CSV". A blue "Enviar" button is at the bottom of the sidebar.

The main content area displays a satellite image of a mountain range with a snowfield. A red dot is placed on the snowfield. The image includes a search bar at the top right with the text "Buscar dirección o lugar" and a search icon. A small box in the bottom right corner of the image shows the coordinates: "Latitud: -14.61" and "Longitud: -69.32".

At the bottom of the interface, there is a footer with several links: "Declaración de privacidad de la NASA", "Renuncia", "Accesibilidad", "Actualizado: 07/10/2025", "Funcionario de la NASA: Paul Stackhouse", and "Contacto: NASA POWER".

**Fotografía 10.** Descarga de NASA POWER de datos climáticos del nevado Sorapata del año 2009 - 2024.

## ANEXO 3. Panel fotográfico



**Fotografía 11.** Laguna Sorapata, cordillera Apolobamba.



**Fotografía 12.** Frente al nevado sorapata, en el lado izquierdo de su imponente ladera, se extiende un paisaje lleno de contrastes.

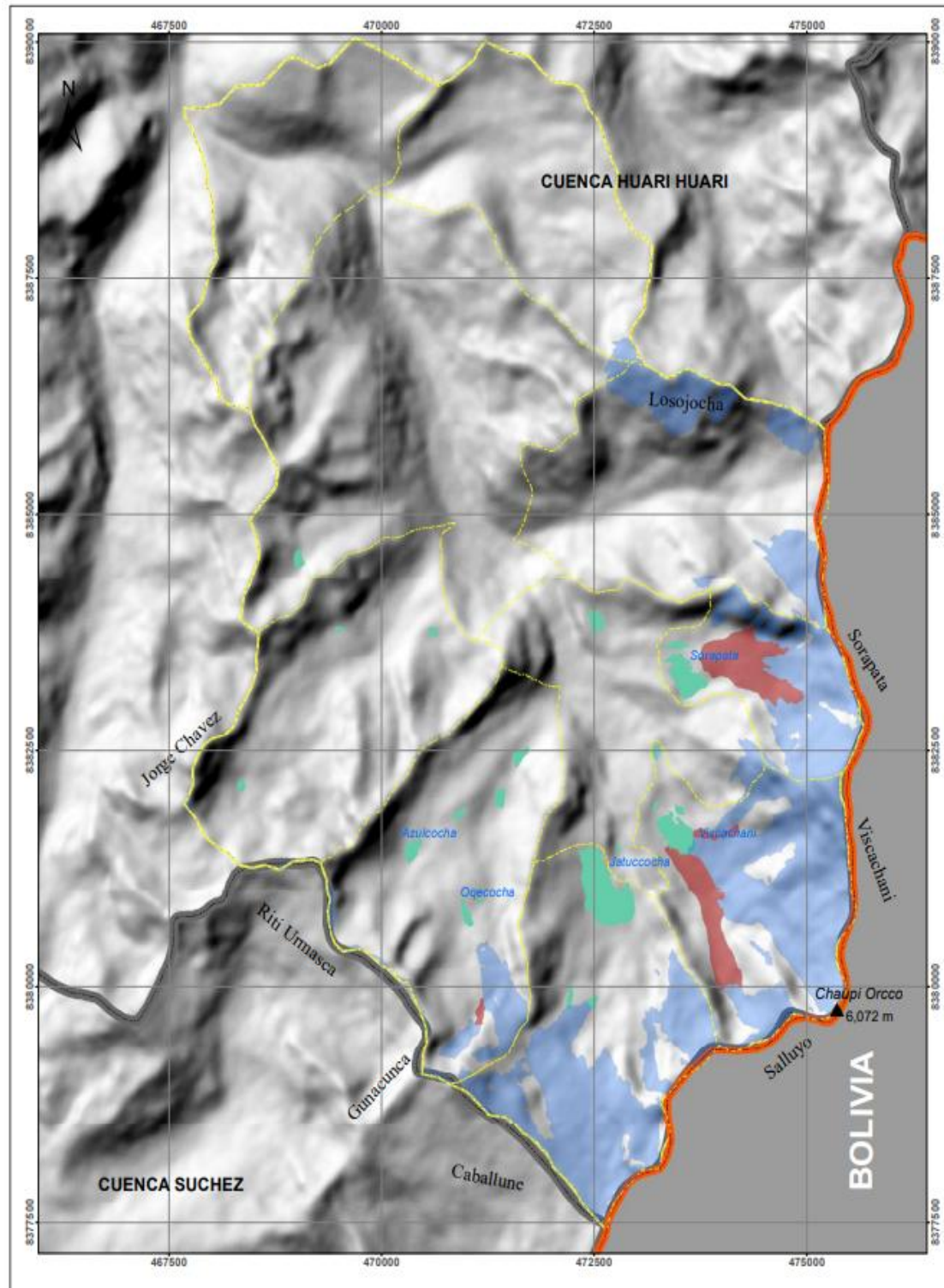


**Fotografía 13.** Acceso al centro poblado Koriwara Sina.



**Fotografía 14.** Tramo vial que une la comunidad Ccacahuaycho con el centro poblado koriwara sina.

## ANEXO 4. Mapas del área de estudio.





**ANEXO 5. DINÁMICA GLACIAR DEL NEVADO SORAPATA Y SU RELACIÓN CON VARIABLES CLIMÁTICAS EN LA CORDILLERA DE APOLOBAMBA REGIÓN PUNO 2025**

PROBLEMA GENERAL	OBJETIVO GENERAL	HIPÓTESIS GENERAL	OPERACIONALIZACIÓN DE VARIABLES	METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN
<p>¿Cuál es la dinámica glaciar del Nevado Sorapata con las variables climáticas en la Cordillera de Apolobamba, Región Puno?</p> <p><b>PROBLEMAS ESPECÍFICOS</b></p> <p>1) ¿Cómo será el retroceso glaciar del Nevado Sorapata en la Cordillera de Apolobamba durante los últimos 15 años, utilizando imágenes satelitales?</p> <p>2) ¿Cuánto será la pérdida de cobertura glaciar del Nevado Sorapata en la Cordillera de Apolobamba en los últimos 15 años?</p> <p>3) ¿Cuál es la relación entre las variables climáticas y la pérdida de cobertura glaciar del Nevado Sorapata en la Cordillera de Apolobamba?</p>	<p>Evaluar dinámica glaciar del Nevado Sorapata y su relación con variables climáticas en la Cordillera de Apolobamba, Región Puno.</p> <p><b>OBJETIVOS ESPECÍFICOS</b></p> <p>1) Analizar el retroceso glaciar del Nevado Sorapata en la Cordillera de Apolobamba, en los últimos 15 años mediante el uso de imágenes satelitales.</p> <p>2) Cuantificar la pérdida de cobertura glaciar del Nevado Sorapata en la Cordillera de Apolobamba en los últimos 15 años.</p> <p>3) Determinar la relación entre las variables climáticas y la pérdida de cobertura glaciar del nevado Sorapata en la Cordillera de Apolobamba</p>	<p>La dinámica del glaciar del Nevado Sorapata está relacionada de manera significativa con las variables climáticas de la cordillera Apolobamba, Región Puno.</p> <p><b>HIPÓTESIS ESPECÍFICA</b></p> <p>1) El retroceso glaciar del Nevado Sorapata en la cordillera de Apolobamba en los últimos 15 años ha sido significativo, como se evidencia en las imágenes satelitales.</p> <p>2) La pérdida de cobertura glaciar en el Nevado Sorapata en la cordillera Apolobamba en los últimos 15 años ha superado el 40%.</p> <p>3) Existen correlaciones significativas entre el aumento de la temperatura y la disminución de las precipitaciones con la pérdida de cobertura glaciar del Nevado Sorapata.</p>	<p><b>Variable independiente</b></p> <p>Variables Climáticas</p> <p><b>Variable dependiente</b></p> <p>Dinámica Glaciar del Nevado Sorapata.</p>	<p><b>Tipo de investigación.</b> La investigación es de tipo aplicada, ya que busca generar conocimientos útiles para la gestión de recursos hídricos, la adaptación al cambio climático y la planificación ambiental en la región andina, contribuyendo a la toma de decisiones para la protección de ecosistemas de montaña.</p> <p><b>Enfoque de la investigación</b></p> <p>El enfoque metodológico de la investigación será cuantitativo y comparativo, con un diseño no experimental, ya que se analizarán datos existentes sin intervención directa sobre las variables</p> <p><b>Diseño de la investigación</b></p> <p>De acuerdo a Hernández, Fernández y Baptista (2021) el diseño de la presente investigación es no experimental, longitudinal y correlacional. No experimental, porque no se manipulan deliberadamente las variables independientes ni se controlan las condiciones del estudio; longitudinal, porque se analiza el retroceso glaciar a lo largo de un período de 15 años</p>



### VALIDACION DE INSTRUMENTO

#### DINÁMICA GLACIAR DEL NEVADO SORAPATA Y SU RELACIÓN CON VARIABLES CLIMÁTICAS EN LA CORDILLERA DE APOLOBAMBA REGIÓN PUNO 2025

#### OPINIÓN DE EXPERTO

##### I. DATOS DEL EXPERTO

NOMBRE DEL VALIDADOR:	MIRIAN MILAGROS CHAHUARES TRUJILLANO
ESPECIALIDAD DEL VALIDADOR:	ING. SANITARIO Y AMBIENTAL
AUTOR DEL INSTRUMENTO:	ROXANA FERNANDEZ HUANACUNI

##### II. PUNTOS DE VALIDACION

DIMENSIONES	INDICADORES	DEFICIENTE	REGULAR	BUENA	MUY BUENA	EXCELENTE
		0 – 20%	21 – 40%	41 – 60%	61 – 80%	81–100%
1. CLARIDAD	Esta formulado con lenguaje apropiado					99%
2. OBJETIVIDAD	Esta expresado en base a la realidad local					99%
3. ACTUALIDAD	Adecuado al avance de la ciencia					98%
4. ORGANIZACIÓN	Existe una organización lógica					98%
5. SUFICIENCIA	Comprende los aspectos en calidad y calidad					98%
6. INTENCIONALIDAD	Adecuado para la mejora de las unidades de estudio					98%
7. CONSISTENCIA	Basado en aspectos teóricos - científicos					98%
8. COHERENCIA	Entre los índices indicadores y las dimensiones					98%
9. METODOLOGIA	La estrategia responde al propósito del diagnostico					98%

##### III. OPINION DE APLICABILIDAD:

- El instrumento cumple puntualmente con los requisitos para su aplicación.....
- El instrumento no cumple puntual mente con los requisitos para su aplicación.....

##### IV. PROMEDIO DE VALORACION:

98.22%

  
  
**MIRIAN M. CHAHUARES TRUJILLANO**  
**INGENIERO SANITARIO Y AMBIENTAL**  
**CIP: 374688**

### VALIDACION DE INSTRUMENTO

DINÁMICA GLACIAR DEL NEVADO SORAPATA Y SU RELACIÓN CON VARIABLES CLIMÁTICAS EN LA CORDILLERA DE APOLOBAMBA REGIÓN PUNO 2025

### OPINIÓN DE EXPERTO

#### I. DATOS DEL EXPERTO

NOMBRE DEL VALIDADOR:	ERIK RODRIGO QUISPE LLANOS
ESPECIALIDAD DEL VALIDADOR:	ING. SANITARIO Y AMBIENTAL
AUTOR DEL INSTRUMENTO:	ROXANA FERNANDEZ HUANACUNI

#### II. PUNTOS DE VALIDACION

DIMENSIONES	INDICADORES	DEFICIENTE	REGULAR	BUENA	MUY BUENA	EXCELENTE
		0 – 20%	21 – 40%	41 – 60%	61 – 80%	81–100%
1. CLARIDAD	Esta formulado con lenguaje apropiado					99%
2. OBJETIVIDAD	Esta expresado en base a la realidad local					99%
3. ACTUALIDAD	Adecuado al avance de la ciencia					98%
4. ORGANIZACIÓN	Existe una organización lógica					98%
5. SUFICIENCIA	Comprende los aspectos en calidad y calidad					98%
6. INTENCIONALIDAD	Adecuado para la mejora de las unidades de estudio					98%
7. CONSISTENCIA	Basado en aspectos teóricos - científicos					98%
8. COHERENCIA	Entre los índices indicadores y las dimensiones					98%
9. METODOLOGIA	La estrategia responde al propósito del diagnostico					98%

#### III. OPINION DE APLICATIBILIDAD:

- El instrumento cumple puntualmente con los requisitos para su aplicación.....
- El instrumento no cumple puntual mente con los requisitos para su aplicación.....

#### IV. PROMEDIO DE VALORACION:

89.09%

Erik Rodrigo Quispe Llanos  
ING. SANITARIO Y AMBIENTAL  
CIP N° 346089



### VALIDACION DE INSTRUMENTO

#### DINÁMICA GLACIAR DEL NEVADO SORAPATA Y SU RELACIÓN CON VARIABLES CLIMÁTICAS EN LA CORDILLERA DE APOLOBAMBA REGIÓN PUNO 2025

#### OPINIÓN DE EXPERTO

##### I. DATOS DEL EXPERTO

NOMBRE DEL VALIDADOR:	FLOR DAYSI AQUINO CANSAYA
ESPECIALIDAD DEL VALIDADOR:	ING. SANITARIO Y AMBIENTAL
AUTOR DEL INSTRUMENTO:	ROXANA FERNANDEZ HUACACUNI

##### II. PUNTOS DE VALIDACION


DIMENSIONES	INDICADORES	DEFICIENTE	REGULAR	BUENA	MUY BUENA	EXCELENTE
		0 – 20%	21 – 40%	41 – 60%	61 – 80%	81–100%
1. CLARIDAD	Esta formulado con lenguaje apropiado					99%
2. OBJETIVIDAD	Esta expresado en base a la realidad local					99%
3. ACTUALIDAD	Adecuado al avance de la ciencia					98%
4. ORGANIZACIÓN	Existe una organización lógica					98%
5. SUFICIENCIA	Comprende los aspectos en calidad y calidad					98%
6. INTENCIONALIDAD	Adecuado para la mejora de las unidades de estudio					98%
7. CONSISTENCIA	Basado en aspectos teóricos - científicos					98%
8. COHERENCIA	Entre los índices indicadores y las dimensiones					98%
9. METODOLOGIA	La estrategia responde al propósito del diagnostico					98%

##### III. OPINION DE APLICATIBILIDAD:

- El instrumento cumple puntualmente con los requisitos para su aplicación.....
- El instrumento no cumple puntual mente con los requisitos para su aplicación.....

##### IV. PROMEDIO DE VALORACION:

91.02%

  
 ING. FLOR DAYSI AQUINO CANSAYA  
 Ingeniera Sanitaria y Ambiental  
 CIP. N° 293551



ANEXO 1  
FORMULARIO DE AUTORIZACIÓN

AUTORIZACIÓN PARA LA INCORPORACIÓN DE LOS  
TRABAJOS DE INVESTIGACIÓN  
EN EL REPOSITORIO INSTITUCIONAL UANCV

Formato digital

Fecha de entrega: 13 - 10 - 2025

1. Datos del autor (es):

Nombres y Apellidos: ROXANA FERNANDEZ HUANACUNI

Dirección: COMUNIDAD MULLACAÑI

DNI/Carné de Extranjería/Pasaporte N°: 73773584

Teléfono: 931117302 email: fernandezhuanacuniroxana@gmail.com

Nombres y Apellidos: \_\_\_\_\_

Dirección: \_\_\_\_\_

DNI/Carné de Extranjería/Pasaporte N°: \_\_\_\_\_

Teléfono: \_\_\_\_\_ email: \_\_\_\_\_

Facultad y/o Escuela de Posgrado: FACULTAD DE INGENIERÍAS Y CIENCIAS PURAS

Escuela Profesional o Mención: ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA SANITARIA Y AMBIENTAL

Título o Grado Académico a optar: INGENIERO SANITARIO Y AMBIENTAL

Asesor: Ing. ADWAR RANULFO SANCHEZ CARREON

Esta obra se encuentra dentro de las siguientes denominaciones:

Trabajo de Investigación  Tesis  Trabajo de Suficiencia Profesional  Trabajo Académico

Título: DINÁMICA GLACIAR DEL NEVADO SORAPATA Y SU RELACIÓN CON VARIABLES CLIMÁTICAS EN LA CORDILLERA DE APOLOBAMBA REGIÓN PUNO 2025

Palabras claves, (3 a 5 términos): RETROCESO GLACIAR, CAMBIO CLIMÁTICO, NDSI

¿Esta obra se desarrolló en la UANCV <sup>1, 2</sup>?

1

<sup>1</sup> Indicar si su producción intelectual ha empleado recursos tales como, instalaciones, laboratorios, insumos, equipos, bases de datos, asesoría técnica por parte del personal de la UANCV, financiamiento, entre otros relacionados.

<sup>2</sup> Si su producción intelectual se desarrolló en la UANCV totalmente o parcialmente, deberá autorizar el depósito en el Repositorio de manera obligatoria.



2. Referencia de tesis:

Bachiller  Título  2da Especialidad  Maestría  Doctorado

3. Licencias:

a) Licencia estándar:

Bajo los siguientes términos, autorizo el depósito de mi tesis en el Repositorio Digital de la UANCV.

Con la autorización de depósito de mi producción Intelectual, otorgo a la Universidad Andina "Néstor Cáceres Velásquez" una licencia no exclusiva para reproducir, distribuir, comunicar al público, transformar (únicamente mediante su traducción a otros idiomas) y poner a disposición del público mi producción intelectual (incluido el resumen), en formato físico o digital, en cualquier medio, conocido o por conocerse, a través de los diversos servicios por la Universidad, creados o por crearse, tales como el Repositorio Digital de tesis UANCV, colección de producción intelectual, entre otros, en el Perú y en el extranjero por el tiempo y veces que considere necesarias, y libres de remuneraciones.

En virtud de dicha licencia, la Universidad Andina "Néstor Cáceres Velásquez" podrá reproducir mi producción intelectual en cualquier tipo de soporte y en más de un ejemplar, sin modificar su contenido, solo con propósitos de seguridad, respaldo y preservación.

Declaro que la producción intelectual es una creación de mi autoría y exclusiva titularidad, coautoría con titularidad compartida, y me encuentro facultado a conceder la presente licencia y, asimismo, garantizo que dicha producción intelectual no infringe derechos de autor de terceras personas.

La Universidad Andina "Néstor Cáceres Velásquez" consignará el nombre del y/o los autor(es) de la producción intelectual, y no le hará ninguna modificación más que la permitida en la licencia.

Autorizo su publicación (marque con una X)

Sí, autorizo que se deposite inmediatamente.  
 Sí, autorizo que se deposite a partir de la fecha (d/m/a): \_\_\_\_\_  
 No autorizo.

b) Licencia CREATIVE COMMONS 4.0 INTERNACIONAL:

Si usted concede una licencia CREATIVE COMMONS sobre su producción intelectual, mantiene la titularidad de los derechos de autor de esta y, a la vez, permite que otras personas puedan reproducirla, comunicarla al público y distribuir ejemplares de esta, bajo las condiciones siguientes:

¿Quiere permitir usos comerciales de su producción intelectual?

Sí: significa que usted permite la reproducción, distribución y comunicación pública de la producción intelectual incluso con fines comerciales.

No: significa que usted permite la reproducción, y comunicación pública de la producción intelectual, pero sin fines comerciales.

Sí autorizo  
 No autorizo



**Jurisdicción de su Licencia**

Todas las licencias CREATIVE COMMONS son de ámbito mundial, sin embargo, usted puede elegir entre la opción "internacional" o una adaptada a su jurisdicción, como para el caso peruano.

La opción "internacional" emplea el lenguaje y la terminología de los tratados internacionales; en cambio, la adaptada a su jurisdicción, recoge las particularidades de la legislación peruana.

En consecuencia, **la opción "internacional" goza de una mayor eficacia a nivel mundial, gracias a que tiene jurisdicción neutral.** Mientras que la opción adaptada a la jurisdicción del Perú goza de una mayor eficacia ante los tribunales peruanos.

Internacional

Nacional

Línea de investigación: CONTAMINACION Y CALIDAD AMBIENTAL - P22

Firma de Autor



huella digital

13 - 10 - 2025

Fecha