



**UNIVERSIDAD ANDINA**

**NÉSTOR CÁCERES VELÁSQUEZ**

**FACULTAD DE INGENIERÍAS Y CIENCIAS PURAS**

**ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA SANITARIA Y AMBIENTAL**



**ANÁLISIS MULTITEMPORAL DE LA MASA GLACIAR  
UTILIZANDO IMÁGENES SATELITALES DE  
LA CORDILLERA LA RAYA EN EL  
PERIODO 2000 - 2021**

**TESIS PRESENTADA POR:**

**Bach. KARIN LORENA MAMANI CUENTAS**

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

**JULIACA – PERÚ**

**2024**



**UNIVERSIDAD ANDINA**

**NÉSTOR CÁCERES VELÁSQUEZ**

**FACULTAD DE INGENIERÍAS Y CIENCIAS PURAS**

**ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA SANITARIA Y AMBIENTAL**


**ANÁLISIS MULTITEMPORAL DE LA MASA GLACIAR  
UTILIZANDO IMÁGENES SATELITALES DE LA  
CORDILLERA LA RAYA EN EL  
PERIODO 2000 - 2021**


**TESIS PRESENTADA POR:**


**Bach. KARIN LORENA MAMANI CUENTAS**


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

**APROBADA POR EL JURADO REVISOR:**

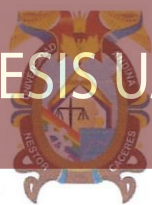
**PRESIDENTE** :   
Dr. OSCAR VICENTE VIAMONTE CALLA

**PRIMER MIEMBRO** :   
Dr. EFRAÍN PARILLO SOSA

**SEGUNDO MIEMBRO** :   
Mgtr. FRITZ WILLY MAMANI APAZA

**ASESOR DE TESIS** :   
Mgtr. FRANZ JOSEPH BARAHONA PERALES

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



**RESOLUCIÓN DECANAL N° 562-2024-D-FICP-UANCV**

Juliaca, 19 de diciembre de 2024

**VISTOS:**

El OFICIO N° 104-2024-D/EPISA/FICP-UANCV del Director de la Escuela Profesional de **Ingeniería Sanitaria y Ambiental** de la Facultad de Ingenierías y Ciencias Puras y Resolución Decanal N°514-2024 de fecha 26 de noviembre de 2024 sobre la aprobación del Informe Final del trabajo de Investigación (tesis) titulado: **ANÁLISIS MULTITEMPORAL DE LA MASA GLACIAR UTILIZANDO IMÁGENES SATELITALES DE LA CORDILLERA LA RAYA EN EL PERIODO 2000 - 2021**; y el trámite solicitado por el Bachiller en **Ingeniería Sanitaria y Ambiental** y;

**CONSIDERANDO:**

Que, el Bachiller: **KARIN LORENA MAMANI CUENTAS**; ha solicitado fecha y hora para efectuar la sustentación del Informe Final del Trabajo de Investigación (tesis) titulado: **ANÁLISIS MULTITEMPORAL DE LA MASA GLACIAR UTILIZANDO IMÁGENES SATELITALES DE LA CORDILLERA LA RAYA EN EL PERIODO 2000 - 2021**, para rendir el examen de sustentación del trabajo de Investigación (tesis) y optar el Título Profesional de **Ingeniero Sanitario y Ambiental**, y;

Que, los Jurados designados por el Director y el Responsable del Comité de Investigación de la Escuela Profesional de Ingeniería Sanitaria y Ambiental, de la FICP, están integrados por los siguientes Docentes;

- \* **Presidente** : **Dr. OSCAR VICENTE VIAMONTE CALLA**
- \* **1er Miembro** : **Dr. EFRAIN PARILLO SOSA**
- \* **2do Miembro** : **Mgtr. FRITZ WILLY MAMANI APAZA**
- \* **Asesor** : **Mgtr. FRANZ JOSEPH BARAHONA PERALES**

De conformidad al Reglamento de aseguramiento de calidad de trabajos de investigación, con fines de obtención de grados académicos y títulos profesionales de la Facultad de Ingenierías y Ciencias Puras 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 de la Facultad de Ingenierías y Ciencias Puras.

**RESUELVE:**

**ARTICULO PRIMERO.** - **APROBAR** Lugar, Día y Hora para que el (la) bachiller: **KARIN LORENA MAMANI CUENTAS**; rendirá el Examen de Sustentación del Informe Final del Trabajo de Investigación (tesis) titulado **ANÁLISIS MULTITEMPORAL DE LA MASA GLACIAR UTILIZANDO IMÁGENES SATELITALES DE LA CORDILLERA LA RAYA EN EL PERIODO 2000 - 2021**, para optar el Título Profesional de **Ingeniero Sanitario y Ambiental** de acuerdo al siguiente detalle:

- \* **FECHA** : jueves 26 de diciembre de 2024
- \* **HORA** : 14:00 horas
- \* **LUGAR** : Aula 306 - pabellón de hidráulica

**ARTICULO SEGUNDO.** - La Unidad de Investigación de la Facultad de Ingenierías y Ciencias Puras, el Director y el responsable del comité de investigación de la Escuela Profesional de **Ingeniería Sanitaria y Ambiental**, quedan encargados del cumplimiento de la presente Resolución.

Regístrese, Comuníquese, Archívese.

C.c.  
Arch. 2024  
Interesado  
Escuela Profesional



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

Dr. MILTHON QUISPE HUANCA  
DECANO  
CIP. 47790



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

Dr. EFRAIN PARILLO SOSA  
SECRETARIO ACADÉMICO  
CIP. 95531



**RESOLUCIÓN DECANAL N° 514-2024-D-FICP-UANCV**

Juliaca, 26 de noviembre de 2024

**VISTOS:**

El **INFORME N° 179-2024-D-EPIC-FICP-UANCV-J**, del Director Unidad de Investigación de la Facultad de Ingenierías y Ciencias, **INFORME N° 0328-2024-UI-CI-EPISA-FICP-UANCV** del Presidente del Sub Comité de Evaluación de la Escuela Profesional de Ingeniería Sanitaria y Ambiental, **RESOLUCIÓN DECANAL N° 850-2023-D-FICP-UANCV** que aprueba el Proyecto de Investigación el **29 de agosto de 2023** y el acta de revisión y calificación del Trabajo de Investigación (tesis) de fecha **10 de octubre de 2024** para optar el Título Profesional de Ingeniero Sanitario y Ambiental, con el tema titulado: **ANÁLISIS MULTITEMPORAL DE LA MASA GLACIAR UTILIZANDO IMÁGENES SATELITALES DE LA CORDILLERA LA RAYA EN EL PERIODO 2000 - 2021.**

**CONSIDERANDO:**

Que, el (la) Bachiller: **KARIN LORENA MAMANI CUENTAS**, ha presentado su Trabajo de Investigación (tesis) Titulado: **ANÁLISIS MULTITEMPORAL DE LA MASA GLACIAR UTILIZANDO IMÁGENES SATELITALES DE LA CORDILLERA LA RAYA EN EL PERIODO 2000 - 2021.**

Que, habiendo procedido de acuerdo al Reglamento de Aseguramiento de la Calidad de Trabajo de Investigación, con fines de la obtención de Grados Académicos de la Facultad de Ingenierías y Ciencias Puras, el Director y el Responsable del Comité de Investigación de la Escuela Profesional de Ingeniería Sanitaria y Ambiental, nominó a la sub comisión de evaluación de trabajo de investigación, a los siguientes Docentes:

- \* **Presidente** : **Dr. OSCAR VICENTE VIAMONTE CALLA**
- \* **1er Miembro** : **Dr. EFRAIN PARILLO SOSA**
- \* **2do Miembro** : **Mgtr. FRITZ WILLY MAMANI APAZA**

Que, el Sub Comité de evaluación ha aprobado en su integridad el Trabajo de Investigación (tesis) titulado: **ANÁLISIS MULTITEMPORAL DE LA MASA GLACIAR UTILIZANDO IMÁGENES SATELITALES DE LA CORDILLERA LA RAYA EN EL PERIODO 2000 - 2021.**

Que, la Oficina de Investigación ha aprobado con el Dictamen N° 850-2023, la originalidad del trabajo de investigación (tesis) titulado: **ANÁLISIS MULTITEMPORAL DE LA MASA GLACIAR UTILIZANDO IMÁGENES SATELITALES DE LA CORDILLERA LA RAYA EN EL PERIODO 2000 - 2021.**

Estando, conforme a la **RESOLUCIÓN DECANAL N°064-2019-CF-FICP-UANCV** de fecha 02 de octubre de 2019 donde aprueba el reglamento de aseguramiento de calidad de trabajos de investigación, con fines de obtención de grados académicos y títulos profesionales a la Facultad de Ingenierías y Ciencias Puras, que consta de XI capítulos y 71 artículos, y;

**Estando**, en la opinión favorable del Director de la Unidad de Investigación y en concordancia al Reglamento de Aseguramiento de la Calidad de Trabajos de Investigación, con fines de obtención de Grados Académicos y Títulos Profesionales de la Facultad de Ingenierías y Ciencias Puras, 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 de la Facultad de Ingenierías y Ciencias Puras.

**RESUELVE:**

**ARTICULO PRIMERO.- APROBAR**, el informe final de **TRABAJO DE INVESTIGACIÓN (Tesis)**, del Bachiller: **KARIN LORENA MAMANI CUENTAS**, para optar el Título Profesional de Ingeniero Sanitario y Ambiental, con el Tema Titulado: **ANÁLISIS MULTITEMPORAL DE LA MASA GLACIAR UTILIZANDO IMÁGENES SATELITALES DE LA CORDILLERA LA RAYA EN EL PERIODO 2000 - 2021.**

La misma que deberá proceder a la impresión de su borrador de Trabajo de Investigación en limpio, de acuerdo a lo establecido en el Reglamento de Aseguramiento de la Calidad de Trabajos de Investigación, con fines de obtención de Grados Académicos y Títulos Profesionales de la Facultad de Ingenierías y Ciencias Puras - Escuela Profesional de Ingeniería Sanitaria y Ambiental.

**ARTICULO SEGUNDO.- RECONOCER**, como asesor del Trabajo de Investigación (tesis) al docente ordinario de la Escuela Profesional de Ingeniería Sanitaria y Ambiental, de la Facultad de Ingenierías y Ciencias Puras, al **Mgtr. FRANZ JOSEPH BARAHONA PERALES.**

**ARTICULO TERCERO.-** La Unidad de Investigación de la Facultad de Ingenierías y Ciencias Puras, el Director y el responsable del comité de investigación de la Escuela Profesional de Ingeniería Sanitaria y Ambiental, quedan encargados del cumplimiento de la presente Resolución.

Regístrese, Comuníquese, Archívese,

C.c.  
archivo 2024  
interesado (a)



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

Dr. MILTHON QUISPE HUANCA  
DECANO  
CIP. 47790



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

Dr. EFRAIN PARILLO SOSA  
SECRETARIO ACADEMICO  
CIP. 95531



**RESOLUCIÓN DECANAL N° 850-2023-D-FICP-UANCV**

Juliaca, 29 de agosto 2023

**VISTOS:**

El, **INFORME N° 473-2023-D-UI-FICP-UANCV** del Director de la Unidad de Investigación de la Facultad de Ingenierías y Ciencias Puras, **INFORME DE OPINIÓN TÉCNICA N° 036-2023-UI-CI-EPISA-FICP-UANCV** del responsable del Comité de Investigación, la **opinión técnica N° 021-2023-UANCV-FICP-UI-CI** del presidente del sub comité de la Escuela Profesional de **Ingeniería Sanitaria y Ambiental** y el **ACTA DE REGISTRO DE PROYECTO DE INVESTIGACIÓN** según reglamento interno de aseguramiento de la calidad de trabajos de investigación de fecha **22 de agosto de 2023**, para optar el Título Profesional de Ingeniero Sanitario y Ambiental, con el tema titulado: **ANÁLISIS MULTITEMPORAL DE LA MASA GLACIAR UTILIZANDO IMÁGENES SATELITALES DE LA CORDILLERA LA RAYA EN EL PERIODO 2000 - 2021.**

**CONSIDERANDO:**

Que, el (la) Bachiller: **KARIN LORENA MAMANI CUENTAS**, ha presentado su Proyecto de Investigación Titulado: **ANÁLISIS MULTITEMPORAL DE LA MASA GLACIAR UTILIZANDO IMÁGENES SATELITALES DE LA CORDILLERA LA RAYA EN EL PERIODO 2000 - 2021**, para optar el Título Profesional de **Ingeniero Sanitario y Ambiental**.

Que, al haberse cumplido con los requisitos exigidos por el Reglamento de Aseguramiento de la Calidad de Trabajos de Investigación, con fines de obtención de Grados Académicos y Títulos Profesionales y el Reglamento de Grados y Títulos de la Facultad de Ingenierías y Ciencias Puras; el responsable del Comité de Investigación de la Escuela Profesional de **Ingeniería Sanitaria y Ambiental**, Facultad de Ingenierías y Ciencias Puras, nominó a la sub comisión de evaluación de Proyecto de Investigación, a los siguientes Docentes:

- \* **Presidente** : **Dr. OSCAR VICENTE VIAMONTE CALLA**
- \* **1er Miembro** : **Dr. EFRAIN PARILLO SOSA**
- \* **2do Miembro** : **Mgtr. FRITZ WILLY MAMANI APAZA**

Que, la sub comisión de evaluación ha concluido aprobar sin observación el Proyecto de Investigación titulado: **ANÁLISIS MULTITEMPORAL DE LA MASA GLACIAR UTILIZANDO IMÁGENES SATELITALES DE LA CORDILLERA LA RAYA EN EL PERIODO 2000 - 2021**, y;

Que, es requisito indispensable contar con un Docente Ordinario y/o contratado de la Facultad de Ingenierías y Ciencias Puras con un mínimo de cinco años de docencia, grado de magister y experiencia en la línea a investigar, que será el asesor de Proyecto de Investigación, y;

**Estando**, en la opinión favorable del Director de la Unidad de Investigación y en concordancia al Reglamento de Aseguramiento de la Calidad de Trabajos de Investigación, con fines de obtención de Grados Académicos y Títulos Profesionales y el Reglamento de Grados y Títulos de la Facultad de Ingenierías y Ciencias Puras, 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 de la Facultad de Ingenierías y Ciencias Puras.

**RESUELVE:**

**ARTÍCULO PRIMERO.- APROBAR**, el **PROYECTO DE INVESTIGACIÓN**, presentado por el (la) Bachiller: **KARIN LORENA MAMANI CUENTAS**, para optar el Título Profesional de **Ingeniero Sanitario y Ambiental**, con el Tema Titulado: **ANÁLISIS MULTITEMPORAL DE LA MASA GLACIAR UTILIZANDO IMÁGENES SATELITALES DE LA CORDILLERA LA RAYA EN EL PERIODO 2000 - 2021.**

La misma que deberá proceder con la ejecución del Proyecto de Investigación aprobado de acuerdo a lo establecido en el Reglamento de Aseguramiento de la Calidad de Trabajos de Investigación, con fines de obtención de Grados Académicos y Títulos Profesionales y el Reglamento de Grados y Títulos de la Facultad de Ingenierías y Ciencias Puras.

**ARTÍCULO SEGUNDO.- RECONOCER** como **ASESOR DE INVESTIGACIÓN** al (a la) docente ordinario, de la Escuela Profesional de Ingeniería Sanitaria y Ambiental de la Facultad de Ingenierías y Ciencias Puras, **Mgtr. FRANZ JOSEPH BARAHONA PERALES.**

**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.



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

Mgtr. MILTHON QUISPE HUANCA

DECANO  
CIP. 47790

cc.  
archivo 2023  
interesado (a)

Regístrese, Comuníquese, Archívese.



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

Dr. EFRAIN PARILLO SOSA  
SECRETARIO ACADÉMICO  
CIP. 55531



## ANÁLISIS MULTITEMPORAL DE LA MASA GLACIAR UTILIZANDO IMÁGENES SATELITALES DE LA CORDILLERA LA RAYA EN EL PERIODO 2000 - 2021

### INFORME DE ORIGINALIDAD

20%

INDICE DE SIMILITUD

19%

FUENTES DE INTERNET

3%

PUBLICACIONES

6%

TRABAJOS DEL ESTUDIANTE


### FUENTES PRIMARIAS

1	<a href="http://hdl.handle.net">hdl.handle.net</a> Fuente de Internet	6%
2	Submitted to Universidad Andina Nestor Caceres Velasquez Trabajo del estudiante	1%
3	<a href="http://sigrid.cenepred.gob.pe">sigrid.cenepred.gob.pe</a> Fuente de Internet	1%
4	<a href="http://repositorio.uancv.edu.pe">repositorio.uancv.edu.pe</a> Fuente de Internet	1%
5	<a href="http://repositorio.unasam.edu.pe">repositorio.unasam.edu.pe</a> Fuente de Internet	1%
6	<a href="http://repositorio.unfv.edu.pe">repositorio.unfv.edu.pe</a> Fuente de Internet	1%
7	<a href="http://www.coursehero.com">www.coursehero.com</a> Fuente de Internet	<1%
8	Submitted to Escuela Politecnica Nacional Trabajo del estudiante	<1%



### Metadatos complementarios

<b>Título de la Tesis</b>	
<b>ANÁLISIS MULTITEMPORAL DE LA MASA GLACIAR UTILIZANDO IMÁGENES SATELITALES DE LA CORDILLERA LA RAYA EN EL PERIODO 2000 – 2021</b>	
<b>Datos de autor</b>	
Nombres y apellidos	KARIN LORENA MAMANI CUENTAS
Tipo de documento de identidad	DNI
Número de documento de identidad	47982653
URL de ORCID	<a href="https://orcid.org/0009-0007-3859-6662">https://orcid.org/0009-0007-3859-6662</a>
<b>Datos de asesor</b>	
Nombres y apellidos	FRANZ JOSEPH BARAHONA PERALES
Tipo de documento de identidad	DNI
Número de documento de identidad	02442876
URL de ORCID	<a href="https://orcid.org/0000-0001-8509-7224">https://orcid.org/0000-0001-8509-7224</a>
<b>Datos del jurado</b>	
<b>Presidente del jurado</b>	
Nombres y apellidos	OSCAR VICENTE VIAMONTE CALLA
Tipo de documento	DNI
Número de documento de identidad	02371550
<b>Miembro del jurado 1</b>	
Nombres y apellidos	EFRAIN PARILLO SOSA
Tipo de documento	DNI
Número de documento de identidad	02416058
<b>Miembro del jurado 2</b>	
Nombres y apellidos	FRITZ WILLY MAMANI APAZA
Tipo de documento	DNI
Número de documento de identidad	02306659

Datos de investigación	
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 - Cusco  <b>Provincia:</b> Melgar – Canchis  <b>Distrito:</b> Santa Rosa - Maranganí  <b>Coordenadas:</b>  <b>Latitud:</b> -14.45787  <b>Longitud:</b> -70.98756  <b>URL Maps</b>  <a href="https://www.google.com/maps/d/edit?mid=1rgZqLPebX68jty4y3FTvWKAq_2HXiNw&amp;usp=sharing">https://www.google.com/maps/d/edit?mid=1rgZqLPebX68jty4y3FTvWKAq_2HXiNw&amp;usp=sharing</a></p> 
Año o rango de años en que se realizó la investigación	Agosto 2024 – Diciembre 2024
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 DE CUZCO  
 VICERRECTORADO DE INVESTIGACIÓN  
 DIRECCIÓN DE INVESTIGACIONES Y CIENCIAS BÁSICAS  
 DIRECCIÓN DE INVESTIGACIONES Y CIENCIAS BÁSICAS  
 Dr. Efraín Castillo Sosa  
 DIRECTOR  
 UNIDAD DE INVESTIGACIÓN



**DECLARACIÓN DE AUTENTICIDAD Y RESPONSABILIDAD**

Yo KARIN LORENA MAMANI CUENTAS, identificado con DNI  
Nro. 47982653, 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:

ANÁLISIS MULTITEMPORAL DE LA MASA GLACIAR UTILIZANDO IMÁGENES SATELITALES DE LA CORDILLERA LA RAYA EN EL PERIODO 2000 - 2021

Asesorado por: Mgr. FRANZ JOSEPH BARAHONA PERALES

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 06 de ENERO del 2025

  
Firma del Asesor  
(obligatoria)

  
Firma del Estudiante  
(obligatoria)



Huella



## DEDICATORIA

A mis padres, por su importante presencia en el momento indicado, para el idóneo desenlace de esta investigación.



## **AGRADECIMIENTO**

A Dios, por sus lecciones de vida, a veces complicadas, pero siempre aprendiendo de ellas. A mis padres

A la Universidad Andina Néstor Cáceres Velásquez, mi alma mater.

A mi presidente del jurado, Dr. Oscar Vicente Viamonte Calla y los miembros conformantes: el Dr. Efrain Parillo Sosa y el Mgtr. Fritz Willy Mamani Apaza; por sus valiosos consejos para la culminación de la presente investigación.

A mi asesor de Tesis, el Mgtr. Franz Joseph Barahona Perales, por su tiempo y preocupación en la culminación de este trabajo.



## ÍNDICE GENERAL

	Pág.
DEDICATORIA.....	iii
AGRADECIMIENTOS .....	iv
ÍNDICE GENERAL .....	v
ÍNDICE DE TABLAS .....	viii
ÍNDICE DE FIGURAS .....	ix
RESUMEN .....	xi
ABSTRACT .....	xii
INTRODUCCIÓN .....	xiii

### CAPÍTULO I

#### PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

1.1. ANÁLISIS DE LA SITUACIÓN PROBLEMÁTICA .....	16
1.2. Planteamiento DEL PROBLEMA.....	17
1.2.1. Problema General .....	17
1.2.2. Problemas Específicos .....	17
1.3. Objetivos DE LA INVESTIGACIÓN .....	18
1.3.1. Objetivo General .....	18
1.3.2. Objetivos Específicos .....	18
1.4. JUSTIFICACIÓN DEL ESTUDIO .....	18
1.4.1. Justificación Técnica .....	18
1.4.2. Justificación Ambiental.....	19
1.4.3. Justificación Social .....	19
1.4.4. Justificación Económica .....	19



1.5. HIPÓTESIS .....	20
1.5.1. Hipótesis General.....	20
1.5.2. Hipótesis específicas.....	20
1.5.3. Prueba de Hipótesis .....	20
1.6. VARIABLES .....	21
1.6.1. Variable dependiente.....	21
1.6.2. Variable independiente.....	21
1.7. Operacionalización de variables.....	21

### **CAPÍTULO II**

#### **MARCO TEÓRICO**

2.1. ANTECEDENTES DEL ESTUDIO.....	22
1.1.1. Antecedentes Internacionales .....	22
1.1.2. Antecedentes Nivel Nacional.....	24
1.1.3. Antecedentes Nivel Regional .....	27
2.2. BASES TEÓRICAS .....	28
2.2.1. Definición de Teledetección.....	28
2.2.2. Descripción del Campo Radiativo .....	29
2.2.3. Fundamentos la Observación Remota.....	33
2.3. MARCO CONCEPTUAL.....	57

### **CAPITULO III**

#### **METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN**

3.1. TIPO DE INVESTIGACIÓN .....	64
3.2. DISEÑO DE INVESTIGACIÓN .....	64
3.3. POBLACIÓN Y MUESTRA .....	65
3.3.3. Proceso de análisis de datos .....	65



3.4. TÉCNICA Y DISEÑO ..... 78

3.5. LUGAR DE ESTUDIO..... 83

3.6. MÉTODOS DE ANÁLISIS DE DATOS ..... 86

3.6.1. Recojo de Datos ..... 86

**CAPITULO IV**

**RESULTADOS Y DISCUSIÓN**

4.1. Del objetivo general: Analizar el comportamiento multitemporal de la cordillera La Raya: periodo 2000– 2021 ..... 89

4.2. Del objetivo específico 01: Determinar la perdida de la superficie de masa glaciar en la cordillera La Raya en el periodo 2000 – 2021. .... 92

4.3. Del objetivo específico 02: Estimar la predicción de incremento o pérdida de masa glaciar en la cordillera La Raya en el año 2040. .... 102

4.4. Del objetivo específico 03: Proyectar la perdida de la cobertura de masa glaciar desde el año 2021 hasta el 2034. .... 108

4.5. Prueba de hipótesis ..... 110

4.6. Discusión ..... 112

**CONCLUSIONES**

**RECOMENDACIONES**

**REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS**

**ANEXOS**



## ÍNDICE DE TABLAS

<b>Tabla 1</b> <i>Operacionalización de las variables de la investigación</i> .....	21
<b>Tabla 2</b> <i>Magnitudes Radiométricas Básicas Relativas al Campo de Radiación</i> ..	31
<b>Tabla 3</b> <i>Información técnica resumida – Landsat 5</i> .....	66
<b>Tabla 4</b> <i>Información técnica resumida – Landsat 7</i> .....	68
<b>Tabla 5</b> <i>Información técnica resumida – Landsat 8</i> .....	70
<b>Tabla 6</b> <i>Características de las imágenes Landsat utilizadas para estimar los cambios en la cobertura glaciar</i> .....	72
<b>Tabla 7</b> <i>Evolución de la cobertura glaciar de la cordillera: La Raya del periodo 2000 - 2021</i> .....	90
<b>Tabla 8</b> <i>Evolución de la cobertura glaciar de la cordillera La Raya del periodo 2000 - 2021</i> .....	103
<b>Tabla 9</b> <i>Análisis de regresión lineal en el programa estadística SPSS</i> .....	104
<b>Tabla 10</b> <i>Análisis de regresión lineal en el programa estadística SPSS</i> .....	105
<b>Tabla 11</b> <i>Análisis de regresión lineal en el programa estadística SPSS</i> .....	106
<b>Tabla 12</b> <i>Evolución de la cobertura glaciar de la cordillera La Raya del periodo 2000 - 2021</i> .....	107
<b>Tabla 13</b> <i>Evolución de la cobertura glaciar de la cordillera La Raya del periodo 2021 – 2034</i> .....	109
<b>Tabla 14</b> <i>Pruebas estadísticas de normalidad y correlación</i> .....	111
<b>Tabla 15</b> <i>Discusión de reducción de cobertura glaciar de diversas investigaciones</i> .....	113



## ÍNDICE DE FIGURAS

<b>Figura 1</b> <i>Componente de un sistema de Teledetección</i> .....	34
<b>Figura 2</b> <i>Espectro Electromagnético</i> .....	36
<b>Figura 3</b> <i>Combinación de bandas 4, 3, 2. landsat 7</i> .....	40
<b>Figura 4</b> <i>Combinación de bandas 1, 4, 5. landsat 7</i> .....	41
<b>Figura 5</b> <i>Combinación de bandas</i> .....	42
<b>Figura 6</b> <i>Combinación de bandas</i> .....	43
<b>Figura 7</b> <i>Niveles digitales (ND) de una sección de la Raya del año 2000</i> .....	44
<b>Figura 8</b> <i>Esquema general del procedimiento de corrección geométrica previo a la detección de cambios</i> .....	47
<b>Figura 9</b> <i>NDSI del glaciar la Raya 2021, mediante el software ArcMap.</i> .....	54
<b>Figura 10</b> <i>NDVI del glaciar la Raya, mediante el software Qgis.</i> .....	56
<b>Figura 11</b> <i>Cálculo de NDSI (Índice De Nieve De Diferencia Normalizada) - antes y después</i> .....	74
<b>Figura 12</b> <i>Conversión de la clasificación a vector del nevado</i> .....	75
<b>Figura 13</b> <i>Cálculo de NDWI (Índice de Agua De Diferencia Normalizada)</i> .....	76
<b>Figura 14</b> <i>Clasificación no supervisada al resultado del NDWI de las lagunas adyacentes</i> .....	77
<b>Figura 15</b> <i>Conversión de la clasificación a vector</i> .....	78
<b>Figura 16</b> <i>Imagen satelital Landsat 7 del 24-06-2000</i> .....	80
<b>Figura 17</b> <i>Imagen satelital Landsat 7 del 11-07-2003</i> .....	80
<b>Figura 18</b> <i>Imagen satelital Landsat 7 del 16-05-2006</i> .....	80
<b>Figura 19</b> <i>Imagen satelital Landsat 7 del 08-05-2009</i> .....	81
<b>Figura 20</b> <i>Imagen satelital Landsat 7 del 25-06-2012</i> .....	81
<b>Figura 21.</b> <i>Imagen satelital Landsat 7 del 06-10-2015</i> .....	81
<b>Figura 22</b> <i>Imagen satelital Landsat 7 del 15-04-2018</i> .....	82
<b>Figura 23</b> <i>Imagen satelital Landsat 7 del 10-06-2021</i> .....	82
<b>Figura 24</b> <i>Comparación fotográfica del glaciar Chimbolla - Cordillera La Raya</i> ..	84



**Figura 25** *Mapa ubicación del área de estudio* ..... 85

**Figura 26** *Diagrama del cálculo de la dinámica de la cobertura glaciar de la cordillera La Raya* ..... 88

**Figura 27** *Mapa de evolución de la pérdida del área glaciar en la cordillera La Raya: 2000 - 2021* ..... 91

**Figura 28** *Evolución de la pérdida del área glaciar (km<sup>2</sup>) en la cordillera La Raya: 2000 - 2021* ..... 93

**Figura 29** *Mapa de cobertura del área glaciar en la cordillera La Raya: año 2000* ..... 93

**Figura 30** *Mapa de cobertura del área glaciar en la cordillera La Raya: año 2003* ..... 95

**Figura 31** *Mapa de cobertura del área glaciar en la cordillera La Raya: año 2006* ..... 96

**Figura 32** *Mapa de cobertura del área glaciar en la cordillera La Raya: año 2009* ..... 97

**Figura 33** *Mapa de cobertura del área glaciar en la cordillera La Raya: año 2012* ..... 98

**Figura 34** *Mapa de cobertura del área glaciar en la cordillera La Raya: año 2015* ..... 99

**Figura 35** *Mapa de cobertura del área glaciar en la cordillera La Raya: año 2018* ..... 100

**Figura 36** *Mapa de cobertura del área glaciar en la cordillera La Raya: año 2021* ..... 101

**Figura 37** *Regresión lineal área cubierta por glaciar en la cordillera La Raya...* 107

**Figura 38** *Regresión lineal área cubierta por glaciar en la cordillera La Raya (2021 al 2034)* ..... 110



## RESUMEN

El objetivo del presente estudio fue analizar los cambios multitemporales en la cobertura glaciar de la cordillera La Raya, ubicada entre las regiones de Puno y Cusco, durante el periodo 2000 - 2021. Con un enfoque cuantitativo, no experimental, de nivel explicativo y diseño longitudinal, se utilizó la categorización dirigida de las ilustraciones de Landsat 2 y el Índice Normalizado de Diferencia de Nieve (NDSI) en las ilustraciones de Landsat 5 y Landsat 8, lo que permitió estimar con precisión el área glaciar en diferentes momentos del tiempo. Respecto a los resultados, revelaron una reducción notable en la extensión de la cobertura glaciar. En el año 1962, la cordillera poseía una superficie glaciar de 11.27 km<sup>2</sup>, la cual se mantuvo prácticamente estable hasta 1989, cuando alcanzó los 11.30 km<sup>2</sup>. Sin embargo, en el año 2000, se observó una reducción drástica a 3.67 km<sup>2</sup>, y para 2021, la cobertura glaciar se redujo aún más, llegando a 1.10 km<sup>2</sup>. En total, se reportó una pérdida de 2.57 km<sup>2</sup> en la extensión glaciar, lo que equivale a una reducción del 70.03% en los últimos 21 años. A partir de estos resultados, se proyecta que para el año 2034, la cobertura glaciar de la cordillera La Raya habrá desaparecido por completo, alcanzando un valor de 0.00 km<sup>2</sup>. Esto indica una disminución del 30% por década desde 1962, con una tasa media de disminución de 0.37 km<sup>2</sup> por año. Estos hallazgos ponen de relieve la alarmante velocidad a la que están retrocediendo los glaciares en la cordillera, con importantes implicaciones ambientales y climáticas.

**Palabras claves:** Comportamiento, multitemporal, cobertura glaciar, imagen Landsat.



## ABSTRACT

The objective of this study was to analyze the multitemporal changes in glacier coverage in the La Raya mountain range, located between the Puno and Cusco regions, during the period 2000 - 2021. Using a quantitative, non-experimental approach, with an explanatory level and longitudinal design, supervised classification of Landsat 2 imagery and the Normalized Difference Snow Index (NDSI) in Landsat 5 and Landsat 8 imagery were used, allowing for accurate estimation of glacier area at different points in time. Regarding the results, they revealed a notable reduction in glacier coverage. In 1962, the mountain range had a glacier surface area of 11.27 km<sup>2</sup>, which remained almost stable until 1989, reaching 11.30 km<sup>2</sup>. However, by 2000, a drastic reduction to 3.67 km<sup>2</sup> was observed, and by 2021, glacier coverage had further decreased to 1.10 km<sup>2</sup>. In total, a loss of 2.57 km<sup>2</sup> in glacier extent was reported, equivalent to a reduction of 70.03% over the past 21 years. Based on these results, it is projected that by 2034, the glacier coverage in the La Raya mountain range will have completely disappeared, reaching a value of 0.00 km<sup>2</sup>. This indicates a 30% decrease per decade since 1962, with an average rate of decline of 0.37 km<sup>2</sup> per year. These findings highlight the alarming rate at which glaciers are retreating in the mountain range, with significant environmental and climatic implications.

**Keywords:** Behavior, multitemporal, glacier coverage, Landsat images.



## INTRODUCCIÓN

El cambio climático global, que se inició de forma gradual a mediados del siglo XIX y se prolongó hasta el siglo XX, ha impactado notablemente la superficie y el volumen de los glaciares en todo el mundo, particularmente en las zonas montañosas, debido al incremento sostenido de las temperaturas (Oerlemans, 2005). Hacia finales del siglo XX, se observó un preocupante avance en la reducción de los glaciares (Kaser y Georges, 1999; Vuille et al., 2008). Además, los autores como Marzeion et al. (2014) destacan que, hacia finales de la década de 1970, este retroceso glaciar fue impulsado en gran medida por la influencia antropogénica en el clima global. De manera similar, Marshall (2014) concluyó que, en ese mismo periodo, los glaciares comenzaron a mostrar un declive irreversible, superando una barrera crítica que señala una pérdida antinatural en la masa glaciar.

El estudio multitemporal de la extensión glaciar, basado en la comparación basada en ilustraciones satelitales tomadas en diferentes momentos, revela una tendencia clara al retroceso, evidenciando así el cambio climático de origen antropogénico. No obstante, los glaciares responden de manera retardada a las variaciones climáticas, con periodos de respuesta que pueden extenderse por décadas. Esto implica que el retroceso actual no se debe únicamente a factores contemporáneos, sino también a la variabilidad climática natural y a las condiciones ecosistémicas del entorno (Marzeion et al., 2014). Según López et al. (2017), una consecuencia secundaria de este retroceso es la formación de nuevos lagos en las cuencas y el incremento de los niveles de agua en los lagos ya existentes.



Es importante señalar que los glaciares tropicales constituyen una fuente vital de agua dulce para numerosas ciudades de Sudamérica, especialmente en los Andes, que albergan el 99% de las masas glaciares en zonas tropicales del mundo Kaser (1999), siendo Perú el país con aproximadamente el 70% de estos glaciares (Vuille et al., 2008). Desafortunadamente, los glaciares peruanos han sufrido una reducción del 42.6% en los últimos 40 años (Autoridad Nacional del Agua, 2014). Esta aceleración del retroceso glaciar se intensifica durante el fenómeno de El Niño, mientras que, en periodos de La Niña, la cobertura glaciar tiende a estabilizarse o incluso incrementarse (López-Moreno et al., 2017).

La fragilidad de estos glaciares tropicales ante el cambio climático es evidente, lo que resalta su importancia como proveedores de recursos hídricos esenciales para las poblaciones locales, que dependen de ellos para su desarrollo y supervivencia (Mark, 2008). El continuo retroceso de los glaciares no solo altera la disponibilidad de agua, sino que también expone a las comunidades a riesgos críticos, como la polución de recursos hídricos por metales traza y otros elementos tóxicos, debido a la exposición de formaciones ricas en sulfuros (López-Moreno et al., 2017). Este contexto subraya la relevancia del presente estudio, que se centra en un estudio multitemporal de las variaciones en la extensión glaciar de la cordillera La Raya, en las regiones de Puno y Cusco, durante el periodo comprendido de los años 2000 al 2021.

La presente investigación está estructurada en cuatro capítulos principales, el Capítulo I, que aborda el Planteamiento del problema, el cual abarca un análisis detallado de la situación problemática, la formulación específica del problema, asimismo, se detalla los objetivos e hipótesis que orientan el estudio; Capítulo II, que aborda el Marco teórico, donde se expone un esquema de los antecedentes



relevantes de la investigación, las bases teóricas que sustentan el análisis y el marco conceptual que define los términos y conceptos clave; el Capítulo III aborda la Metodología de la investigación, en el que se describen de manera exhaustiva los métodos y enfoques aplicados para realizar el análisis, junto con las herramientas y técnicas empleadas; y el Capítulo IV aborda los Resultados y discusión, sección en la cual se exponen los principales hallazgos de la investigación y se analizan en relación con estudios previos y teorías relevantes en la literatura académica. Al final, la investigación incluye las conclusiones y recomendaciones, además de las referencias bibliográficas.



## CAPÍTULO I

### PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

#### 1.1. ANÁLISIS DE LA SITUACIÓN PROBLEMÁTICA

La cordillera La Raya es ampliamente reconocida por su importancia como fuente esencial de recursos hídricos para las comunidades que habitan a su alrededor. Los glaciares presentes en esta región desempeñan un rol fundamental en el ciclo hidrológico, especialmente en áreas áridas y semiáridas, donde el acceso al agua es limitado. Estos glaciares tienen la capacidad de almacenar grandes volúmenes de agua durante las épocas frías, liberándola progresivamente como agua de deshielo durante los periodos secos o de escasez de precipitaciones. De esta manera, actúan como reservas naturales que garantizan el suministro de agua tanto para la población local como para los ecosistemas circundantes (Synnove, 2019). No obstante, la creciente pérdida anual de glaciares en los Andes centrales y del sur ha generado gran preocupación sobre la sostenibilidad de este recurso vital, creando una incertidumbre sobre la disponibilidad futura de agua en la región.

Ante este panorama, se ha planteado el presente estudio con el objetivo de analizar el área de retroceso de la cobertura glaciar en la cordillera La Raya durante el periodo comprendido entre 1990 y 2020, utilizando un enfoque de análisis



multitemporal. Este estudio resulta crucial para comprender el impacto de la disminución glaciaria en la gestión del agua destinada a ser consumida por la población, dado que los ríos que nacen en la cordillera de los Andes, mismos que son la principal fuente de abastecimiento de agua para las comunidades locales. Asimismo, los hallazgos encontrados en la presente investigación aportarán con la elaboración de estrategias efectivas de mitigación y adaptación ante los futuros cambios climáticos que, posteriormente puedan derivarse de la reducción o desaparición de los glaciares en esta importante región montañosa.

## 1.2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

### 1.2.1. *Problema General*

¿Cuál es el comportamiento multitemporal de la cordillera La Raya utilizando imágenes satelitales del departamento de Puno y Cusco en el periodo 2000– 2021?

### 1.2.2. *Problemas Específicos*

**PE01:** ¿Cuánta es la pérdida de la cobertura de masa glaciaria en la cordillera La Raya en el periodo 2000 – 2021?

**PE02:** ¿Cuánta es la pérdida de la cobertura de masa glaciaria en la cordillera La Raya en el año 2040?

**PE03:** ¿Cuánta es la pérdida de la cobertura de masa glaciaria en la cordillera La Raya anualmente desde el año 2021 hasta el 2034?



## 1.3. OBJETIVOS DE LA INVESTIGACIÓN

### 1.3.1. *Objetivo General*

Analizar el comportamiento multitemporal de la cordillera La Raya utilizando imágenes satelitales del departamento de Puno y Cusco en el periodo 2000 – 2021.

### 1.3.2. *Objetivos Específicos*

**OE01:** Determinar la pérdida de la cobertura de masa glaciar en la cordillera La Raya en el periodo 2000 – 2021.

**OE02:** Estimar la predicción de pérdida de la cobertura de masa glaciar en la cordillera La Raya en el año 2040.

**OE03:** Proyectar la pérdida de la cobertura de masa glaciar en la cordillera La Raya anualmente desde el año 2021 hasta el 2034.

## 1.4. JUSTIFICACIÓN DEL ESTUDIO

### 1.4.1. *Justificación Técnica*

Este estudio se fundamenta desde una perspectiva técnica debido a la necesidad de aplicar tecnologías avanzadas, como el análisis de imágenes satelitales, para monitorear y evaluar con precisión los cambios en la masa de hielo de la cordillera La Raya. La utilización de herramientas como las imágenes Landsat y el Índice de Diferencia Normalizada de Nieve (NDSI) permite obtener datos detallados y fiables sobre la evolución del área glaciar a lo largo del tiempo. Este enfoque proporciona una visión más objetiva y científica que las mediciones tradicionales en campo, lo que resulta indispensable para generar modelos predictivos sobre el retroceso glaciar y sus implicaciones ambientales.



#### **1.4.2. Justificación Ambiental**

Desde una perspectiva ambiental, este estudio se justifica por lo indispensable de los glaciares en el control del ciclo del agua y en la preservación de los ecosistemas andinos. El retroceso glaciar genera efectos importantes en los ecosistemas, alterando su disponibilidad de agua y afectando la biodiversidad. Además, la desaparición de glaciares puede desencadenar la liberación de elementos tóxicos que estaban atrapados en el hielo, lo que podría contaminar fuentes de agua y afectar tanto a la fauna como a la flora locales. El estudio permitirá comprender mejor las implicaciones ambientales del retroceso glaciar y desarrollar estrategias para la conservación de los ecosistemas afectados.

#### **1.4.3. Justificación Social**

Socialmente, el estudio es fundamental e importante debido a que las poblaciones locales dependen en gran medida de los glaciares para su suministro de agua, tanto para uso humano como para actividades agrícolas. La disminución de la masa glaciar podría poner en riesgo la seguridad hídrica de estas comunidades, exacerbando problemas de escasez de agua y conflictos por su uso. Este estudio contribuirá a la identificación de riesgos para la población, favoreciendo la adopción de políticas y consecuentemente las estrategias de mitigación que protejan a las comunidades vulnerables.

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

El retroceso glaciar tiene importantes implicaciones económicas como cambios en la disponibilidad de agua afectan actividades económicas clave como la agricultura, la actividad turística y la producción de energía hidroeléctrica. Este estudio permitirá identificar el impacto potencial de la pérdida de masa glaciar tanto en la economía local.



## 1.5. HIPÓTESIS

### 1.5.1. *Hipótesis General*

El comportamiento multitemporal de la cordillera La Raya utilizando imágenes satelitales del departamento de Puno y Cusco en el periodo 2000 – 2021 posee una tendencia de pérdida de la misma.

### 1.5.2. *Hipótesis específicas*

HE01: Se tiene el efecto de pérdida de la cobertura de masa glaciar en la cordillera La Raya en el periodo 2000 – 2021 a causa de la dinámica glaciar espacial mundial.

HE02: El efecto de pérdida de cobertura de masa glaciar en la cordillera La Raya hasta el año 2040 se corrobora estadísticamente mediante la regresión.

HE03: El efecto de pérdida de la cobertura de masa glaciar en la cordillera La Raya anualmente desde el año 2021 hasta el 2034 es a causa del decrecimiento que llega al 0.00 % de cobertura glaciar.

### 1.5.3. *Prueba de Hipótesis*

Ha: Hay pérdida de la masa glaciar en la cordillera la raya en el periodo 2000 – 2021.

Ho: No hay pérdida de la masa glaciar en la cordillera la raya en el periodo 2000 – 2021.

## 1.6. VARIABLES

### 1.6.1. Variable dependiente

Análisis multitemporal de la cobertura de masa glaciar

### 1.6.2. Variable independiente

Cordillera La Raya: periodo 2000 – 2021

## 1.7. OPERACIONALIZACIÓN DE VARIABLES

**Tabla 1**

*Operacionalización de las variables de la investigación*

Variables	Dimensiones	Causa – efecto	Indicador	Und
<b>Variable</b>	Variabilidad	Causa: Variación	Temperatura media	°C
<b>Dependiente</b>	multitemporal de	temporal a la tendencia	mensual	Km <sup>2</sup>
Análisis	la cobertura de	atmosférica global.	Incremento de la	Km <sup>2</sup>
multitemporal	masa glaciar:	Efecto: El	cobertura de masa	
de la masa	2000 al 2021	comportamiento	glaciar según año	
glaciar	Extensión de la	multitemporal de la	Reducción de la	
<b>Variable</b>	cobertura de	cordillera La Raya posee	cobertura de masa	
<b>Independiente</b>	masa glaciar en	una tendencia de	glaciar según año	
Cordillera La	la cordillera al	perdida.		
Raya: 2000 -	año 2040	Causa: Dinámica glaciar		
2021		espacial mundial		
		Efecto: Se tiene el		
		efecto de pérdida de la		
		cobertura de masa		
		glaciar		

*Nota:* La presente tabla muestra la variable dependiente e independiente.



## CAPÍTULO II

### MARCO TEÓRICO

#### 2.1. ANTECEDENTES DEL ESTUDIO

##### 1.1.1. *Antecedentes Internacionales*

Según la investigación de Paez y García (2016) titulado "Análisis multitemporal del retroceso glaciar en la Sierra Nevada de Santa Marta – Colombia para los periodos 1986, 1996, 2007 y 2014", se buscó evaluar la disminución de las masas glaciares empleando ilustraciones satelitales Landsat en diferentes periodos para calcular la velocidad de disminución de nieve. El uso de técnicas de teledetección permitió analizar las imágenes satelitales y obtener información detallada sobre el retroceso glaciar. Los resultados indicaron que en 1986 la cobertura glaciar era de 2278.99 hectáreas (Ha), que representaban el 100% de la cobertura original del estudio. En 1996, esta se redujo a 1807.74 Ha (79.30%), mientras que para 2007 la cobertura disminuyó a 1255.42 Ha (55.10%). Finalmente, en 2014, el área glaciar se redujo aún más a 686.33 Ha, es decir, el 30.10% de la cobertura inicial. Estos datos revelan que el retroceso glaciar ha aumentado de velocidad en los últimos años, afectando significativamente las reservas de agua y las comunidades locales que dependen de ellas.



Por su parte, Copé de los Mozos (2020), en su artículo denominado "Efectos del cambio climático sobre los glaciares del complejo volcánico Nevados de Chillán", examinó el impacto del cambio climático sobre los glaciares de esta región, utilizando imágenes LANDSAT TM y OLI de los años 1999, 2009 y 2019, el estudio comparó las variaciones superficiales de los glaciares y las relacionó y junto a factores meteorológicos como la lluvia y la temperatura. A través de índices espectrales como el Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI) y el Índice de Nieve de Diferencia Normalizada (NDSI), se observó una clara disminución en la superficie glaciar, respaldando la hipótesis de que el cambio climático está acelerando el deshielo de estos glaciares. Las fluctuaciones climáticas, especialmente en la precipitación y temperatura, contribuyen de manera directa a la reducción de las masas glaciares en el área de estudio.

En otro estudio, Veettil et al. (2016) llevaron a cabo un análisis comparativo del retroceso de glaciares en los Andes Tropicales, empleando imágenes satelitales multiespectrales y datos meteorológicos para examinar la dinámica de los glaciares en un contexto de cambio climático. El estudio se centró en la medición de la línea de la masa glaciar máxima anual entre 1985 y 2015, y los cambios en la superficie glaciar desde 1975 hasta 2015. Además, evaluaron el impacto de fenómenos como El Niño-Oscilación del Sur y la Oscilación Decenal del Pacífico en el retroceso de la masa de nieve. Se observó que los glaciares de los Andes, tanto en las zonas tropicales internas como externas, experimentaron un retroceso continuo durante todo el periodo, con una mayor pérdida de superficie entre 1975 y 1997, coincidiendo con el calentamiento del Pacífico. Las tasas de retroceso más altas se registraron en Nevado Cololo (59.17%), Cotopaxi (57.65%), Nevado Tuco (48.96%) y el Nevado Coropuna (34.78%). De manera notable, el

mayor retroceso glaciar ocurrió entre 1975 y 1998 en todas las regiones analizadas, destacando la Cordillera Blanca como una de las más afectadas.

### **1.1.2. Antecedentes Nivel Nacional**

Huayaney (2008) en su investigación titulada "Aplicación de la Teledetección para el análisis multitemporal de la regresión glaciar en la Cordillera Blanca", planteó como objetivo general realizar un exhaustivo análisis temporal con el fin de determinar la disminución de calcular la pérdida de masa de nieve en la Cordillera Blanca, ubicada en la localidad de Huaraz, región Ancash. La importancia de este estudio radica en que se centró en tres periodos claves: 1989, 1998 y 2005, aplicando imágenes satelitales como principal herramienta de teledetección. Estas imágenes permitieron obtener datos precisos sobre los cambios en la cobertura glaciar a lo largo del tiempo, destacando su valor para monitorear el retroceso glaciar en áreas remotas y de difícil acceso. En sus conclusiones, Huayaney destaca que la metodología basada en el uso de imágenes satelitales fue esencial para identificar variaciones significativas en la extensión de las lenguas de masa de nieve ubicadas a lo largo de la mencionada Cordillera Blanca. El autor también menciona que estas fluctuaciones están directamente relacionadas con fenómenos climáticos globales, como el calentamiento global, y con eventos climáticos específicos, como El Niño y La Niña. En el caso particular de la masa de nieve denominada Cojup, ubicado en la zona de la laguna nominada Palcacocha, la cobertura glaciar pasó de 6781.09 hectáreas en 1989 a 5293.53 hectáreas en 1998, luego a 5098.37 hectáreas en 2005 y, finalmente, se redujo a 4151.84 hectáreas en 2014. Esta significativa pérdida de masa glaciar evidencia la creciente vulnerabilidad de los glaciares ante el cambio climático.



Por otro lado, Tarazona (2012) en su investigación denominada “Aplicación de la Teledetección como una herramienta para el análisis multitemporal del retroceso glaciar en el Nevado Pastoruri debido al Cambio Climático”, realizó un análisis centrado en la disminución de masa de nieve en el Nevado Pastoruri, cubriendo dos periodos importantes: 1988-1999 y 1999-2011. El objetivo general fue no solo analizar la disminución de la masa glaciar, sino también proyectar una predicción sobre la posible pérdida de área glaciar hacia el año 2050. El empleo de técnicas de teledetección permitió a Tarazona obtener información detallada sobre el retroceso glaciar y su progresiva aceleración. Entre las conclusiones más destacadas de su estudio, se menciona que la pérdida de masa glaciar ha incrementado el flujo de agua en las zonas más bajas del nevado, lo que podría generar impactos negativos en los servicios básicos, en la infraestructura local y en los ecosistemas de la región. Además, Tarazona advierte sobre el creciente riesgo de avalanchas y la formación de nuevas lagunas glaciares, lo que podría alterar significativamente las prácticas agrícolas de las comunidades aledañas, aumentando la vulnerabilidad socioeconómica de la población local.

De manera similar, Arévalo (2015) en su investigación denominada “Análisis multitemporal de glaciares y lagunas glaciares en la Cordillera Blanca e identificación de potenciales amenazas GIOFs”, se centró en identificar las variaciones en la superficie de los glaciares y de las lagunas glaciares en la Cordillera Blanca, así como en evaluar los riesgos potenciales asociados con los eventos de avenidas repentinas (Glacial Lake Outburst Floods, GIOFs) causadas por el desbordamiento de lagunas glaciares. Para llevar a cabo este análisis, Arévalo empleó imágenes satelitales y herramientas avanzadas de percepción remota y Sistemas de Información Geográfica (SIG), lo que le permitió detectar con



precisión las variaciones en la dinámica glaciar y en la creación de lagunas. Durante el periodo de análisis comprendido entre 2004 y 2014, se observó un aumento significativo en el número y superficie de lagunas glaciares, atribuible al rápido fusión de los glaciares inducida por el cambio climático. La superficie glaciar total disminuyó de 515.4 km<sup>2</sup> en 2004 a 484.4 km<sup>2</sup> en 2014, lo que representa una disminución del 6%. Este retroceso acelerado confirma la tendencia global de disminución de glaciares y sugiere que el riesgo de eventos GIOFs en la Cordillera Blanca está en aumento, lo que pone en peligro a las comunidades ubicadas aguas abajo de estas lagunas.

Por su parte, Gómez y Zamora (2008), en su estudio denominado "Evaluación de la cobertura glaciar utilizando técnicas de teledetección espacial en la subcuenca del río Quellcayhuanca – Río Santa", desarrollaron un estudio centrado en la subcuenca del río Quellcayhuanca, que pertenece a la cuenca del río Santa, en el departamento de Ancash. El principal objetivo de su investigación fue establecer la superficie de disminución de masa de nieve empleando métodos de información geográfica, como la percepción remota, y métodos hidrométricos, mediante el procesamiento de ilustraciones satelitales, los autores concluyeron que el retroceso glaciar ha afectado considerablemente los caudales en la cuenca secundaria del afluente denominado Quellcayhuanca en las últimas décadas, lo que podría tener implicaciones significativas para el rendimiento hídrico de la región. Esta disminución en los caudales podría impactar negativamente en el suministro de agua relacionadas con tareas de agricultura, industriales y para el consumo por parte de la población, aumentando la presión sobre los recursos hídricos en la región.



Finalmente, Colonia y Torres (2007) en su investigación denominada "Determinación del retroceso glaciar en la microcuenca de Llanganuco, a través del análisis multitemporal en el período 1987-2007", realizaron un análisis detallado relacionado con la disminución de la masa de nieve en la microcuenca de la laguna Llanganuco, empleando ilustraciones del satélite Landsat 5. A través del empleo de herramientas de información y modelamiento geográfico, pudieron hallar datos precisos sobre el comportamiento de las masas de nieve a lo largo de veinte años, cubriendo los periodos de 1987-1996 y 1996-2007. En sus conclusiones, los autores estimaron que la pérdida de superficie glaciar en los primeros nueve años fue de 1.523 km<sup>2</sup>, mientras que en los siguientes once años la pérdida aumentó a 2.345 km<sup>2</sup>. Este incremento en la tasa de retroceso glaciar confirma la aceleración del derretimiento en los últimos años, lo que subraya la utilidad de la teledetección como herramienta esencial para observar y evaluar las variaciones en las masas de nieve a lo largo del transcurrir del tiempo.

### **1.1.3. Antecedentes Nivel Regional**

A nivel regional no se han encontrado investigaciones específicas enfocadas con el área de investigación, pero sí se han identificado trabajos relevantes en glaciares cercanos que brindan información valiosa sobre la dinámica glaciar en la región. Uno de estos estudios fue realizado por Díaz et al. (2017), quienes llevaron a cabo una investigación centrada en los nevados denominados Chichi Capac y Allin Capac, en Perú, con el principal objetivo de analizar los cambios en la masa de nieve durante el lapso abarcado entre los años 1975 y 2015. Sin embargo, para su análisis, los autores emplearon la técnica de control supervisado en ilustraciones satelitales de Landsat 2, complementado con el Índice de Diferencia Normalizada



de Nieve (NDSI) aplicado a ilustraciones Landsat 5 y Landsat 8, lo que les permitió obtener datos precisos sobre la evolución glaciaria a lo largo de las décadas.

Los resultados de este estudio revelaron una disminución significativa en la masa de nieve de ambos nevados. Sin embargo en el año de 1975, el área total que cubría la masa de nieve era de 52.3 km<sup>2</sup>, pero para el año 2015 esta extensión se había reducido drásticamente a la extensión de 16.9 km<sup>2</sup>, mismo que representa una disminución notable de 35.6 km<sup>2</sup> en cuatro décadas. Un hallazgo notable fue que, en 1975, el 35% de la masa de nieve se hallaba por debajo de los cinco mil metros sobre el nivel del mar, mientras que en 2015 este porcentaje había disminuido al 9%, lo que evidencia un marcado retroceso en altitud.

El análisis también indicó que la tasa más alta de disminución glaciaria se produjo en las tres últimas décadas del siglo XX, contando con una desaceleración relativa en las primeras dos décadas del siglo XXI. En total, se concluyó que la cobertura glaciaria de los nevados Allin Capac y Chichi Capac se redujo en un 67% en las cuatro últimas décadas, lo que equivale en una disminución promedio del 17% por década y una tasa anual de pérdida de 0.89 km<sup>2</sup> por año. Este estudio subraya la gravedad del retroceso glaciario en la región andina y sus posibles efectos sobre el agua y los ecosistemas locales.

## **2.2. BASES TEÓRICAS**

### **2.2.1. Definición de Teledetección**

La teledetección, también denominada percepción remota, se refiere a la técnica mediante la cual se obtiene datos de un objeto o área sin la necesidad de un contacto físico directo entre el sensor y el objeto observado. Esta innovadora tecnología se fundamenta en la recolección de datos mediante de la energía



electromagnética que los objetos emiten o reflejan, lo que permite monitorear grandes extensiones de terreno, áreas remotas o de difícil acceso. Los sensores ubicados en satélites o en plataformas aéreas, como aviones o drones, registran dicha energía electromagnética que puede estar representada en términos de intensidad, frecuencia o polarización de ondas. La data capturada se transmite de forma directa desde el objeto o bien mediante procesos como la reflexión, dispersión o reemisión de la energía hacia el sensor. Todos los objetos en la Tierra, ya sean naturales o artificiales, emiten o reflejan alguna forma de energía electromagnética, lo que hace que esta técnica sea ampliamente aplicable a diversas disciplinas, mismas como la meteorología, la geología, la agricultura, la gestión de desastres y la cartografía, entre muchas otras. La teledetección permite analizar las propiedades físicas de un objeto en función de las variaciones de la radiación electromagnética en diferentes frecuencias, proporcionando así una herramienta eficaz para la observación de fenómenos naturales a gran escala y para monitorear cambios ambientales (Sobrino et al., 2000).

### ***2.2.2. Descripción del Campo Radiativo***

El campo radiativo se refiere al campo electromagnético generado por una fuente emisora que transporta energía en forma de ondas hasta un detector o sensor. La energía asociada a este campo se conoce como energía radiante y se mide en julios (J). El flujo radiante, por su parte, representa la cantidad de energía radiante que se transfiere en una unidad de tiempo y se expresa en vatios (W). desde la perspectiva de los conceptos de electromagnética, el flujo radiante se puede interpretar como el flujo del vector de Poynting, que representa la dirección y magnitud del transporte de energía a través del espacio (Liou, 2002). No obstante, el flujo radiante no proporciona información detallada sobre la distribución espacial



de la radiación, es decir, cómo se distribuye esta energía en un área específica. Para describir esta distribución, se utiliza la densidad de flujo radiante, que representa la cantidad de flujo radiante que pasa a través de una superficie específica, expresada en vatios por metro cuadrado ( $W/m^2$ ).

Adicionalmente, para caracterizar la propagación de la radiación en un ángulo sólido, se emplea la intensidad radiante, que mide la cantidad de flujo radiante dentro de un ángulo específico y se utiliza principalmente para describir las emisiones de fuentes puntuales, como las estrellas o focos de energía concentrada. Esta magnitud se mide en vatios por estereorradián ( $W/sr$ ), una unidad que considera tanto la energía emitida como el ángulo de propagación. Por otro lado, la radiancia es una medida más compleja que describe el flujo radiante dentro de un ángulo sólido que atraviesa una superficie perpendicular a la dirección de la propagación de la radiación. Esta magnitud es crucial en estudios de teledetección, ya que permite entender cómo interactúa la radiación con las superficies de la Tierra, considerando tanto la orientación de la superficie como el ángulo de incidencia de la radiación. La radiancia se mide en vatios por metro cuadrado por estereorradián ( $W/m^2 sr$ ) y es una de las magnitudes más importantes para el análisis de imágenes satelitales y la interpretación de datos en observaciones remotas.

El campo radiativo y las magnitudes asociadas, como el flujo radiante, la densidad de flujo, la intensidad radiante y la radiancia, son conceptos fundamentales en la teledetección. Estos permiten comprender cómo la energía electromagnética interactúa con los objetos y materiales en la Tierra, proporcionando información valiosa sobre sus características físicas. Este conocimiento es esencial para el procesamiento y análisis de datos obtenidos por

sensores remotos, facilitando la identificación de patrones y cambios en el ambiente a lo largo del tiempo. La teledetección, por tanto, ofrece una perspectiva única y detallada del planeta, permitiendo realizar estudios a gran escala y a largo plazo sobre fenómenos como el cambio climático, la deforestación, el retroceso de glaciares y otros procesos naturales y antropogénicos.

**Tabla 2**

*Magnitudes Radiométricas Básicas Relativas al Campo de Radiación*

MAGNITUD	SÍMBOLO	DEFINICIÓN	UNIDAD (S.L.)
Energía radiante	Q	-	J
Flujo radiante	$\Phi$	$dQ/dt$	W
Emitancia radiante	M	$d\Phi/dS$	$Wm^{-2}$
Irradiancia	E	$d\Phi/dS$	$Wm^{-2}$
Intensidad radiante	I	$d\Phi/d\Omega$	$Wsr^{-1}$
Radiancia	I	$d\Phi/(d\Omega dScos\theta)$	$Wm^{-2}sr^{-1}$
Radiancia espectral	$L_\lambda$	$dL/d\lambda$	$Wm^{-2}sr^{-1}\mu m^{-1}$

*Nota.* Sobrino et al., (2000).

La radiancia  $L(R,n)$ , que depende tanto de la posición  $R$  como de la dirección  $n$ , es fundamental para describir de manera detallada el campo radiativo. En el ámbito de la teledetección, la radiancia es una magnitud particularmente importante, ya que es lo que los sensores miden directamente. Esta permite cuantificar la energía electromagnética que viaja desde un objeto hasta el sensor, tomando en cuenta tanto el camino en que se propaga la energía como la cantidad de energía que interactúa con el objeto observado. De esta manera, la radiancia es clave para obtener una comprensión precisa de las características físicas del objeto, tales como su temperatura, composición o estructura.



En este contexto, la radiancia espectral es de gran relevancia, ya que no se limita a medir la radiancia total, sino que la descompone en función de la longitud de onda, proporcionando información más específica sobre diferentes bandas del espectro electromagnético. La radiancia espectral se denota como  $L_\lambda = dL/d\lambda$ , donde  $\lambda$  es la longitud de onda, y se mide en vatios por metro cuadrado, estereorradián y micrómetro ( $W/m^2 \text{ sr } \mu\text{m}^{-1}$ ). Esta descomposición es esencial en la teledetección, ya que permite analizar cómo distintas longitudes de onda interactúan con el objeto, lo cual es crítico para la interpretación precisa de imágenes obtenidas desde satélites o sensores aéreos. Al descomponer la radiancia por longitudes de onda, se pueden revelar detalles ocultos que no serían visibles con una radiancia total, aportando información mucho más detallada y útil sobre las características del objeto.

Aunque las magnitudes físicas involucradas en teledetección suelen depender de la longitud de onda, esta dependencia se omite frecuentemente en las notaciones para simplificar. Sin embargo, la variación en la longitud de onda es crucial para entender cómo diferentes materiales reaccionan ante la energía electromagnética, ya sea reflejando, absorbiendo o emitiendo radiación en diferentes bandas del espectro. Por ejemplo, en estudios de vegetación, la radiancia en el infrarrojo cercano puede ofrecer datos sobre el estado de salud de las plantas, mientras que, en cuerpos de agua, las longitudes de onda del espectro visible son más útiles para evaluar la calidad del agua. Esta capacidad para analizar la radiancia en función de la longitud de onda hace que la radiancia espectral sea una herramienta indispensable para diversas aplicaciones, como la monitorización ambiental, el análisis del cambio climático y la gestión de recursos naturales.



### **2.2.3. Fundamentos la Observación Remota**

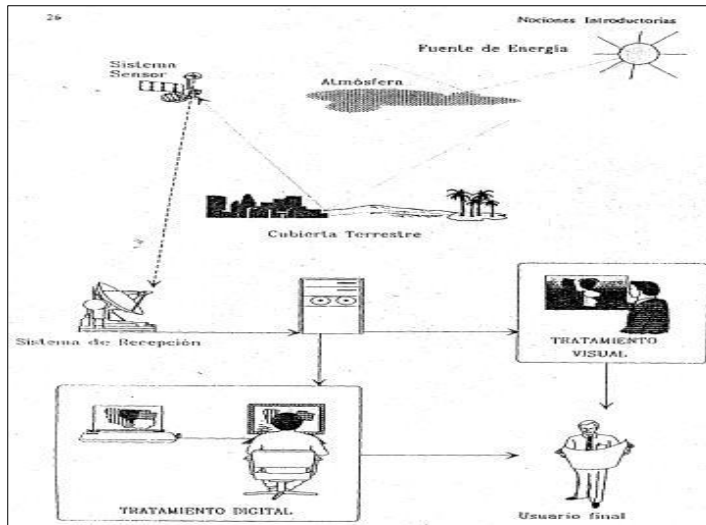
La teledetección es una técnica esencial que permite recopilar información de áreas específicas de la superficie terrestre sin necesidad de contacto físico directo. Este proceso se basa en la interacción entre el sensor, ubicado en satélites o aeronaves, y los elementos que están siendo observados. Para que dicha interacción tenga lugar, el sensor debe recibir radiación electromagnética emitida o reflejada por el área o los objetos analizados. De forma similar a cómo los humanos perciben los objetos dentro del espectro visible, los sensores de teledetección solo pueden captar información dentro de las longitudes de onda que son capaces de detectar. En otras palabras, si no hay energía electromagnética en el rango que el sensor puede registrar, no se puede obtener información sobre el área en estudio.

Un ejemplo de esto es cuando nos encontramos en una habitación a oscuras: no podemos ver los objetos porque no hay luz en el espectro visible que los ilumine. Del mismo modo, los sensores remotos no pueden detectar características de una superficie si no hay radiación electromagnética en el rango que estos pueden captar (Chuvienco, E. 2010, p. 45). El éxito de la teledetección, por tanto, depende en gran medida de la fuente de energía disponible, ya sea natural, como la luz del sol, o artificial, como la energía emitida por radares activos.

Además, la teledetección no se limita solo al espectro visible, sino que también abarca un amplio rango de longitudes de onda, desde el infrarrojo cercano hasta las microondas. Esto permite obtener información valiosa sobre aspectos no visibles, como la humedad del suelo, la temperatura de la superficie o el estado de la vegetación. Así, esta herramienta se vuelve esencial para estudiar fenómenos ambientales, monitorear recursos naturales, gestionar la agricultura, planificar áreas urbanas y prevenir desastres, entre otros.

**Figura 1**

*Componente de un sistema de Teledetección*



Nota. Chuvieco E. "Fundamentos de la teledetección"

### 2.2.3.1. El Espectro Eletromagnético.

El espectro electromagnético se inmiscuye entre muchas de las formas de energía radiante organizada según su longitud de onda o su frecuencia, describiendo la gama completa de radiación electromagnética. esta radiación puede manifestarse en distintas regiones, que abarcan desde las ondas de radio, con longitudes de onda más extensas, hasta los rayos gamma, caracterizados por tener las frecuencias más elevadas y longitudes de onda extremadamente cortas. cada rango del espectro tiene propiedades y comportamientos específicos, lo que permite su aplicación en diversos campos, como en la astronomía, la medicina, y las telecomunicaciones, entre otros.

Dentro del espectro, la región visible es la franja que el ojo humano puede percibir, con un intervalo de longitudes de onda que varía aproximadamente entre los 380 y 750 nanómetros. sin embargo, muchas aplicaciones tecnológicas e investigaciones se apoyan en otras regiones del espectro, como los rayos

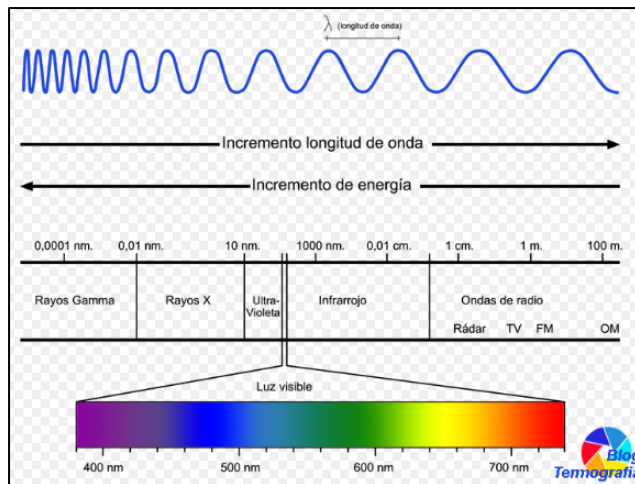


infrarrojos y ultravioletas, que, aunque no son visibles para los humanos, pueden ser detectados mediante herramientas especializadas (Universidad de Murcia, 2010, p. 1).

La radiación que emiten los elementos varía en función de sus características físicas, como la temperatura, la humedad o la composición del material, lo que permite que las imágenes satelitales ofrezcan información detallada y precisa. Los sensores instalados en los satélites están diseñados para captar esta radiación en distintas bandas del espectro electromagnético, como el infrarrojo, el visible e incluso las microondas. A través del procesamiento de estas imágenes, es posible identificar patrones, cambios y características específicas de los elementos observados, facilitando el análisis de grandes extensiones de terreno de manera eficiente y en tiempo real.

El procesamiento de imágenes satelitales implica diversas etapas, como la corrección geométrica y radiométrica de las imágenes para mejorar su precisión, así como la clasificación de los datos obtenidos para diferenciarlos según las propiedades de los objetos observados. Por ejemplo, en el ámbito agrícola, esta técnica permite monitorizar la salud de los cultivos, identificar áreas afectadas por sequías o plagas y optimizar la gestión de los recursos hídricos. En meteorología, se emplea para predecir fenómenos climáticos y realizar estudios sobre el cambio climático. Una de las grandes ventajas del procesamiento de imágenes satelitales es su capacidad para ofrecer información detallada de lugares remotos o de difícil acceso, lo que sería inviable con métodos tradicionales.

Figura 2

*Espectro Electromagnético*

*Nota:* Universidad de Murcia. España.

**2.2.3.2. Radiación Electromagnética.**

Según la Universidad de Murcia (2014), la radiación electromagnética infiere la propagación de energía en forma de ondas electromagnéticas, las cuales viajan a través del espacio a la velocidad de la luz. Esta radiación, compuesta de campos eléctricos y magnéticos oscilantes que interactúan entre sí, no requiere de un medio material para desplazarse, lo cual la distingue de otras formas de transmisión de energía, como las ondas de sonido que necesitan un medio físico, como el aire o el agua, para propagarse.

La radiación electromagnética incluye una variedad de tipos de ondas que se organizan según su frecuencia y longitud de onda en el espectro electromagnético, iniciando en las ondas de radio hasta los rayos gamma. Este espectro se divide en distintas regiones: ondas de radio, microondas, infrarrojo, visible, ultravioleta, rayos X y rayos gamma. Cada una de estas formas de radiación posee propiedades únicas y varía en función de la frecuencia y longitud de onda, características que afectan cómo interactúan con la materia y qué



aplicaciones pueden tener en campos como la física, la medicina, las telecomunicaciones y la industria.

Dentro de este espectro, las ondas con frecuencias inferiores y longitudes de onda más largas (como las ondas de radio) tienen la capacidad de recorrer grandes distancias y atravesar ciertos materiales sin perder mucha intensidad, lo que las hace ideales para aplicaciones en la comunicación a larga distancia. En contraste, las radiaciones de alta frecuencia y corta longitud de onda, como los rayos X y los rayos gamma, son capaces de penetrar incluso materiales densos, y su alta energía las hace útiles en la medicina para diagnóstico y tratamiento, así como en el análisis de estructuras atómicas y moleculares.

La radiación electromagnética es emitida por diversas fuentes, tanto naturales como artificiales. Las fuentes naturales incluyen el sol, que emite una amplia gama de radiación electromagnética, desde la luz visible hasta la radiación ultravioleta, mientras que las fuentes artificiales abarcan desde dispositivos de comunicación, como las antenas de radio y televisión, hasta equipos médicos como las máquinas de rayos X. La interacción de esta radiación con la materia es un aspecto fundamental en múltiples campos de estudio, ya que permite la realización de diagnósticos, la transmisión de información, la generación de energía, y otros procesos fundamentales para el desarrollo tecnológico y científico (p. 12):

a. Reflexión: La energía o radiación es enviada de vuelta al espacio. Este fenómeno ocurre cuando el objeto refleja la radiación en un ángulo igual y opuesto al ángulo de incidencia, debido a que el objeto o superficie puede ser lisa o rugosa (Pérez y Muñoz, 2006, p. 80).

b. Absorción: La radiación pasa a incrementar la energía del cuerpo que la recibe, elevando su temperatura. En este caso, la mayor parte de la energía incidente se convierte en calor dentro del material o superficie.

c. Transmisión: La radiación se transmite a través del cuerpo hacia otro medio. En este proceso, la energía atraviesa el material sin ser absorbida ni reflejada.

Estos mecanismos de interacción determinan cómo los sensores de teledetección perciben y procesan la información sobre los objetos observados.

### **2.2.3.3. Imágenes Satelitales.**

#### **A) Pre procesamiento de imágenes satelitales**

El preprocesamiento de imágenes satelitales es una fase esencial en el análisis de datos remotos, que busca mejorar la calidad de las imágenes y reducir posibles errores antes de aplicar técnicas de interpretación y análisis. Este proceso incluye una serie de correcciones y ajustes destinados a optimizar los datos capturados por los sensores satelitales, eliminando o minimizando distorsiones causadas por factores como la atmósfera, el ángulo de captación del sensor, la radiación solar y las condiciones de iluminación.

En el preprocesamiento, se llevan a cabo varios pasos, siendo uno de los más comunes la corrección radiométrica, que ajusta los niveles de brillo de las imágenes para normalizar las diferencias de radiancia debidas a la variabilidad en la reflectancia de la superficie terrestre y en las condiciones atmosféricas. Otro proceso relevante es la corrección geométrica, que alinea las imágenes a un sistema de coordenadas específico, compensando deformaciones producidas por



el movimiento y posición del satélite, el relieve del terreno y el sistema de proyección utilizado. Esto permite que las imágenes sean comparables entre sí y que se puedan superponer sobre mapas y datos geográficos con alta precisión.

Otra tarea importante en el preprocesamiento es la corrección atmosférica, cuyo objetivo es reducir los efectos de la atmósfera en la reflectancia de la superficie terrestre, como la dispersión y absorción de luz por gases y partículas. Este paso asegura que las mediciones de reflectancia sean más representativas de las características reales de la superficie observada.

Se pueden incluir técnicas de filtrado y reducción de ruido, las cuales eliminan interferencias y suavizan la imagen para facilitar una interpretación más precisa de los datos. Esta fase de preprocesamiento permite obtener imágenes de alta calidad, que son fundamentales para el análisis de cambios ambientales, el monitoreo de recursos naturales y la detección de patrones y tendencias en estudios de teledetección. (Chuvieco, E. 1995, p. 38).

Una combinación destacada es la de las bandas 4, 3 y 2, conocida como "falso color". esta combinación permite representar la vegetación de manera prominente, ya que la banda 4 (infrarrojo cercano) resalta las áreas verdes, permitiendo distinguir distintos niveles de vigor y salud vegetal. Su utilidad en estudios de vegetación radica en que las plantas reflejan fuertemente el infrarrojo cercano cuando están sanas, lo cual facilita la identificación de zonas verdes y permite monitorear de manera precisa su desarrollo.

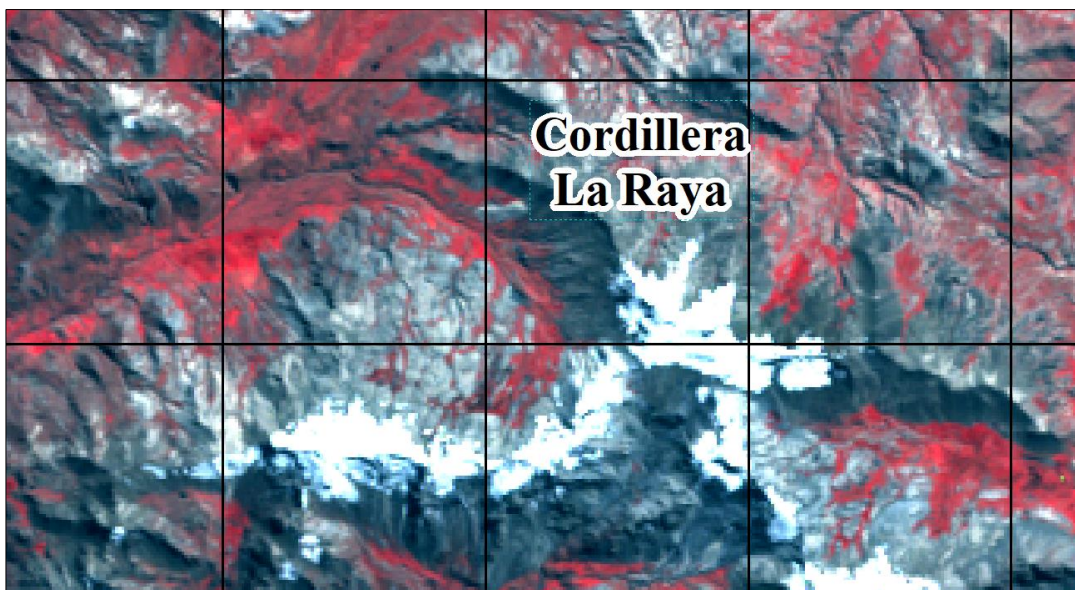
Además de su aplicación en estudios vegetativos, esta combinación de bandas es esencial para el monitoreo y seguimiento de redes de drenaje y cuerpos de agua. Gracias a la representación en falso color, los cuerpos de agua,

ríos y zonas húmedas se destacan de su entorno, facilitando el análisis de su distribución y cambios con el tiempo. el patrón de drenaje se observa claramente, lo cual es crucial para estudios hidrológicos, ya que permite identificar problemas de erosión, pendientes de escorrentía y patrones de infiltración en el suelo.

El uso de la combinación 4, 3, 2 en el análisis de patrones de suelo también es significativo, ya que permite identificar diferentes tipos de suelo, áreas expuestas o sin vegetación y fases de erosión, lo cual es útil para la planificación agrícola y la conservación del suelo. asimismo, esta combinación es empleada en la evaluación de las diferentes fases de crecimiento de los cultivos, proporcionando datos visuales sobre la germinación, desarrollo y madurez de los mismos, facilitando la toma de decisiones sobre prácticas de cultivo, fertilización y riego.

### Figura 3

*Combinación de bandas 4, 3, 2. landsat 7*



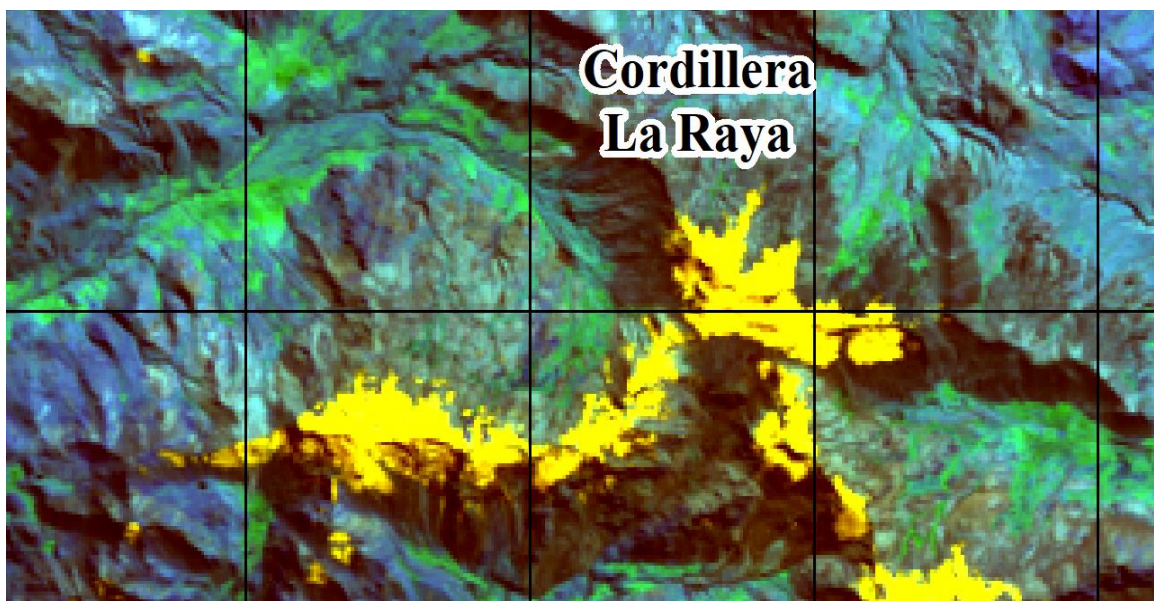
*Nota: Se muestra un tipo de combinación de bandas.*

La combinación de bandas 1, 4 y 5 en teledetección ofrece una forma efectiva de resaltar y diferenciar diversas características del terreno. En esta combinación:

(i) Tonalidades de nieve: Se destacan con un color dorado, lo que permite una visualización clara de las áreas cubiertas por nieve. (ii) Superficie cubierta de rocas: Aparece en un tono azul, facilitando la identificación de áreas rocosas. (iii) Zonas de vegetación: Se representan con un color verde intenso, permitiendo una diferenciación precisa de las áreas vegetativas. Esta combinación es útil para estudios que requieran una diferenciación clara entre estos elementos, como en el análisis de cobertura terrestre y monitoreo ambiental.

#### Figura 4

*Combinación de bandas 1, 4, 5. landsat 7*



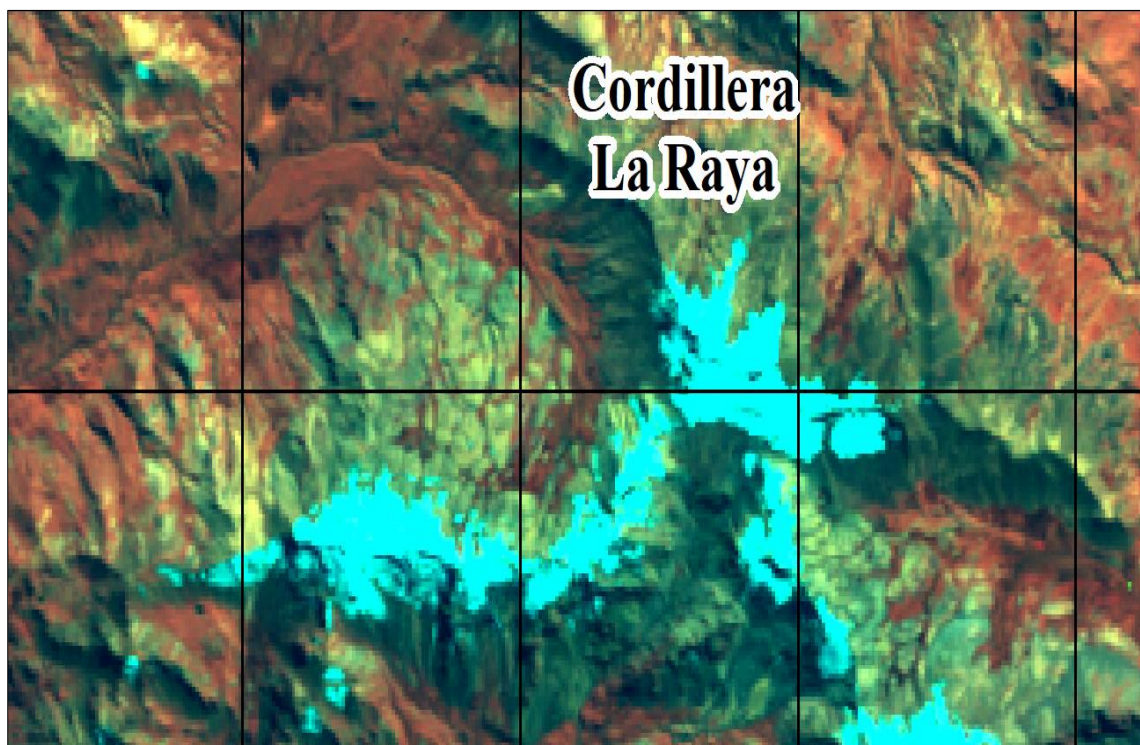
*Nota:* Se muestra un tipo de combinación de bandas.

La combinación de bandas en teledetección permite resaltar diferentes características del terreno según las necesidades del análisis. En el caso de: Combinación de bandas 5, 3, 1: Esta combinación resalta la textura topográfica del terreno. Es útil para observar detalles en la estructura y forma del relieve,

proporcionando información sobre las variaciones en la superficie terrestre. Combinación de bandas 7, 3, 1: Esta combinación es efectiva para identificar diferentes tipos de rocas. Permite distinguir variaciones en las composiciones minerales y texturas rocosas, lo que ayuda en estudios geológicos y en la identificación de formaciones rocosas.

## Figura 5

*Combinación de bandas 5, 3, 1. landsat 7*



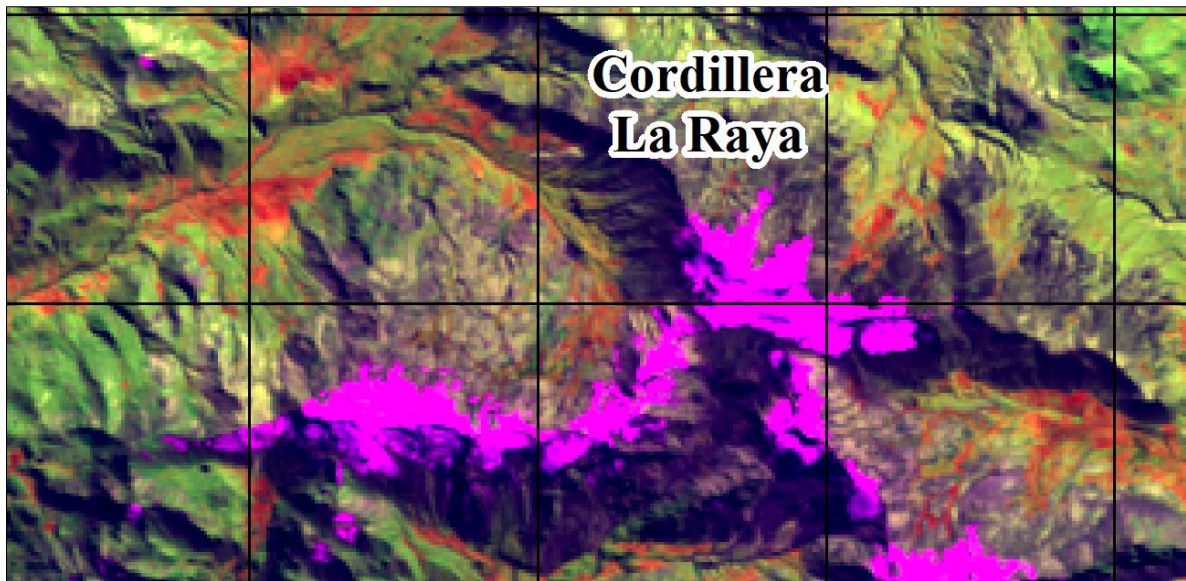
*Nota:* Se muestra un tipo de combinación de bandas.

La combinación de bandas 4, 5 y 1 en teledetección se utiliza comúnmente para estudios de vegetación. En esta configuración: (i) Banda 4 (Rojo): Resalta las áreas de vegetación y ayuda a distinguirlas de otras coberturas terrestres. (ii) Banda 5 (infrarrojo cercano): Aumenta la sensibilidad para detectar varias fases del crecimiento de las plantas y el estrés hídrico que puedan presentar. Esta banda es especialmente útil para identificar cambios en la salud de la vegetación. (iii) Banda

1 (Azul): Complementa la imagen añadiendo detalles sobre la textura y características superficiales. la combinación de estas bandas permite una evaluación más precisa del estado de la vegetación, ayudando a identificar tanto la cobertura vegetal como posibles problemas relacionados con el agua.

## Figura 6

*Combinación de bandas 4, 5, 1. landsat 7*



*Nota:* Se muestra un tipo de combinación de bandas.

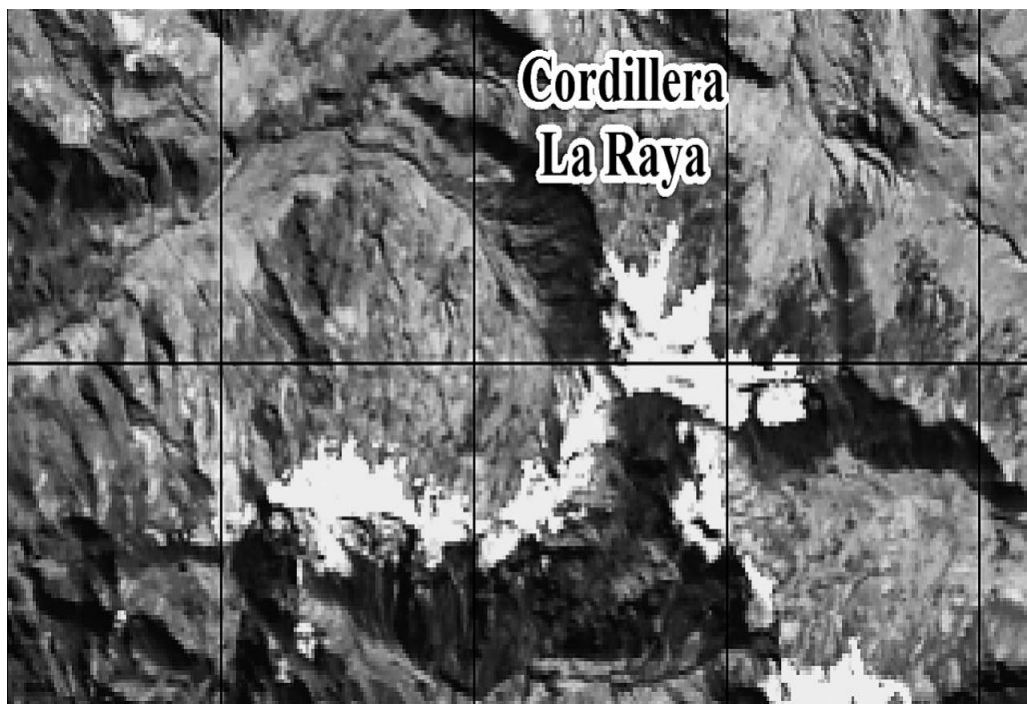
Así, al utilizar la combinación de bandas 4, 5 y 1, se puede reducir la redundancia en la información, facilitando la discriminación de grupos de niveles digitales (ND) homogéneos dentro de la matriz de datos. Este proceso, conocido como clasificación, permite identificar y agrupar áreas con características similares, optimizando la interpretación de la imagen y la identificación de patrones o tipos de cobertura terrestre específicos.

## B) ND (Niveles digitales)

El nivel digital (ND) en imágenes digitales es un valor numérico que representa la intensidad de una imagen en una escala de grises. En una imagen de 8 bits, los niveles digitales varían de 0 a 255, donde: (i) 0 representa el negro absoluto, (ii) 255 representa el blanco absoluto, (iii) los valores intermedios corresponden a diferentes tonos de gris. Estos valores son fundamentales para el procesamiento y análisis de imágenes, ya que permiten cuantificar la intensidad de la radiación reflejada o emitida por los objetos en la imagen, lo cual es esencial para la interpretación y clasificación en teledetección. La escala de grises ayuda a representar de manera visual la información numérica capturada por el sensor del satélite.

### Figura 7

*Niveles digitales (ND) de una sección de la Raya del año 2000*



*Nota.* Se muestra un tipo de combinación de bandas.



### C) Correcciones geométricas – georreferenciación

La corrección geométrica se enfoca en ajustar la ubicación de los píxeles en la imagen para que correspondan correctamente con las coordenadas geográficas del área observada, sin alterar los valores numéricos de los niveles digitales (ND) que representan la intensidad de la imagen. A diferencia de las correcciones radiométricas, que ajustan los ND para mejorar la calidad de la imagen, la corrección geométrica se centra en: (i) Reubicar los píxeles: Ajustar la posición de los píxeles para que la imagen digital coincida con el sistema de coordenadas geográficas real. (ii) Transformación de la geometría de la imagen: Utilizar funciones matemáticas para modificar la geometría de la imagen de manera que se ajuste a distorsiones o errores de perspectiva. (iii) Mantener la integridad de los ND: No se altera la intensidad de la imagen; solo se corrige la ubicación de los píxeles para que la imagen sea espacialmente precisa. Este proceso es esencial para asegurar que las imágenes satelitales o aéreas se alineen correctamente con otros datos geoespaciales y se puedan realizar análisis precisos en función de las coordenadas geográficas reales. (Machine Perception and Intelligent Robotics, 2014).

Las correcciones geométricas y la georreferenciación son pasos cruciales en el procesamiento definitivo de imágenes satelitales, orientados a alinear y ajustar las imágenes a un sistema de coordenadas específico, asegurando que representen con precisión la ubicación de los objetos en la superficie terrestre. Este proceso permite que las imágenes puedan integrarse con otros datos geográficos, facilitando análisis comparativos y estudios multitemporales.



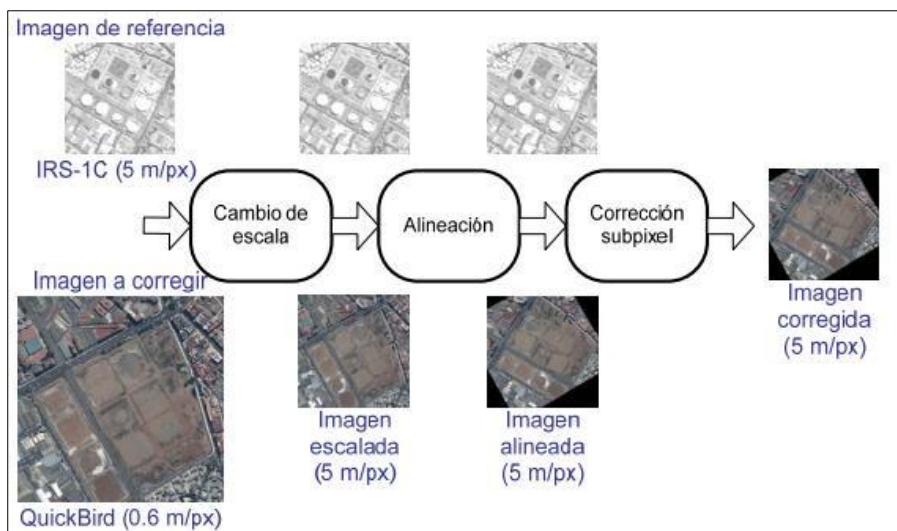
La Corrección Geométrica implica la eliminación de distorsiones causadas por el movimiento del satélite, la curvatura de la Tierra, la topografía del terreno y variaciones en el ángulo de captura del sensor. Estas distorsiones pueden alterar la forma y posición de los elementos en la imagen, por lo que se aplican transformaciones geométricas para corregirlas, logrando que la imagen se ajuste a la realidad geográfica.

La Georreferenciación consiste en asignar a cada píxel de la imagen una coordenada espacial específica dentro de un sistema de referencia, como UTM o WGS84. Para ello, se identifican puntos de control en la imagen que correspondan a ubicaciones conocidas en el terreno, como intersecciones de carreteras o estructuras notables, los cuales permiten alinear la imagen de forma precisa. Esto es especialmente importante en estudios que requieren la superposición de imágenes o su comparación a lo largo del tiempo, ya que asegura que las variaciones observadas en la imagen se deban a cambios reales en el terreno y no a problemas de alineación o escala.

Ambas correcciones, geométrica y georreferencial, son fundamentales para obtener imágenes precisas y fiables, sobre todo en aplicaciones de monitoreo ambiental, planificación territorial, estudios de cambio climático y evaluación de recursos naturales.

**Figura 8**

*Esquema general del procedimiento de corrección geométrica previo a la detección de cambios.*



*Nota.* Machine Perception and Intelligent Robotics

#### D) Correcciones atmosféricas

La presencia de componentes atmosféricos, como gases y vapor de agua, puede afectar significativamente la calidad de los datos obtenidos a través de teledetección. Estos componentes pueden introducir diversos tipos de errores y distorsiones en las imágenes satelitales, lo que puede influir en los cálculos e índices necesarios para la investigación.

(i) Absorción Atmosférica:

- Gases Atmosféricos: los gases en la atmósfera, como el dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ), el ozono ( $\text{O}_3$ ) y el vapor de agua, pueden absorber ciertas longitudes de onda de la radiación electromagnética. Esto significa que parte de la radiación que se dirige hacia la superficie terrestre nunca llega al sensor, reduciendo la cantidad de información útil capturada.



- **Impacto en la Radiación:** la absorción atmosférica puede reducir la intensidad de la radiación en ciertas bandas del espectro, lo que afecta la precisión de los datos y puede llevar a subestimaciones o sobreestimaciones de las características del terreno.
- (ii) **Dispersión Atmosférica:**
- **Partículas en la Atmósfera:** Partículas como polvo, humo o aerosoles pueden dispersar la radiación que pasa a través de la atmósfera. La dispersión de Rayleigh y Mie son dos tipos de dispersión que afectan la radiación electromagnética.
  - **Efecto en las imágenes:** la dispersión puede causar un "haze" o neblina en las imágenes, disminuyendo el contraste y la claridad de las imágenes. Esto puede dificultar la identificación de características y la precisión en la interpretación de los datos.
- (iii) **Corrección Atmosférica:**
- **Modelos de Corrección:** Para mitigar los efectos de la atmósfera, se utilizan modelos de corrección atmosférica que estiman y corrigen estos efectos. Estos modelos pueden ajustar las imágenes para compensar la absorción y dispersión atmosférica, mejorando la calidad y precisión de los datos.
  - **Métodos de Corrección:** Incluyen técnicas como la corrección de atmósfera de superficie, la corrección de atmósfera con base en datos de referencia y la aplicación de algoritmos específicos para ajustar los niveles digitales y mejorar la exactitud radiométrica.
- (iv) **Impacto en el análisis:**
- **Índices y Cálculos:** la presencia de errores atmosféricos puede afectar los índices de vegetación, el análisis de cambios en la cobertura del suelo, y otros



cálculos importantes en la teledetección. Es crucial aplicar correcciones adecuadas para asegurar que los resultados reflejen con precisión las condiciones en la superficie terrestre.

En resumen, los componentes atmosféricos pueden introducir errores en las imágenes capturadas por los sensores de teledetección. la aplicación de correcciones atmosféricas es fundamental para obtener datos precisos y confiables que puedan ser utilizados para estudios y análisis en diversas áreas, como la evaluación del cambio climático, el monitoreo de recursos naturales, y la gestión del territorio.

## **E) Correcciones radiométricas**

Definida la radiación electromagnética, esta se propaga a través de la atmósfera y la superficie terrestre. Durante este trayecto, su interacción con la atmósfera y los diversos componentes presentes en ella afecta la longitud de onda, la intensidad, la distribución espectral e incluso la dirección original de la radiación. la atmósfera puede causar dos efectos principales: absorción y dispersión. Estos efectos introducen ruido que puede impactar significativamente en la teledetección, por lo que es crucial corregirlo (Administración de Parques Nacionales, 2005, p.21).

la corrección geométrica es un concepto amplio que implica ajustar los niveles digitales (ND) originales de una imagen para que se acerquen a los valores que se obtendrían en una captura ideal. Este proceso incluye la corrección de distorsiones provocadas por la atmósfera, así como problemas radiométricos causados por fallos en el sensor, ya sea por desgaste o desalineación (Chuvieco, E., 2014, p.242).



## F) Índices espectrales

Estas son técnicas y métodos utilizados para identificar y resaltar coberturas o elementos de interés en imágenes satelitales. Las imágenes satelitales están compuestas por datos digitales organizados en una matriz numérica, que proporciona información espectral sobre diversos componentes de la Tierra, como agua, suelo, vegetación, nieve, entre otros. A través de algoritmos y operaciones algebraicas, estos datos pueden ser procesados para crear subproductos, es decir, imágenes en las que se destacan los elementos de interés y se refleja la información relevante según el procedimiento empleado, permitiendo así una mejor visualización de las características del objeto de estudio (Moreno, A., 2010, p.15).

## G) Clasificación supervisada

Según el INGEMMET (2005), emplear dicha técnica nos ha de permitir identificar cuáles son las áreas representativas por cada categoría, siempre y cuando el usuario tenga reconocida las características básicas del terreno. Basándose en esta información, el software encargado del procesamiento de imágenes calcula estadísticas básicas para cada categoría (como media, rango, desviación estándar, etc.), utilizando los niveles digitales (ND) de cada píxel para definir cada clase. Luego, el software asigna el restante de los píxeles de la imagen a las categorías correspondientes según su similitud en niveles digitales (p.3).

La clasificación supervisada es una técnica utilizada en el análisis de imágenes satelitales, que permite categorizar los píxeles de una imagen en distintas clases o categorías de acuerdo con sus características espectrales. Este método requiere el uso de áreas de entrenamiento previamente conocidas y definidas por el analista, quien selecciona regiones representativas de cada clase



que se desea identificar, como cuerpos de agua, áreas urbanas, vegetación, suelo descubierto, entre otras. Estas áreas de entrenamiento proporcionan al sistema los patrones espectrales específicos de cada categoría, permitiendo que el algoritmo clasifique de manera automática los píxeles de la imagen en función de las clases establecidas.

En el proceso de clasificación supervisada, el algoritmo compara cada píxel de la imagen con las firmas espectrales de las áreas de entrenamiento para asignarle una categoría. Existen distintos algoritmos de clasificación supervisada, como el de máxima verosimilitud, el de distancia mínima y el de vecinos más cercanos, cada uno con enfoques y criterios de clasificación diferentes. La elección del algoritmo adecuado depende de la naturaleza del estudio y de la precisión deseada, ya que algunos métodos ofrecen mayor precisión, mientras que otros son más rápidos o sencillos de implementar.

Este método de clasificación es ampliamente utilizado en estudios de cambio de cobertura terrestre, monitoreo de vegetación, detección de cuerpos de agua y en análisis de uso del suelo, debido a su capacidad para identificar y cuantificar áreas específicas dentro de una región de interés. Al final del proceso, se obtiene una imagen clasificada en la que cada píxel pertenece a una categoría determinada, lo cual facilita el análisis espacial y la interpretación de datos para estudios ambientales, de planificación urbana, y de gestión de recursos naturales.

## **H) Clasificación no supervisada**

Es amplia la diferencia con la clasificación supervisada, pues el usuario no necesita tener un conocimiento a modo de antecedente detallado sobre el área de estudio o el elemento de interés. En este enfoque, se define el número con el inicio



de las categorías o "clases" que se desea obtener, luego, el software asigna automáticamente los píxeles a estas clases basándose en la similitud de los niveles digitales, utilizando procedimientos estadísticos para realizar la asignación (INGEMMET, 2005, p.3).

La clasificación no supervisada es un método de análisis de imágenes satelitales en el que los píxeles se agrupan automáticamente en distintas clases o categorías sin que el analista establezca áreas de entrenamiento previas. A diferencia de la clasificación supervisada, en este proceso el algoritmo organiza los píxeles en grupos o "clústeres" según sus características espectrales similares, sin conocimientos previos sobre los tipos de superficie o categorías que representan. Este método es útil cuando se tiene poca información inicial sobre el área de estudio o cuando se busca identificar patrones desconocidos en los datos.

Los algoritmos más comunes en la clasificación no supervisada incluyen el algoritmo de k-medias y el de clasificación de máxima entropía, que determinan los grupos o clases óptimos dentro de la imagen. Estos algoritmos agrupan los datos basándose en similitudes de reflectancia, formando categorías que luego pueden ser interpretadas y etiquetadas por el analista según las características del área de estudio. La clasificación no supervisada se aplica comúnmente en estudios exploratorios, como la identificación de nuevos tipos de vegetación, análisis preliminares de uso de suelo y detección de cuerpos de agua.

## **I) Índice de nieve de diferencia normalizada (NDSI)**

Este índice facilita la creación de mapas que muestran la distribución de nieve en la superficie y permite estimar sus características usando datos obtenidos por teledetección. En el rango del visible, distinguir entre nieve y nubes es



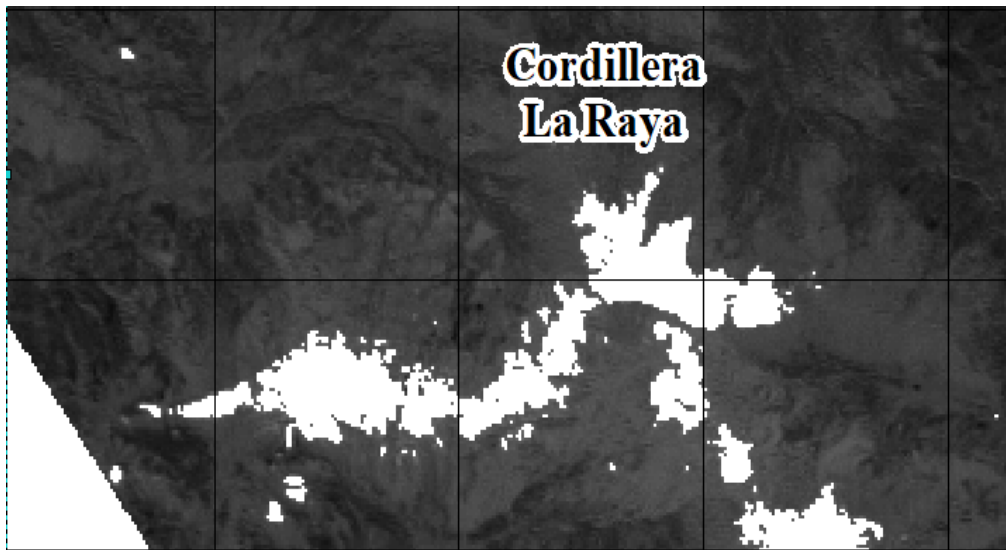
complicado; sin embargo, rango de infrarrojo medio es más sencillo puesto que los cristales de hielo en las nubes son más pequeños que los fragmentos de nieve y, por lo tanto, absorben menos radiación en este rango de banda del espectro.

El Índice de Nieve de Diferencia Normalizada (NDSI, por sus siglas en inglés) es una métrica calculada a partir de una o más imágenes de satélite, utilizada para detectar y monitorear la presencia de nieve sobre la superficie terrestre. Este índice permite distinguir la nieve de otros elementos como nubes o superficies no vegetadas al analizar la reflectancia en bandas específicas del espectro electromagnético. El NDSI se calcula utilizando las bandas de denominación verde y del infrarrojo de onda corta (SWIR), ya que la nieve refleja con alta intensidad en la banda verde y con baja intensidad en la banda infrarroja de onda corta, creando un contraste ideal para su identificación.

Los valores resultantes del NDSI varían entre -1 y 1, donde los valores cercanos a 1 indican alta presencia de nieve, mientras que valores cercanos a 0 indican ausencia de nieve. Este índice es fundamental en estudios de glaciología, monitoreo de masas de nieve estacionales y evaluación de cambio climático, ya que permite cuantificar áreas de cobertura de nieve en diferentes momentos del tiempo. La precisión del NDSI lo convierte en una herramienta indispensable en el monitoreo de recursos hídricos, dado que la nieve constituye una reserva importante de agua en muchas regiones.

**Figura 9**

*NDSI del glaciar la Raya 2021, mediante el software ArcMap.*



*Nota.* Se muestra un tipo de combinación de bandas.

Además, la nieve suele reflejar más luz en el visible, especialmente en la banda azul, y presenta una textura más uniforme en comparación con las nubes. Por lo tanto, para calcular un índice de nieve no normalizado, es necesario usar bandas del azul y del infrarrojo medio. Este algoritmo, NDSI, relaciona estas bandas para generar una imagen en la que los altos valores de Niveles Digitales (ND) indican la presencia de nieve y los bajos valores representan otras coberturas (Moreno, A., 1996, p.32).

#### **J) Índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI)**

Para evaluar la densidad de vegetación en un área, los investigadores deben examinar desde una diferente longitud de onda en el espectro visible e infrarrojo cercano reflejadas por las plantas. Al igual que al observar a través de un prisma, la luz solar se descompone en varias longitudes de onda. Al interactuar con un objeto, son reconocidas las longitudes de onda absorbidas mientras que otras son reflejadas, dependiendo de las características del objeto. En el caso de la



vegetación la clorofila presente en el haz de las hojas absorbe intensamente la luz visible, en el rango de  $0.4 \mu\text{m}$  a  $0.7 \mu\text{m}$ , para la fotosíntesis. Por otro lado, dicha estructura celular del haz de la hoja refleja de manera intensa la luz en el infrarrojo cercano (de  $0.7$  a  $1.1 \mu\text{m}$ ). Una planta más saludable reflejará más luz en este rango (NASA, 2010).

El Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI, por sus siglas en inglés) es una medida clave en el análisis de imágenes satelitales, empleada para hallar densidad y estado de destacable de la vegetación en áreas determinadas. El NDVI se calcula a partir de la reflectancia registrada en las bandas del infrarrojo cercano (NIR) y el rojo (Red) del espectro electromagnético. Las plantas sanas y densas reflejan gran parte de la radiación en el infrarrojo cercano y absorben en el rango del rojo, creando un contraste que permite diferenciar zonas con vegetación vigorosa de aquellas con vegetación escasa o ausente.

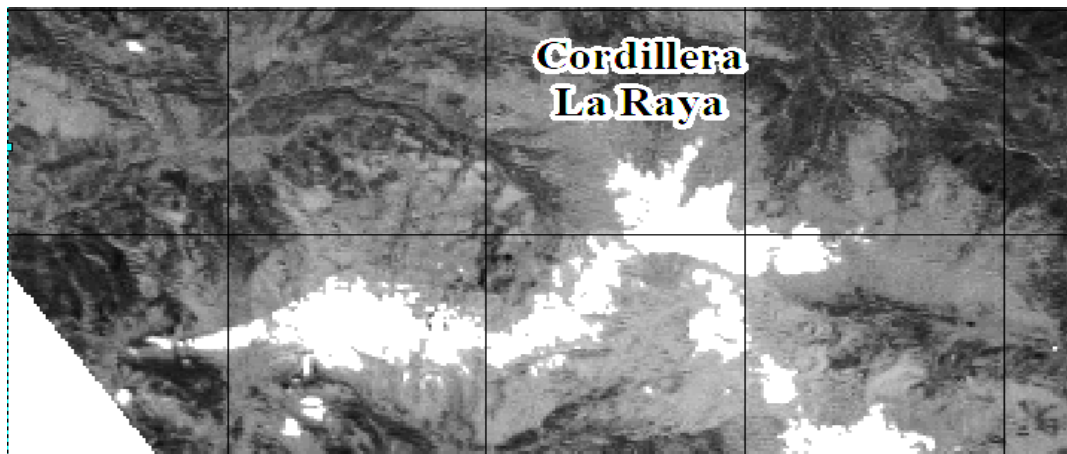
Este índice genera valores entre  $-1$  y  $1$ , donde los valores positivos adyacentes a  $1$  indican vegetación amplia y de signo saludable, mientras que valores cercanos a  $0$  representan suelos desnudos o sin vegetación. Los valores negativos, por otro lado, suelen indicar la presencia de agua, nubes o nieve.

El NDVI es ampliamente utilizado en estudios de cambio de cobertura terrestre, monitoreo de ecosistemas y gestión agrícola. Esta métrica permite a los investigadores y gestores ambientales observar la evolución de la vegetación a lo largo del tiempo, evaluar el impacto de factores como la sequía o las prácticas agrícolas, y determinar las condiciones de crecimiento en las diferentes etapas del ciclo agrícola. La alta sensibilidad del NDVI lo convierte en una herramienta de gran

valor en la teledetección, ayudando a optimizar la gestión de recursos naturales y a monitorear los efectos del cambio climático en los ecosistemas vegetativos.

### Figura 10

*NDVI del glaciar la Raya, mediante el software Qgis.*



*Nota:* Se muestra un tipo de combinación de bandas.

Según Harris (2012), una empresa especializada en el desarrollo de equipos de comunicaciones y teledetección, el Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI) es una herramienta esencial para evaluar la condición y el vigor de la vegetación en diferentes entornos. Este índice se basa en la combinación de datos de reflectancia espectral que permiten cuantificar la proporción de radiación solar que es absorbida y reflejada por las áreas con clorofila, el principal pigmento en las hojas que facilita la fotosíntesis y es un indicador directo de la salud vegetal.

El NDVI opera en un rango de valores entre -1 y 1, en el cual los valores más cercanos a 1 representan vegetación saludable y densa, caracterizada por una alta reflectancia en el infrarrojo cercano (NIR) y una baja reflectancia en la banda del rojo (Red), debido a la absorción de luz por la clorofila. En cambio, valores



cercanos a 0 o negativos reflejan áreas sin vegetación, cuerpos de agua, suelos desnudos u otras superficies que no contienen plantas verdes activas.

Para vegetación verde, el NDVI típicamente oscila entre 0.2 y 0.8, siendo los valores altos (por encima de 0.6) indicativos de una vegetación densa y en óptimas condiciones de salud, mientras que valores en el rango de 0.2 a 0.4 suelen indicar vegetación menos vigorosa o suelos parcialmente cubiertos de plantas. Esta escala permite que el NDVI sea ampliamente utilizado en estudios de agricultura, conservación de ecosistemas, gestión forestal y monitoreo del cambio climático, ya que ofrece una medida cuantificable del verdor y crecimiento vegetal en áreas específicas.

El uso del NDVI facilita, por tanto, el análisis multitemporal de la vegetación, posibilitando la observación de tendencias a lo largo del tiempo. Este índice es fundamental para anticipar situaciones como la deforestación, la desertificación y la degradación de tierras, y contribuye a una toma de decisiones más informada en temas de recursos naturales y desarrollo sostenible.

## 2.3. MARCO CONCEPTUAL

### Glaciar

Un glaciar es una extensa masa de hielo de gran espesor y densidad que se forma y se mantiene encima a la superficie terrestre gracias a la constante acumulación, compactación y recristalización de la nieve a lo largo de largos periodos de tiempo. Estos cuerpos de hielo se desarrollan principalmente en regiones de alta montaña o en zonas de alta latitud, donde las bajas temperaturas favorecen la acumulación de nieve durante las estaciones frías y limitan la fusión durante las estaciones cálidas. A medida que la nieve nueva se deposita sobre



capas anteriores, la presión ejercida genera la compactación necesaria para transformar la nieve en hielo, un proceso que da origen al glaciar. Su dinámica de avance o retroceso es un indicador sensible a las condiciones climáticas y al calentamiento global, ya que los cambios en su tamaño reflejan las variaciones en la temperatura y precipitación, así como otros factores ambientales que afectan la disponibilidad de agua en su estado sólido (Aguilón, A. 2012, p.1).

## **Cobertura**

La cobertura es el área ocupada por un tipo de superficie o ecosistema en una región específica y se constituye en una herramienta básica para definir, identificar y mapear áreas de interés ecológico. Esta noción permite analizar y clasificar el espacio geográfico en unidades homogéneas en función de forma físicas, biológicas y de uso. En términos ecológicos y geográficos, las coberturas se estructuran en diferentes categorías, organizadas jerárquicamente en clases amplias, como áreas vegetales, zonas degradadas, cuerpos de agua y áreas urbanizadas o construidas. Esta clasificación facilita la administración de recursos naturales y el análisis ambiental, proporcionando un marco que permite evaluar el estado y el uso de los suelos, la cobertura forestal, la extensión de áreas agrícolas, así como su potencial de conservación. Con un enfoque de jerarquización, estas unidades pueden subdividirse en categorías más detalladas según el tipo de vegetación, grado de erosión, presencia de cuerpos de agua permanentes o temporales, entre otros criterios (Miranda, 2010, p.1).

## **Cobertura glaciar**

La cobertura glaciar abarca vastas masas de hielo que se desarrollan en zonas con condiciones climáticas específicas, especialmente en regiones montañosas o de alta latitud, donde la temperatura se mantiene en 0°C o menos



durante gran parte del año. Este tipo de cobertura requiere un proceso de acumulación de precipitación en forma sólida, como nieve, granizo o hielo, que se acumula sobre el terreno durante varios años o incluso siglos. La tasa de acumulación debe superar la tasa de fusión, permitiendo que el hielo se acumule y permanezca. Debido a su importancia como indicadores del cambio climático, las coberturas glaciares son de especial interés en estudios ambientales y climáticos, ya que su retroceso o crecimiento puede proporcionar información valiosa sobre el estado del clima, la variación en las precipitaciones y el aumento de las temperaturas globales (Tejada, B., 2010).

### **Laguna glaciar**

Las lagunas glaciares se forman en las depresiones o cuencas que dejan los glaciares al retroceder, generando condiciones que permiten la acumulación de agua en estos espacios. Estas lagunas se llenan principalmente por la escorrentía de agua procedente del deshielo glaciar, la precipitación directa y, en algunos casos, la infiltración de aguas subterráneas. Estas masas de agua representan una fuente vital de agua dulce en muchas regiones de alta montaña y tienen un papel crucial en la regulación del flujo de agua en los ecosistemas cercanos. A medida que los glaciares retroceden, la formación de nuevas lagunas glaciares es un fenómeno que se observa con frecuencia, lo cual también implica posibles riesgos de desbordamiento o avalanchas de agua en caso de que las paredes de la laguna colapsen. Las lagunas glaciares son, por lo tanto, un componente fundamental del paisaje glaciar y constituyen indicadores del cambio climático y de la dinámica glaciar en el tiempo (Adam, et al., 2014, p. 238).



## Mapa temático

Un mapa temático es una representación geográfica diseñada para mostrar características o conceptos específicos de una región, poniendo énfasis en un aspecto concreto del espacio, como el uso del suelo, la distribución de tipos de vegetación, las zonas de riesgo natural o los recursos hídricos disponibles. A diferencia de los mapas topográficos, que representan el relieve, la infraestructura y otros elementos generales del territorio, los mapas temáticos destacan información seleccionada con un propósito determinado. Estas representaciones son fundamentales para el análisis de patrones espaciales y para la toma de decisiones en áreas como la conservación, el ordenamiento territorial y la gestión de recursos naturales, ya que ofrecen un enfoque visual que facilita la comprensión de fenómenos y la planificación de acciones específicas (ICA, 2010, p.1).

## Volumen

El volumen es una magnitud física que define la cantidad de espacio que ocupa un cuerpo en las tres dimensiones: alto, ancho y largo. Este concepto es esencial en el ámbito de la glaciología, ya que permite calcular el volumen de hielo contenido en un glaciar, lo cual es fundamental para estimar la cantidad de agua almacenada en forma de hielo. En términos ambientales, la medición precisa del volumen glaciar permite proyectar el impacto que el derretimiento de estas masas de hielo tendría en los caudales de los ríos y en la disponibilidad de agua para consumo humano, agricultura y ecosistemas acuáticos en las zonas aledañas. Por tanto, el volumen se convierte en un indicador crucial en la evaluación del cambio climático y su efecto en los recursos hídricos (Carlos, A. p.77).



## **Análisis multitemporal con imágenes satelitales**

El análisis multitemporal de imágenes satelitales permite examinar los cambios en la superficie terrestre a lo largo del tiempo, proporcionando una visión continua y objetiva de cómo evoluciona el uso y cobertura del suelo. Mediante la comparación de imágenes capturadas en diferentes periodos, este tipo de análisis es esencial para monitorear fenómenos como la deforestación, el avance de la desertificación, el retroceso glaciar y la expansión de zonas urbanas. Al disponer de imágenes de diversos momentos, el análisis multitemporal facilita la identificación de tendencias a largo plazo y ayuda en la toma de decisiones en materia de conservación de recursos naturales, ordenamiento territorial y mitigación de impactos ambientales. (Muñoz,p9).

## **Nevado**

El término nevado describe cualquier área o relieve natural cubierto de nieve, un fenómeno de precipitación en el cual diminutos cristales de hielo se depositan y se acumulan sobre la superficie terrestre, formando una capa blanca característica. Los nevados suelen ubicarse en zonas de alta montaña o en latitudes donde las temperaturas son lo suficientemente bajas como para mantener la nieve acumulada durante largos periodos. Los nevados no solo tienen una relevancia estética y cultural en muchas regiones, sino que también juegan un papel importante en el ciclo hidrológico, actuando como reservas de agua que alimentan ríos y lagos a medida que se funden. Además, los nevados son indicadores de las variaciones estacionales y del cambio climático, ya que su extensión puede disminuir significativamente debido al aumento de la temperatura global (Miranda, 2010, p.1).



## **Teledetección espacial**

La teledetección espacial es una técnica avanzada que ayuda a conocer datos detallados sobre la superficie terrestre mediante sensores colocados en plataformas orbitales, como satélites. Estos sensores ayudan en capturar diversas longitudes de onda del espectro electromagnético, hallándose información sobre la cobertura, el uso del suelo, y cambios en el paisaje que no son perceptibles a simple vista. La teledetección es de gran utilidad en estudios de monitoreo ambiental, ya que permite identificar cambios en la superficie terrestre, analizar la distribución de tipos de vegetación, evaluar los efectos de desastres naturales y estudiar el retroceso de glaciares y cuerpos de agua (Chuvienco, E. 1990, p.27).

## **Resolución espacial**

La resolución espacial se refiere al nivel de detalle que puede captar un sensor en una imagen satelital, es decir, el tamaño del objeto más pequeño que puede distinguirse con claridad en la imagen. Cuanto mayor es la resolución espacial, mayor es la precisión con la que se pueden identificar elementos en la superficie terrestre, lo cual es esencial en estudios que requieren monitoreo detallado, como el análisis de áreas urbanas, vegetación específica o cuerpos de agua. La resolución espacial permite a los analistas diferenciar con claridad entre objetos y superficies, facilitando un análisis más exacto en aplicaciones de planificación y monitoreo ambiental (Chuvienco, E. 1995, p.90).

## **Resolución espectral**

La resolución espectral se refiere a la cantidad y el ancho de las bandas espectrales que un sensor puede capturar, lo que permite discriminar entre diferentes materiales y componentes de la superficie terrestre. Una mayor



resolución espectral implica que el sensor puede distinguir longitudes de onda específicas, facilitando la identificación precisa de características como la vegetación, cuerpos de agua, tipos de suelo y minerales. Esta capacidad es especialmente útil en estudios de teledetección que requieren una diferenciación precisa entre objetos y la identificación de propiedades específicas de la superficie (Chuvienco, E. 1995, p.93).

### **Resolución radiométrica**

La resolución radiométrica se refiere a la capacidad de un sensor para detectar pequeñas variaciones en la energía o radiancia que llega desde la superficie terrestre. Esto permite captar imágenes con diferentes niveles de brillo, representando variaciones sutiles en la reflectancia de los materiales y facilitando el análisis de cambios que, de otra manera, pasarían desapercibidos. Esta característica es fundamental en estudios donde se necesita un alto grado de precisión para identificar variaciones sutiles en el paisaje o en la vegetación (Chuvienco, E. 1995, p.94).



## CAPITULO III

### METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN

#### 3.1. TIPO DE INVESTIGACIÓN

De acuerdo con Hernández Sampieri et al. (2015), y en línea con los objetivos establecidos, el enfoque metodológico de la investigación será cuantitativo, no experimental y de nivel explicativo. Este tipo de investigación no solo busca describir o aproximarse a un problema, sino que también tiene como objetivo identificar las causas subyacentes del fenómeno en estudio (Hernández, 2012; Valdez, 2009). En este enfoque, el investigador recopila datos sobre el fenómeno y define las variables que se desean investigar (Moreno G., 2007, p.128).

#### 3.2. DISEÑO DE INVESTIGACIÓN

La investigación emplea un diseño longitudinal, ya que la recolección de datos se realizará en varios momentos a lo largo del tiempo. Este enfoque permite describir las variables y examinar cómo inciden e interactúan entre sí a lo largo de diferentes periodos (Hernández, Fernández y Baptista, 2014, p. 154).



### **3.3. POBLACIÓN Y MUESTRA**

#### **3.3.1. Población**

La totalidad geográfica de la cordillera se considera una población finita, así como el glaciar que alberga, dado que el área de estudio tiene un valor medido asignado (en este caso, en kilómetros cuadrados). Esta cordillera se localiza en las cercanías del nudo de Vilcanota, con una extensión aproximada de 15 km en dirección noroeste. Geográficamente, se sitúa en la línea divisoria entre los departamentos de Cusco y Puno, dentro de las coordenadas 14°20'00" y 14°33'00" de latitud sur, y 70°48'00" y 71°02'00" de longitud oeste. En términos hidrográficos, está ubicada en la cuenca del río Urubamba, que forma parte de la vertiente del Amazonas, y también entre las cuencas de los ríos Azángaro y Pucará, pertenecientes a la vertiente del lago Titicaca. Políticamente, la cordillera abarca los distritos de Maranganí que se encuentran en las provincias de Canchis y Canas y Layo, distrito de Santa Rosa, perteneciente a la provincia de Melgar (Puno).

#### **3.3.2. Muestra**

El tipo de muestreo empleado fue no probabilístico por conveniencia, ya que la muestra seleccionada fue directa, abarcando la totalidad de la cordillera. Se consideró el área completa del retroceso glaciar entre los años 2000 y 2021, con una superficie inicial de 3.670 km<sup>2</sup> y una final de 1.100 km<sup>2</sup>. Este retroceso equivale a una pérdida total de 2.57 km<sup>2</sup> de cobertura glaciar durante ese periodo.

#### **3.3.3. Proceso de análisis de datos**

El estudio se realizó en tres fases. En primer lugar, se recopilaron imágenes capturadas por los sensores Thematic Mapper (TM), Enhanced Thematic Mapper (ETM+) y Operational Land Imager (OLI) del satélite Landsat, correspondientes a



las versiones 5, 7 y 8. Estas imágenes cubrieron los años 2000, 2003, 2006, 2009, 2012, 2015, 2018 y 2021, específicamente durante el otoño. Esta temporada fue elegida debido a las condiciones secas de la zona de estudio y la escasa presencia de nubes, lo que permitió un procesamiento más preciso de las imágenes, minimizando errores y facilitando la identificación del nevado y las lagunas. Las imágenes fueron descargadas del sitio web del US Geological Survey, aplicando una metodología similar a la utilizada por Suraj R., Singh B. y Schickhoff U. (2016, pp. 205-218).

**Tabla 3**

*Información técnica resumida – Landsat 5*

SATÉLITE	SENSOR	RESOLUCIÓN ESPECTRAL (µm)	BANDAS	RESOLUCIÓN ESPACIAL (m)	RESOLUCIÓN TEMPORAL
LANDSAT 5/2001	Thematic Mapper (TM)	Banda 1 azul:	Multiespectral	30	16 días
		Banda 2 verdes:			
		Banda 3 roja:			
		Banda 4 Infrarrojo cercano1:			
		Banda 5 Infrarrojo Cercano 2:			
		Banda 7 Infrarrojo medio:			
		Banda 6 Infrarrojo térmico:			

*Nota:* Elaboración según MINAM (2014).

Cada versión del satélite Landsat tiene diferentes configuraciones de bandas: (i)

**Landsat 5:** Equipado con el sensor Thematic Mapper (TM), cuenta con 7 bandas:

- 3 bandas en el espectro visible (azul, verde, rojo)



- 3 bandas en el infrarrojo (cercano, medio)
- 1 banda térmica
- Resolución espacial de 120 metros para la banda térmica, utilizada para calcular la temperatura de superficie (Chander et al., 2009, p. 893–903).

El siguiente cuadro presenta la información técnica detallada de cada versión del satélite LANDSAT. En particular, la versión LANDSAT 7 cuenta con 8 bandas espectrales, diseñadas para captar diferentes rangos del espectro electromagnético, lo que permite realizar análisis detallados de la superficie terrestre. Entre estas bandas, se incluye una denominada "Pancromática," la cual destaca por su alta resolución espacial de 15 metros. Esta banda pancromática es especialmente útil en estudios que requieren una mayor precisión en la definición de los detalles, ya que su resolución permite captar características más finas en el terreno. Gracias a esta capacidad de LANDSAT 7, es posible obtener imágenes de alta calidad, que facilitan la observación y monitoreo de cambios en el uso del suelo, la vegetación y otros elementos geográficos con un nivel de detalle significativamente superior al que ofrecen las bandas multiespectrales, cuyo rango de resolución es mayor.

Tabla 4

## Información técnica resumida – Landsat 7

SATELITE	SENSOR	RESOLUCIÓN ESPECTRAL ( $\mu\text{m}$ )	BANDAS	RESOLUCIÓN ESPACIAL (m)	RESOLUCIÓN TEMPORAL	
LANDSAT 7/2000 y 2015	Enhanced Thematic Mapper Plus (ETM+)	Banda 1 azul:	Multiespectral	30	16 días	
		Banda 2 verdes:				120
		Banda 3 roja:				
		Banda 4 Infrarrojo cercano1:				
		Banda 5 Infrarrojo cercano2:				
		Banda 7 Infrarrojo medio:				
		Banda 6 Infrarrojo térmico:				
		Banda 8: Pancromática	Termal Pancromática	15	16	
		Banda 9: Pancromática				

Nota: Elaboración según MINAM (2014).

El satélite LANDSAT 8, equipado con los sensores avanzados OLI (Operational Land Imager) y TIRS (Thermal Infrared Sensor), ofrece una capacidad de observación mejorada gracias a sus once bandas espectrales, diseñadas para diferentes aplicaciones de monitoreo de la superficie terrestre. Las bandas 1 a 7, junto con la banda 9, presentan una resolución espacial de 30 metros, lo que permite obtener imágenes de alta calidad para análisis detallados de uso del suelo, vegetación y cuerpos de agua.

La banda 1, denominada "Costal Blue," está especialmente diseñada para estudios de zonas costeras y análisis de aerosoles atmosféricos, aunque en esta investigación no se aplicó. La banda 9, por su parte, es muy útil para la detección



de nubes cirrus, contribuyendo a reducir la interferencia en las imágenes provocada por estas nubes de alta altitud.

Además, LANDSAT 8 incluye dos bandas térmicas, la banda 10 y la banda 11, que presentan una resolución espacial de 100 metros. Estas bandas térmicas son fundamentales para obtener datos precisos sobre la temperatura de la superficie terrestre y fueron de especial utilidad en esta investigación, ya que proporcionan información relevante para el análisis de variaciones térmicas en distintas áreas geográficas. Tal como señaló Ariza (2013), estas bandas térmicas permiten realizar un seguimiento de la temperatura del suelo, lo cual es esencial para estudios climáticos y de cambio en el uso de la tierra.

El segundo criterio considerado en el estudio fue el nivel de corrección aplicado a las imágenes. Las imágenes obtenidas a través de la plataforma USGS EarthExplorer se encuentran clasificadas en el nivel de corrección L1T, conforme a los protocolos de ortorrectificación establecidos para las imágenes satelitales de la serie Landsat. Los productos clasificados en L1T son, de hecho, imágenes L1R a las que se han aplicado correcciones geométricas avanzadas. Estas correcciones se logran mediante el uso de puntos de control terrestres (GCP) y de información de posicionamiento integrada directamente en los sistemas a bordo del satélite. Gracias a estos ajustes, las imágenes se registran con precisión y se proyectan en un sistema cartográfico confiable, basado en los sistemas de referencia WGS84, G873 o en su versión más reciente, garantizando una ubicación espacial precisa en las observaciones.



**Tabla 5**

*Información técnica resumida – Landsat 8*

SATELITE	SENSOR	RESOLUCIÓN ESPECTRAL (µm)	BANDAS	RESOLUCIÓN ESPACIAL (m)	RESOLUCIÓN TEMPORAL	
LANDSAT 8/2013	Operational Land Imager (OLI) y el sensor térmico infrarrojo Thermal Infrared Sensor (TIRS)	Banda 1	0.43 - 0.45		30	16 días
		Banda 2	0.45 - 0.52		120	
		Banda 3	0.52 - 0.60		120	
		Banda 4	0.63 - 0.69		15	
		Banda 5	0.69 - 0.76	Aerosol	100	
		Banda 6	0.76 - 0.90	Multispectral		
		Banda 7	0.90 - 1.13	Pancromática		
		Banda 8	1.13 - 1.24	Pancromática		
		Banda 9	1.24 - 1.38	Cirrus		
		Banda 10	1.38 - 1.64	Térmica		
		Banda 11	1.64 - 1.88			

*Nota:* Datos son considerados según MINAM (2014).

Previo a la tercera fase del estudio, se realizaron composiciones en color falso con el objetivo de facilitar la interpretación de las imágenes y destacar las características deseadas. Para las imágenes del sensor Landsat 5 TM y Landsat 7 ETM+, se emplearon las combinaciones de bandas 4, 3 y 2, mientras que para el Landsat 8 OLI se utilizó la combinación de bandas 5, 4 y 3. Estas composiciones en falso color permitieron optimizar la visibilidad de las áreas de interés, como



vegetación, cuerpos de agua y suelo. Sin embargo, es importante señalar que no se realizó la fusión con la banda pancromática en la imagen correspondiente al año 1990, debido a que esta no se encontraba disponible. La omisión de esta fusión fue deliberada, para evitar posibles errores en el cálculo de índices como el NDSI (Índice de Diferencia Normalizada de Nieve) y el NDWI (Índice de Agua de Diferencia Normalizada), los cuales son cruciales para un análisis preciso de las características de nieve y agua en la región de estudio.

La serie Landsat ha proporcionado, hasta la fecha, el registro más prolongado de observaciones satelitales continuas, lo cual ha sido esencial en el seguimiento del retroceso de glaciares. Este extenso registro, junto con su detallada resolución espacial, permite un monitoreo confiable y detallado, lo cual resulta fundamental para apoyar decisiones en la gestión ambiental, tal como lo señalan diversos autores (Chander G., Markham B., y Helder D., 2009, p. 113).

Asimismo, el uso del índice NDWI ha sido clave en estudios de este tipo, ya que facilita la identificación y el monitoreo de cuerpos de agua, lo cual es de particular relevancia en investigaciones glaciológicas y ambientales, como lo destacan (Kääb et al. 2014, p. 14). Estas herramientas, en conjunto, brindan una base sólida para el análisis de cambios en la superficie terrestre y en los recursos hídricos a lo largo del tiempo, lo cual es indispensable en la toma de decisiones informadas sobre la conservación y el manejo de ecosistemas sensibles.

**Tabla 6**

*Características de las imágenes Landsat utilizadas para estimar los cambios en la cobertura glaciar*

Path	Row	Fecha	Hora	Azimut solar	Plataforma
003	070	24/06/2000	14:38:13	44.67761232	LandsaT 7
003	070	11/07/2003	14:35:43	43.14817839	LandsaT 7
003	070	16/05/2006	14:36:42	49.36576902	LandsaT 7
003	070	08/05/2009	14:37:25	47.26810184	LandsaT 7
003	070	26/06/2012	14:42:08	48.17376635	LandsaT 7
003	070	06/10/2015	14:46:49	52.42068994	LandsaT 8
003	070	15/04/2018	14:46:22	45.09998156	LandsaT 8
003	070	10/06/2021	14:47:10	47.19618694	LandsaT 8

*Nota:* Resumen datos tomados para la elaboración de la presente.

En la tercera etapa del estudio, se avanzó con la extracción de las coberturas glaciar y lagunar, haciendo uso de herramientas automatizadas que desarrollaron una delimitación rápida y efectiva. Para ello, se calcularon dos índices esenciales en la detección de estas características geográficas: el Índice de Nieve de Diferencia Normalizada (NDSI) y el Índice de Agua de Diferencia Normalizada (NDWI). La obtención de valores precisos del NDSI resultó fundamental, ya que este índice permitió una distinción efectiva entre áreas nevadas y otras superficies. Una vez determinado el NDSI, se procedió a aplicar una clasificación no



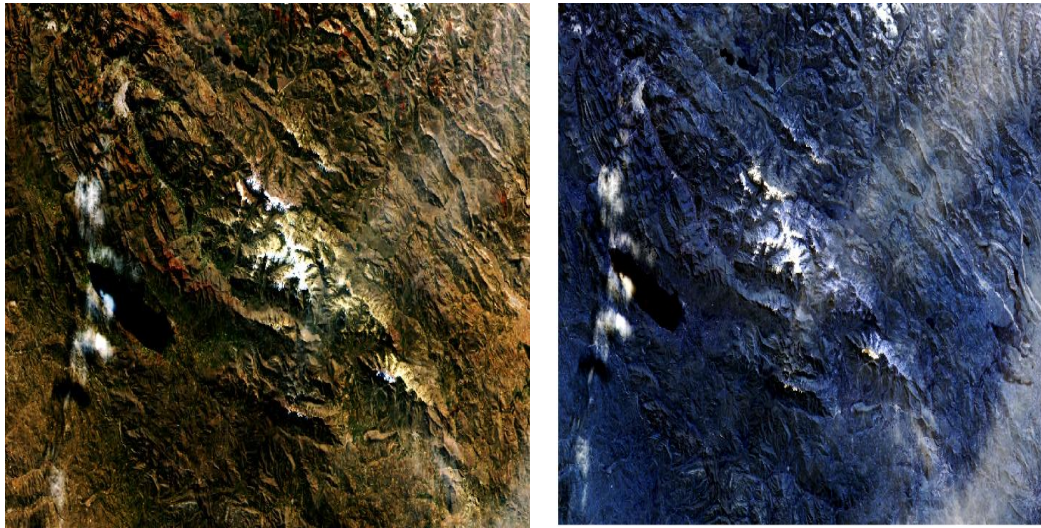
supervisada en las áreas de interés, un proceso que facilita la identificación automática de patrones sin necesidad de un entrenamiento previo.

Para optimizar la clasificación, se siguieron las directrices establecidas por el Instituto Geológico, Minero y Metalúrgico (INGEMMET), definiendo un número inicial de categorías o "clases" que se esperaba obtener a partir de los datos. Esta definición preliminar sirvió de base para que el software asignara, de forma automática, los píxeles de la imagen a las distintas clases, tomando como criterio la similitud en los niveles digitales de cada píxel. A través de operaciones estadísticas avanzadas, el software agrupó los píxeles según sus características espectrales, permitiendo una clasificación eficiente de las coberturas en función de sus propiedades reflectantes.

Este enfoque automatizado de clasificación no solo permitió una categorización rápida y precisa de las coberturas presentes en las imágenes, sino que también optimizó la identificación de glaciares y cuerpos de agua en las zonas de estudio, facilitando un análisis detallado de sus características. La aplicación de esta metodología mejoró la capacidad del estudio para monitorear cambios en las áreas glaciaria y lagunar, proporcionando un conjunto de datos confiable que resulta esencial para la planificación y administración de los recursos naturales en la región.

**Figura 11**

*Cálculo de NDSI (Índice De Nieve De Diferencia Normalizada) - antes y después)*



*Nota:* Producida en QGis 3.34.2 y ArcMap.

### **A) Clasificación no supervisada al resultado del NDSI del Nevado**

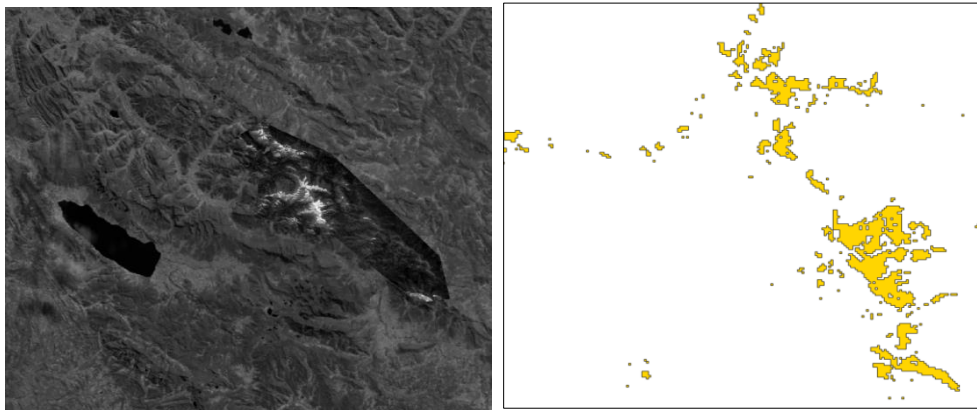
En el proceso de clasificación no supervisada del NDSI correspondiente al nevado, resulta esencial eliminar elementos que no sean relevantes para el análisis principal, tales como glaciares adyacentes, lagunas, o cualquier otra cobertura que pueda introducir ruido en el estudio. Para llevar a cabo esta depuración y manipulación de los elementos en la imagen, es necesario realizar una conversión del formato de la imagen de ráster a vectorial, específicamente a un formato shapefile.

La conversión a formato vectorial permite trabajar con los elementos de la imagen de manera más precisa, ya que facilita la selección y exclusión de áreas específicas, optimizando la clasificación al permitir una edición detallada de cada componente. En el formato shapefile, cada elemento de la imagen puede identificarse, seleccionarse y manipularse individualmente, lo cual es ideal para

excluir las áreas no deseadas y centrar el análisis en el nevado objetivo. Esta técnica asegura una representación exacta de los datos relevantes y permite un monitoreo más efectivo del área glaciar.

## Figura 12

*Conversión de la clasificación a vector del nevado*

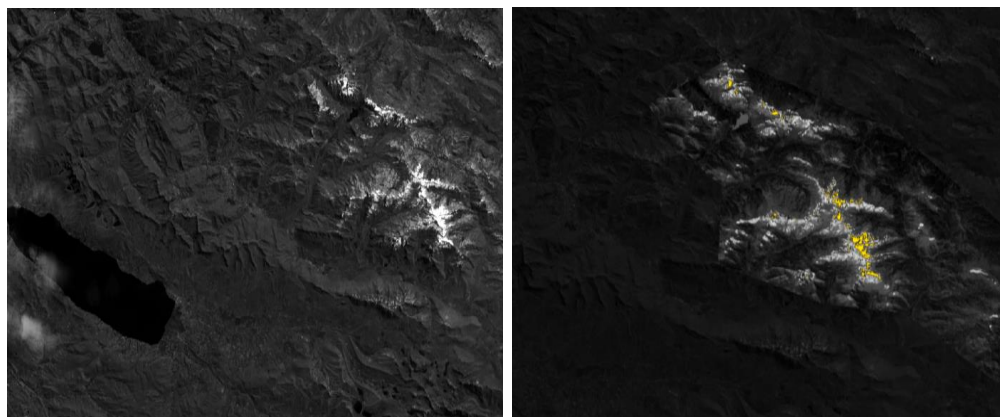


*Nota:* Producida en QGis 3.34.2 y ArcMap.

una vez obtenida la imagen con solo los elementos de interés, específicamente la cobertura de la Cordillera La Raya, se llevó a cabo una operación de "Merge" mediante el uso del software ArcGIS 10.3. Esta operación permite fusionar todos los polígonos individuales del archivo vectorial (shapefile) en un único polígono general que representa de forma consolidada la extensión de la Cordillera La Raya. La creación de este polígono unificado facilita el cálculo de la superficie total de la cordillera como una sola unidad, optimizando así el análisis de su área y proporcionando un valor representativo de toda la cobertura glaciar en estudio. Esta técnica es fundamental para obtener una representación exacta de la cobertura espacial y para realizar cálculos precisos de la superficie en el área de estudio.

**Figura 13**

*Cálculo de NDWI (Índice de Agua De Diferencia Normalizada)*



*Nota:* Elaboración en QGis.

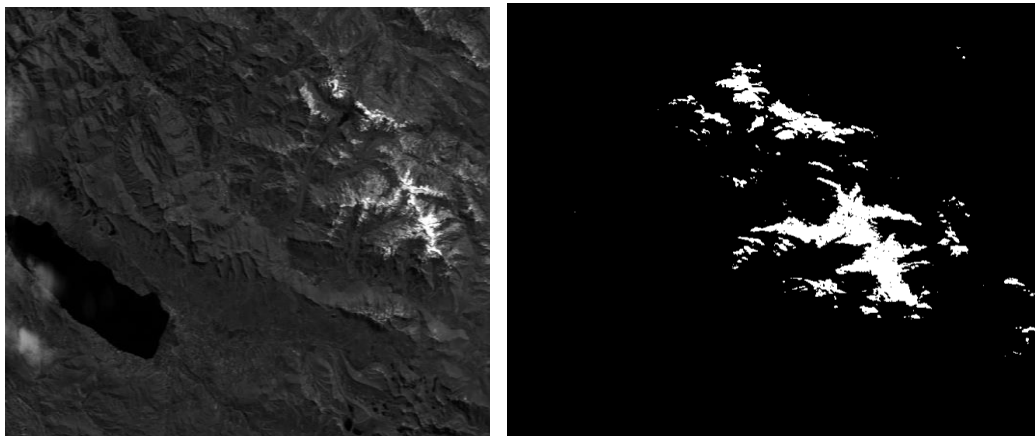
El cálculo del Índice de Agua de Diferencia Normalizada (NDWI) resultó fundamental para facilitar la identificación de las áreas correspondientes a las lagunas glaciares ubicadas en las cercanías del nevado. Este índice, calculado mediante el software ERDAS en su versión 14, permite resaltar los cuerpos de agua en las imágenes satelitales al combinar la banda del infrarrojo cercano con la banda del espectro visible, específicamente en la longitud de onda del azul. Esta combinación se basa en las propiedades de reflectancia del agua, que refleja menos en el infrarrojo cercano y más en la banda azul, lo que permite identificar claramente la presencia de cuerpos de agua, como las lagunas glaciares, en áreas con cobertura de nieve y hielo.

Para optimizar la precisión del análisis y corregir las distorsiones que las sombras proyectadas por el relieve podían causar en la delimitación de las áreas de cobertura glaciaria, se recurrió al programa ArcGIS 10.3. La combinación de estos programas permitió una mejor visualización y precisión en la identificación de los límites de las lagunas, lo cual es esencial para un análisis detallado de su extensión

y relación con las zonas de deshielo. El NDWI demostró ser una herramienta efectiva para delinear los contornos de las lagunas glaciares cercanas al nevado, dado que minimiza la interferencia de otras superficies, y resulta particularmente útil en estudios donde la precisión en la delimitación de cuerpos de agua es clave, tal como lo señala McFeeters (2007, p. 7). Este proceso de identificación y delimitación de lagunas glaciares es crucial para estudios de cambio climático y de retroceso glaciar, ya que las lagunas glaciares representan importantes indicadores del deshielo y del cambio en la cobertura de agua en áreas de alta montaña. Así, el uso del NDWI en combinación con herramientas avanzadas de software optimiza la capacidad de análisis y proporciona datos confiables para el monitoreo y conservación de estos ecosistemas.

## Figura 14

*Clasificación no supervisada al resultado del NDWI de las lagunas adyacentes*



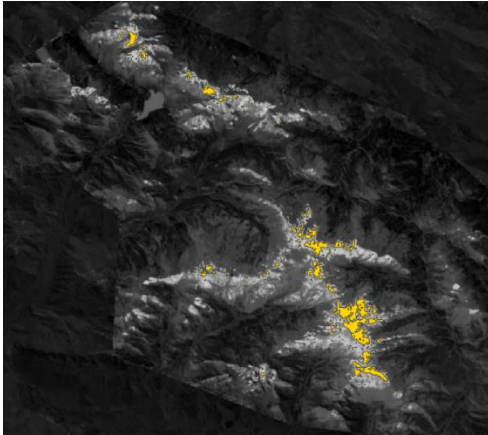
*Nota:* Elaboración en QGis.

De manera similar, se eliminaron los elementos que no eran relevantes para el análisis, y se procedió a convertir el formato raster de la imagen en un formato vectorial (shapefile). Este proceso permitió una representación más precisa de las

características geográficas, facilitando el manejo y análisis de los datos, como se muestra a continuación.

## Figura 15

*Conversión de la clasificación a vector*



*Nota:* Elaboración en QGis.

### 3.4. TÉCNICA Y DISEÑO

#### 3.4.1. Técnicas

Se empleó la técnica de observación o exploración visual, la cual se centra en el registro de las características tanto del satélite como del sensor utilizado en la obtención de las imágenes. Esta metodología permite captar y documentar datos cuantitativos y cualitativos sobre la dinámica del nevado, proporcionando una base de análisis sólida.

Durante el proceso de observación, se registraron características específicas del área de estudio, las cuales fueron consignadas en una ficha de recolección de datos. Esta ficha se convirtió en una herramienta fundamental para el procesamiento y análisis posterior de la información obtenida, permitiendo una evaluación detallada de la funcionalidad variacional de la cobertura glacial en el tiempo.



## Instrumentos de recolección de datos

Para la recopilación exhaustiva de información, se diseñó una ficha digital específica, en la que se consignaron todos los aspectos técnicos y relevantes de las imágenes satelitales empleadas en el estudio.

Esta ficha incluía datos como la ubicación geográfica del área de estudio, los periodos de análisis, la fuente de las imágenes satelitales, el tipo de sensor utilizado, y la resolución tanto espacial como temporal de las imágenes, entre otros elementos cruciales para el análisis.

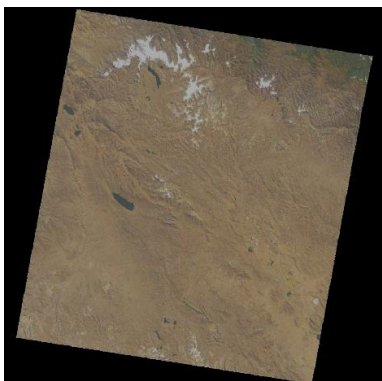
Además, se implementó una ficha observativa que registraba los resultados obtenidos del procesamiento de las imágenes, como el área glaciar del nevado en cada año analizado, el porcentaje de cobertura de nieve y hielo, así como el perímetro de la masa glaciar. Esta ficha permitió organizar de manera sistemática los resultados y facilitó la interpretación de los cambios en la superficie glaciar a lo largo del tiempo.

También se registraron los niveles de temperatura correspondientes a distintas altitudes de la cordillera La Raya, con el fin de establecer una posible relación entre el retroceso de la cobertura glaciar y el aumento de la temperatura en la región.

Este conjunto de datos de temperatura fue indispensable para analizar el impacto del calentamiento global en las variaciones de los glaciares, permitiendo una comprensión más profunda de cómo las condiciones climáticas influyen directamente en el comportamiento y la dinámica de las masas glaciares en el área de estudio a un nivel local y consecuentemente debe ser investigado a nivel Perú y Sudamérica con el presupuesto que este conlleve.

## Figura 16

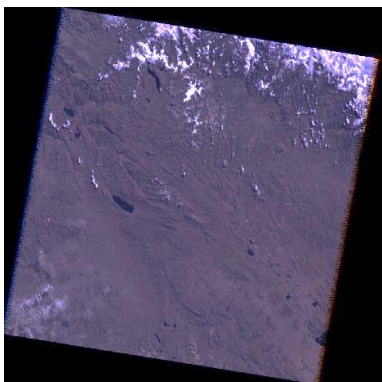
*Imagen satelital Landsat 7 del 24-06-2000*



*Nota: Obtención de imágenes de USGS*

## Figura 17

*Imagen satelital Landsat 7 del 11-07-2003*



*Nota: Obtención de imágenes de USGS*

## Figura 18

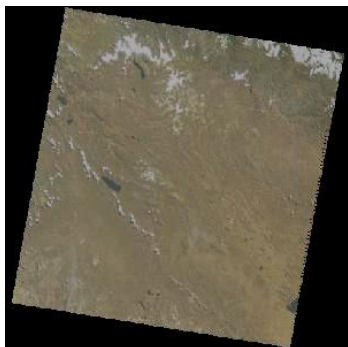
*Imagen satelital Landsat 7 del 16-05-2006*



*Nota: Obtención de imágenes de USGS*

## Figura 19

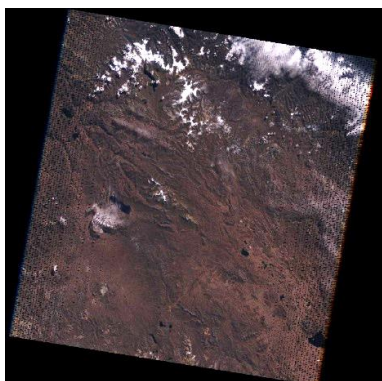
*Imagen satelital Landsat 7 del 08-05-2009*



*Nota: Obtención de imágenes de USGS*

## Figura 20

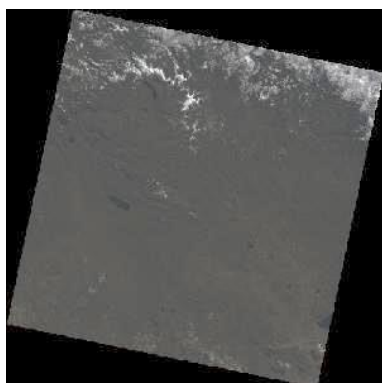
*Imagen satelital Landsat 7 del 25-06-2012*



*Nota: Obtención de imágenes de USGS*

## Figura 21.

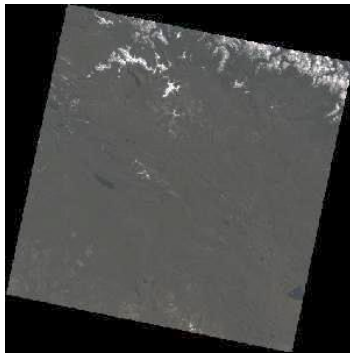
*Imagen satelital Landsat 7 del 06-10-2015*



*Nota: Obtención de imágenes de USGS*

## Figura 22

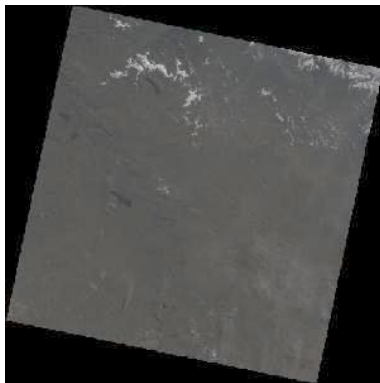
*Imagen satelital Landsat 7 del 15-04-2018*



*Nota:* Obtención de imágenes de USGS

## Figura 23

*Imagen satelital Landsat 7 del 10-06-2021*



*Nota:* Obtención de imágenes de USGS

**Observación directa:** Se optó por el método de observación directa para la recopilación de información debido a que permite un análisis detallado y en contacto cercano con los datos obtenidos a través del procesamiento de imágenes satelitales. Este método facilita la interpretación precisa de los cambios en la cobertura glacial y permite capturar las variaciones en los elementos de interés, sin la necesidad de realizar visitas físicas al área de estudio.

Los materiales empleados en esta metodología incluyen la descarga de imágenes satelitales de la serie Landsat, específicamente aquellas que abarcan



diversas bandas de los sensores TM (Thematic Mapper), ETM+ (Enhanced Thematic Mapper Plus) y OLI (Operational Land Imager), integrados en los satélites Landsat 5, Landsat 7 y Landsat 8. Estas imágenes fueron seleccionadas para los años 2000, 2003, 2006, 2009, 2012, 2015, 2018 y 2021, con el fin de abarcar un rango temporal amplio y obtener una visión detallada de la evolución de la cobertura glaciar en cada periodo. La combinación de datos de diferentes sensores y años permite observar las tendencias de retroceso glaciar y facilita el análisis de las condiciones climáticas y su impacto en el área de estudio a lo largo del tiempo.

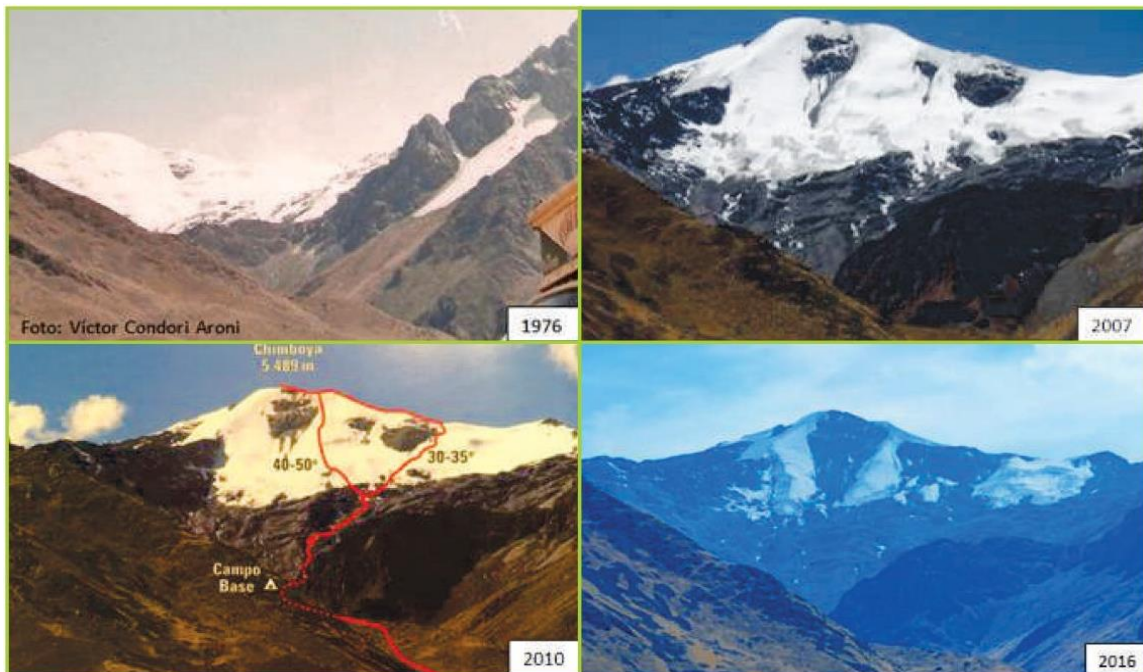
### 3.5. LUGAR DE ESTUDIO

El área de estudio se localiza en las inmediaciones del nudo de Vilcanota, con una extensión aproximada de 15 kilómetros en dirección noroeste, y se sitúa en la frontera que divide los departamentos de Puno y Cusco. La región de análisis abarca las coordenadas geográficas comprendidas entre los 14°20'00" y 14°33'00" de latitud sur, así como los 70°48'00" y 71°02'00" de longitud oeste, proporcionando una ubicación precisa que facilita la delimitación del área para los estudios satelitales.

Desde el punto de vista hidrográfico, esta región pertenece a la cuenca del río Urubamba, un afluente importante que se integra en la vertiente del Amazonas. Esta conexión hidrográfica convierte al área en un punto clave de interés, ya que contribuye al sistema de drenaje y abastecimiento hídrico de una de las cuencas fluviales más extensas e importantes del continente. Además, su ubicación en esta cuenca añade valor a los estudios ambientales y glaciológicos, ya que las variaciones en la cobertura glaciar pueden tener repercusiones significativas en el flujo y la disponibilidad de agua dentro de la cuenca amazónica, impactando tanto los ecosistemas como las comunidades aledañas.

**Figura 24**

*Comparación fotográfica del glaciar Chimbolla - Cordillera La Raya*



*Nota:* Situación de los glaciares y los ecosistemas de montaña del Perú: Informe anual 2016 – INAIGEM

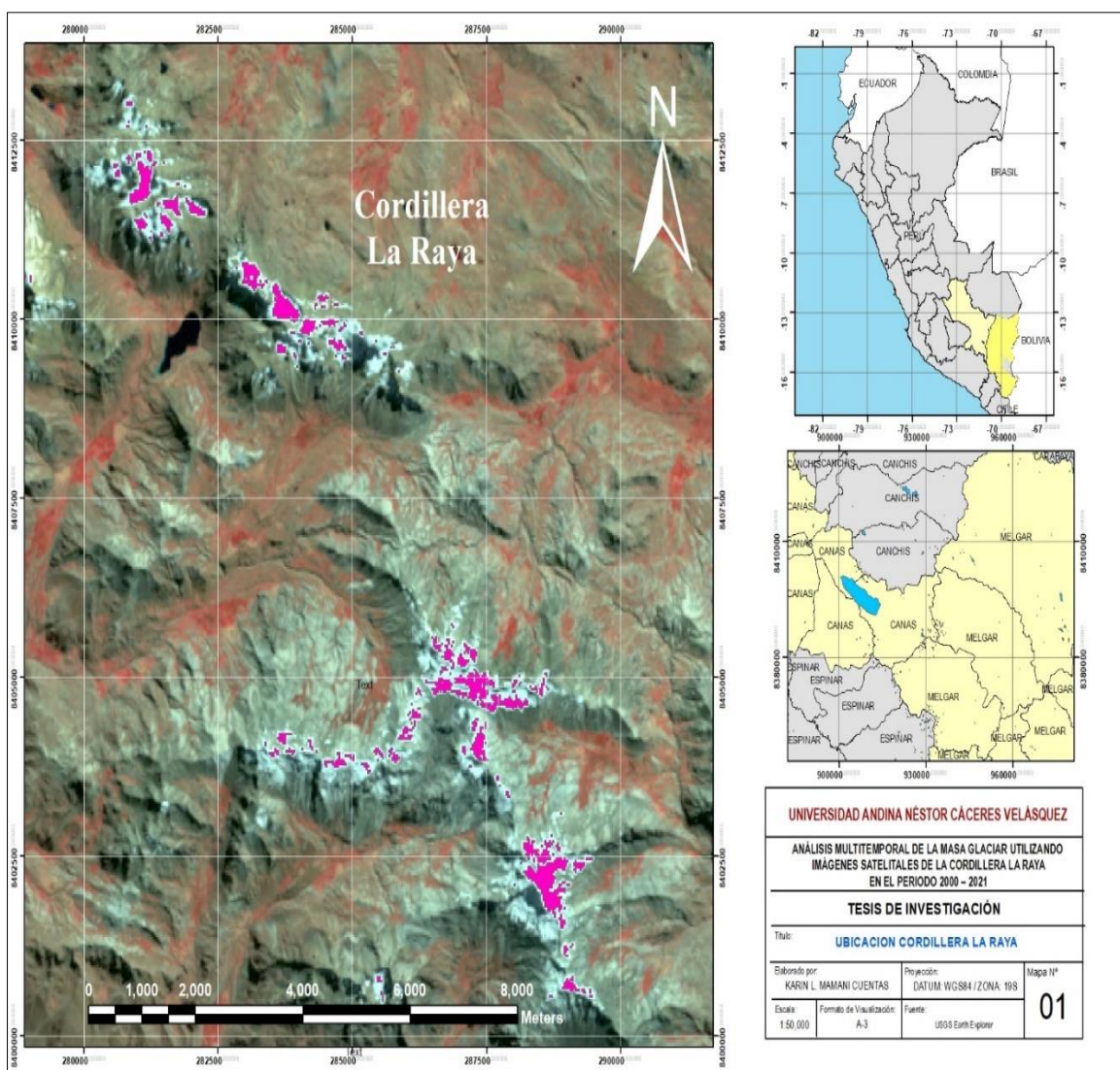
Asimismo, el área de estudio se encuentra entre las cuencas de Azángaro y Pucará, ambas pertenecientes a la vertiente del lago Titicaca, lo que le otorga una posición estratégica dentro de esta importante cuenca andina. La región tiene una relevancia particular en el sistema hidrológico, ya que contribuye a los recursos hídricos que alimentan el Titicaca, un lago de gran importancia ecológica, cultural y económica para las poblaciones de su entorno.

En términos de jurisdicción política, esta área abarca los distritos de Maranganí y Layo, situados dentro de las provincias de Canchis y Canas, respectivamente, en el departamento de Cusco, así como el distrito de Santa Rosa en la provincia de Melgar, en el departamento de Puno. Esta configuración político-administrativa implica una interacción y coordinación entre autoridades locales de

dos departamentos distintos, debido a la distribución del área de estudio en territorios contiguos de Cusco y Puno.

**Figura 25**

*Mapa ubicación del área de estudio*



*Nota:* Elaboración en base a los datos obtenidos de la teledetección y proceso de imágenes.

Según el Inventario de Glaciares del Perú (Hidrandina, 1989), la Cordillera La Raya contaba con una extensión glaciaria de aproximadamente 11.3 km<sup>2</sup>. Sin embargo, para 2015, el Instituto Nacional de Investigación en Glaciares y

Ecosistemas de Montaña (INAIGEM), empleando imágenes satelitales de alta resolución, estimó que la superficie glaciaria había disminuido a solo 2.3 km<sup>2</sup>, lo que representa una reducción del 80% en el área de cobertura de hielo. Este retroceso acelerado sugiere que, de continuar la misma tendencia, es probable que los glaciares de esta cordillera desaparezcan en un lapso relativamente corto, lo cual tendría importantes implicaciones ambientales y para los recursos hídricos en la región.

En particular, el glaciar Chimbolla, situado entre los departamentos de Cusco y Puno, ha mostrado un retroceso notable, impactando visiblemente el paisaje natural que lo rodea (ver fotografía). Las comparaciones de imágenes satelitales evidencian esta transformación: en 2010, la masa de hielo ya había sufrido una reducción significativa en comparación con su extensión registrada en 1976. Para 2016, las imágenes indican que la lengua glaciaria se fragmentó en dos secciones distintas, ubicadas a lo largo de la quebrada, una separación que resalta la rápida pérdida de hielo en el área. Estos cambios no solo afectan la estética del paisaje, sino que también plantean desafíos para la conservación de los ecosistemas y la disponibilidad de agua en las zonas adyacentes.

### **3.6. MÉTODOS DE ANÁLISIS DE DATOS**

#### **3.6.1. Recojo de Datos**

La teledetección fue seleccionada como la herramienta principal para el análisis de los cambios en la cobertura glaciaria, debido a su capacidad de proporcionar datos multitemporales de alta precisión. Esta técnica permite capturar y analizar información sobre extensas áreas geográficas a lo largo del tiempo, sin necesidad de trabajo de campo constante. En este estudio, se utilizaron dos índices clave: el NDSI (Índice de Nieve de Diferencia Normalizada), empleado para evaluar



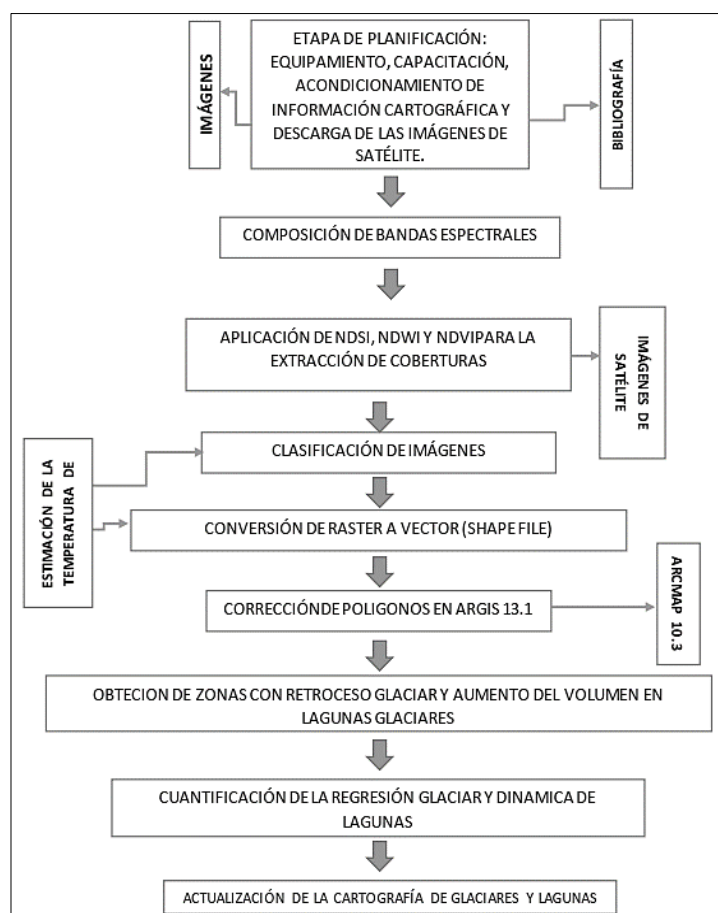
y cuantificar la masa glaciar y para distinguir los diferentes tipos de cobertura de hielo; y el NDVI (Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada), aplicado para medir la cobertura vegetal y así analizar el entorno vegetal circundante. Ambos índices fueron calculados a partir de imágenes satelitales captadas por los sensores Landsat ETM, ETM+ y OLI, lo que permitió obtener una visión precisa y detallada de la evolución de la cobertura glaciar en diferentes periodos de tiempo.

### **Procedimiento metodológico de la investigación**

Dado que el área de estudio abarca una región extensa y el análisis de la cordillera La Raya comprende siete periodos distintos, se determinó la necesidad de utilizar técnicas de teledetección y herramientas de Sistemas de Información Geográfica (GIS). Estas técnicas facilitaron la implementación de un método semi-automatizado, capaz de identificar con alta precisión la dinámica de los glaciares y las lagunas glaciares. Además, las herramientas GIS permitieron calcular parámetros espaciales de manera rápida y eficaz, optimizando el análisis de áreas remotas donde los cambios de cobertura glaciar se producen gradualmente.

**Figura 26**

*Diagrama del cálculo de la dinámica de la cobertura glaciar de la cordillera La Raya*



*Nota:* Producida en base a los antecedentes consultado



## CAPITULO IV

### RESULTADOS Y DISCUSIÓN

#### 4.1. DEL OBJETIVO GENERAL: ANALIZAR EL COMPORTAMIENTO MULTITEMPORAL DE LA CORDILLERA LA RAYA: PERIODO 2000– 2021

Se realizó el mapeo de la cobertura glaciar en los diferentes periodos de análisis usando la teledetección y softwares como QGIS y ArcMap; donde se calculó el índice normalizado de nieve (NDSI) a partir de las imágenes satelitales Landsat; determinando la superficie de cobertura glaciar desde 2000 al 2021.

La siguiente tabla muestra la variación temporal de la superficie glaciar estimada a partir de imágenes de satélite Landsat; como vemos en la tabla y posterior figura en el año 2000 se tuvo una cobertura glaciar de 3.67 km<sup>2</sup>; para el año 2003 la cobertura glaciar fue de 2.82 km<sup>2</sup>; para el año 2006 la cobertura glaciar fue de 2.75 km<sup>2</sup>; para el año 2009 la cobertura glaciar fue de 2.58 km<sup>2</sup>; para el año 2012 la cobertura glaciar fue de 2.37 km<sup>2</sup>; para el año 2015 la cobertura glaciar fue de 2.11 km<sup>2</sup>; para el año 2018 la cobertura glaciar fue de 1.52 km<sup>2</sup>; para el año 2021 la cobertura glaciar fue de 1.10 km<sup>2</sup>; como indican los datos de interés, tenemos un decrecimiento que se da de forma lineal; además de ello debemos mencionar que la variación de área (o disminución de área) en promedio general



de los 22 años de estudio analizados ha sido de 2.57 km<sup>2</sup> (en términos de porcentaje equivale a una reducción del 70.03%).

**Tabla 7**

*Evolución de la cobertura glaciar de la cordillera: La Raya del periodo 2000 - 2021*

<b>Año</b>	<b>Área de cobertura glaciar (km<sup>2</sup>)</b>	<b>Variación de área (km<sup>2</sup>)</b>	<b>Porcentaje de pérdida de cobertura glaciar (%)</b>	<b>Variación de pérdida de cobertura glaciar (%)</b>
2000	<b>3.67</b>		100.00	
2003	<b>2.82</b>	0.85	76.84	23.16
2006	<b>2.75</b>	0.07	97.52	2.48
2009	<b>2.58</b>	0.17	93.82	6.18
2012	<b>2.37</b>	0.21	91.86	8.14
2015	<b>2.11</b>	0.26	89.03	10.97
2018	<b>1.52</b>	0.59	72.04	27.96
2021	<b>1.10</b>	0.42	72.37	27.63
<b>Variación del área total</b>		<b>2.57</b>	<b>70.03</b>	

*Nota:* En la tabla se reflejan los datos obtenidos de procesar las imágenes satelitales en el programa QGIS y ArcMap.

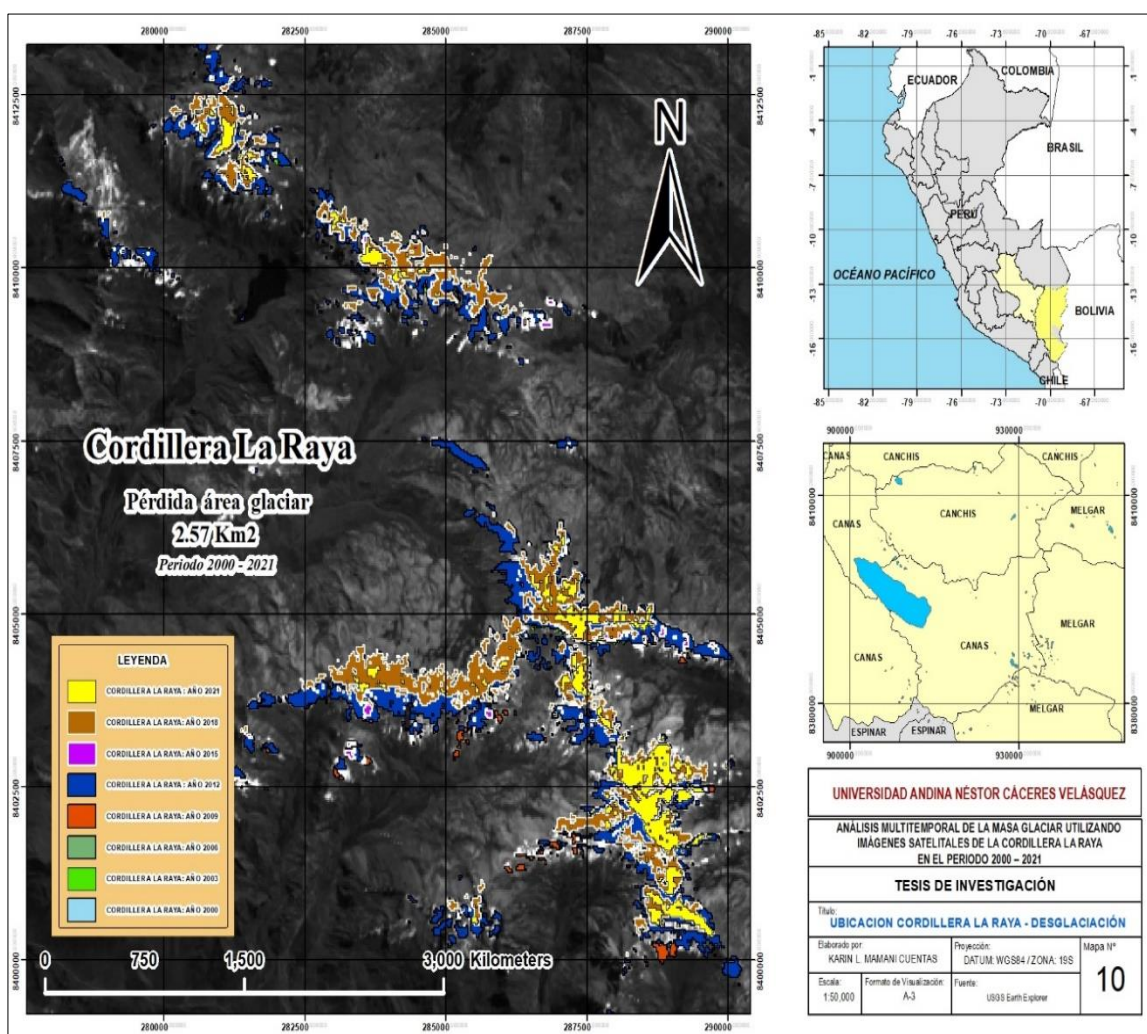
Así también tenemos una tasa promedio de reducción de 0.37 km<sup>2</sup>/año; recordemos que, de todas las cordilleras presentes en la cordillera peruana, la cordillera La Raya es la más pequeña de entre todas las cordilleras ubicadas al sur del Perú (de una extensión glaciar de 31km); pero su decrecimiento viene de forma lenta a comparación de otros glaciares de las demás cordilleras (INAIGEM, 2016).

Recordemos que en datos del INAIGEM para el año 2014 indicaba que la cordillera presentaba un área total cubierta de glaciar equivalente a 3.06 km<sup>2</sup>; así mismo, para el año 2016 precisó encontrar la cobertura glaciar en la cantidad de

1.91 km<sup>2</sup>, considerando que el año de 1962 se encontraba la cantidad de 11.27 km<sup>2</sup> (por ende, podemos decir que hubo una reducción del 83,05% en el periodo mencionado).

### Figura 27

Mapa de evolución de la pérdida del área glaciár en la cordillera La Raya: 2000 - 2021



Nota: Imágenes satelitales procesadas en el software QGis y ArcMap.

Ahora, podemos mencionar que en otra investigación desarrollada en la cordillera de Carabaya (cercano en términos geográficos al área de interés de la presente investigación) en el periodo de 1975 a 2015 la superficie ha disminuido en un



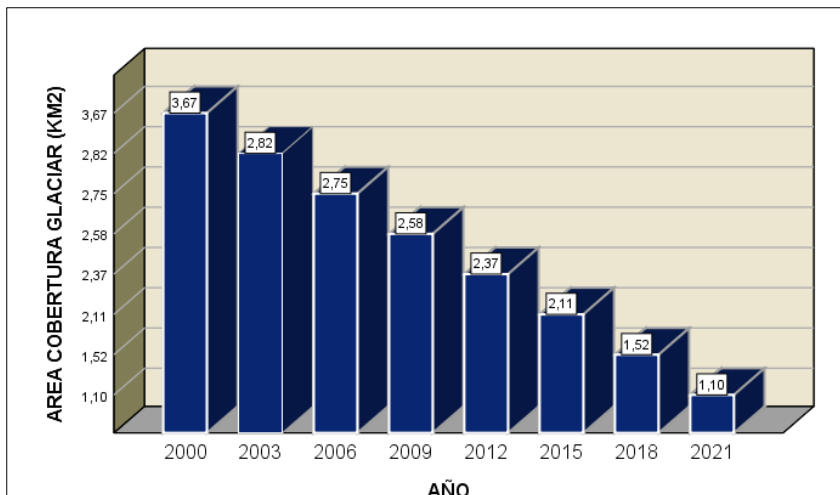
67%; los datos son que disminuyó desde 52.3 km<sup>2</sup> a 16.9 km<sup>2</sup>; también se menciona que tiene una tasa promedio de 0.89 km<sup>2</sup>/año de disminución. En el estudio realizado por Huayaney, M. (2008) en Ancash, específicamente en el glaciar Cojup en el sector de la laguna Palcacocha, se observó una disminución significativa en la cobertura glaciar.

#### **4.2. DEL OBJETIVO ESPECÍFICO 01: DETERMINAR LA PERDIDA DE LA SUPERFICIE DE MASA GLACIAR EN LA CORDILLERA LA RAYA EN EL PERIODO 2000 – 2021.**

En la figura correspondiente se observa que para el año 2000 la temperatura mínima registrada fue de 0.2 °C, y la cobertura glaciar indicaba el valor de 3.67 km<sup>2</sup>; para llegar a esta conclusión ha sido necesario cumplir cuidadosamente con la selección de la imagen satelital, la cual busca la estación de otoño (estación que tiene la presencia de nubosidad < al 15%); posterior a ello se descarga la imagen de USGS y procesa en el software QGIS, recortando el área de interés (recorte de máscara en formato "shapefile"), así procedemos a hallar la NDSI (Índice Diferencial Normalizado de Nieve), luego procedimos a vectorizar el mapa y corregimos geoméricamente el área del glaciar para determinar su área en km<sup>2</sup>.

**Figura 28**

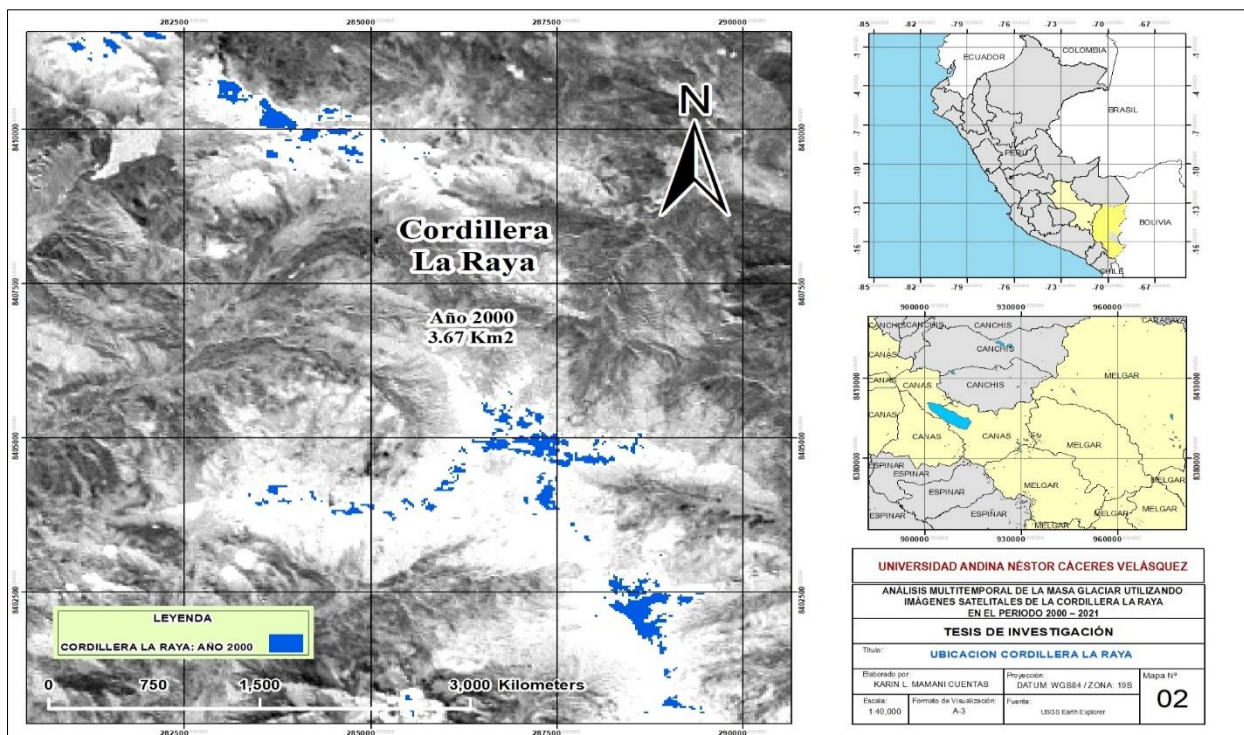
*Evolución de la pérdida del área glaciar (km<sup>2</sup>) en la cordillera La Raya: 2000 – 2021*



Nota: Elaboración en SPSS.

**Figura 29**

*Mapa de cobertura del área glaciar en la cordillera La Raya: año 2000*



Nota: Imagen satelital procesada en el software QGis y ArcMap.



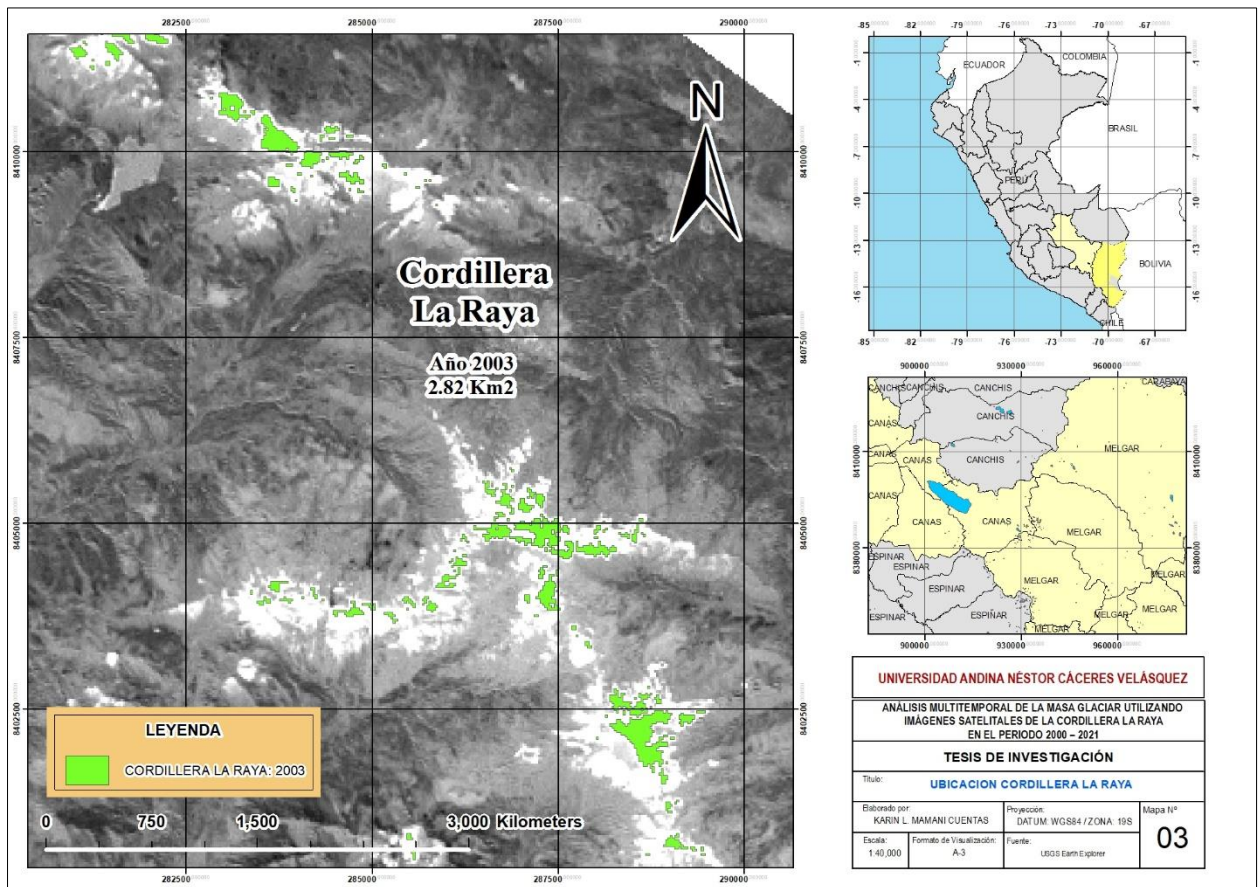
Para determinar tal fin se determinó la necesidad de utilizar técnicas de teledetección y herramientas de Sistemas de Información Geográfica (GIS) en todos los periodos de investigación; estas técnicas facilitaron la implementación de un método semi-automatizado, capaz de identificar con alta precisión la dinámica de los glaciares. Además, las herramientas GIS permitieron calcular parámetros espaciales de manera rápida y eficaz, optimizando el análisis de áreas remotas donde los cambios de cobertura glaciar se producen gradualmente.

Así procedemos a hallar la NDSI (Índice Diferencial Normalizado de Nieve), luego procedimos a vectorizar el mapa y corregimos geométricamente el área del glaciar para determinar su área en  $\text{km}^2$ .

En la figura correspondiente se observa que para el año 2003 la temperatura mínima registrada fue de  $0.4\text{ }^{\circ}\text{C}$ , y la cobertura glaciar indicaba el valor de  $2.82\text{ km}^2$  (el cual demuestra un decrecimiento de área de  $0.85\text{ km}^2$  con respecto al año 2000) para llegar a esta conclusión ha sido necesario cumplir cuidadosamente con la selección de la imagen satelital, la cual busca la estación de otoño (estación que tiene la presencia de nubosidad  $<$  al 15%); posterior a ello se descarga la imagen de USGS y procesa en el software QGIS, recortando el área de interés (recorte de máscara en formato "shapefile"), así procedemos a hallar la NDSI (Índice Diferencial Normalizado de Nieve), luego procedimos a vectorizar el mapa y corregimos geométricamente el área del glaciar para determinar su área en  $\text{km}^2$ .

### Figura 30

#### Mapa de cobertura del área glaciaria en la cordillera La Raya: año 2003



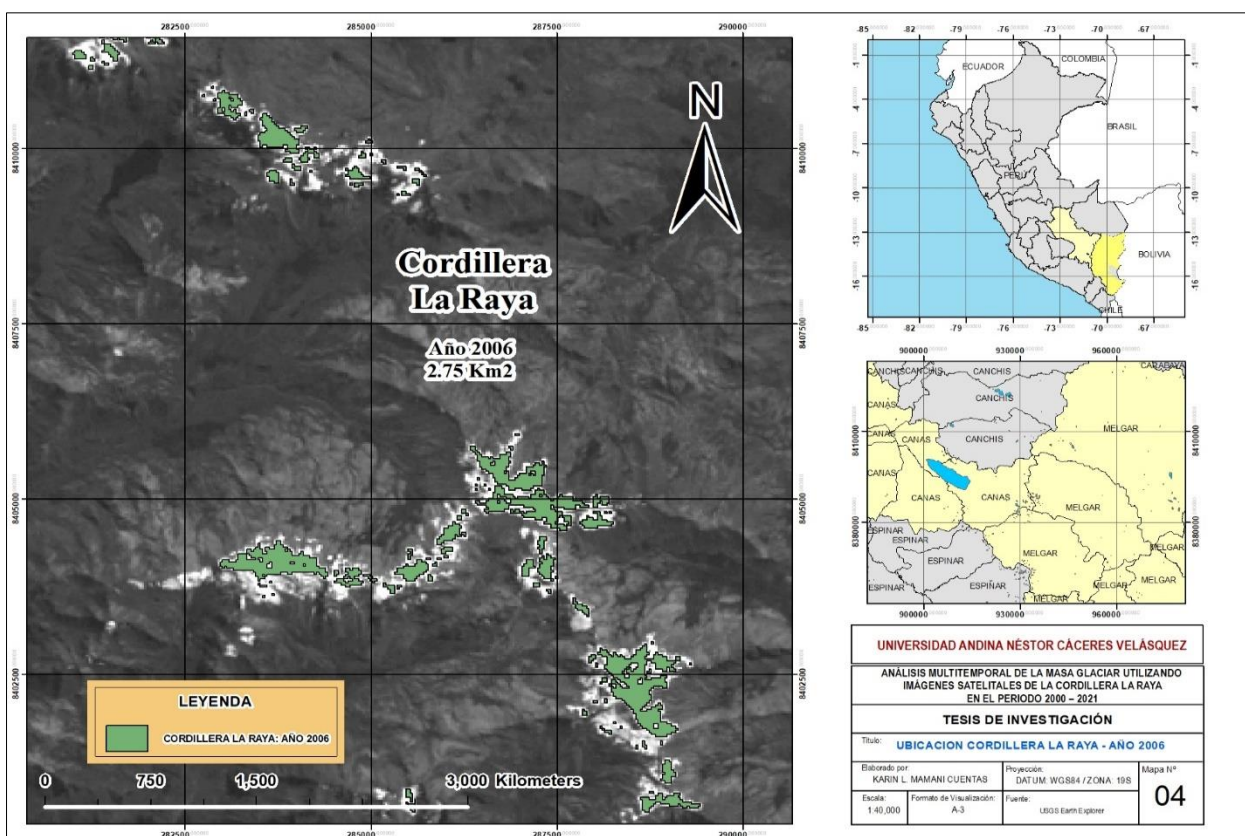
Nota: Imagen satelital procesada en el software QGIS y ArcMap.

En la figura correspondiente se observa que para el año 2006 la temperatura mínima registrada fue de 0.7 °C, y la cobertura glaciaria indicaba el valor de 2.75 km<sup>2</sup> (el cual demuestra un decrecimiento de área de 0.07 km<sup>2</sup> con respecto al año 2003) para llegar a esta conclusión ha sido necesario cumplir cuidadosamente con la selección de la imagen satelital, la cual busca la estación de otoño (estación que tiene la presencia de nubosidad < al 15%); posterior a ello se descarga la imagen de USGS y procesa en el software QGIS, recortando el área de interés (recorte de máscara en formato "shapefile"), así procedemos a hallar la NDSI (Índice

Diferencial Normalizado de Nieve), luego procedimos a vectorizar el mapa y corregimos geoméricamente el área del glaciar para determinar su área en km<sup>2</sup>.

**Figura 31**

Mapa de cobertura del área glaciar en la cordillera La Raya: año 2006



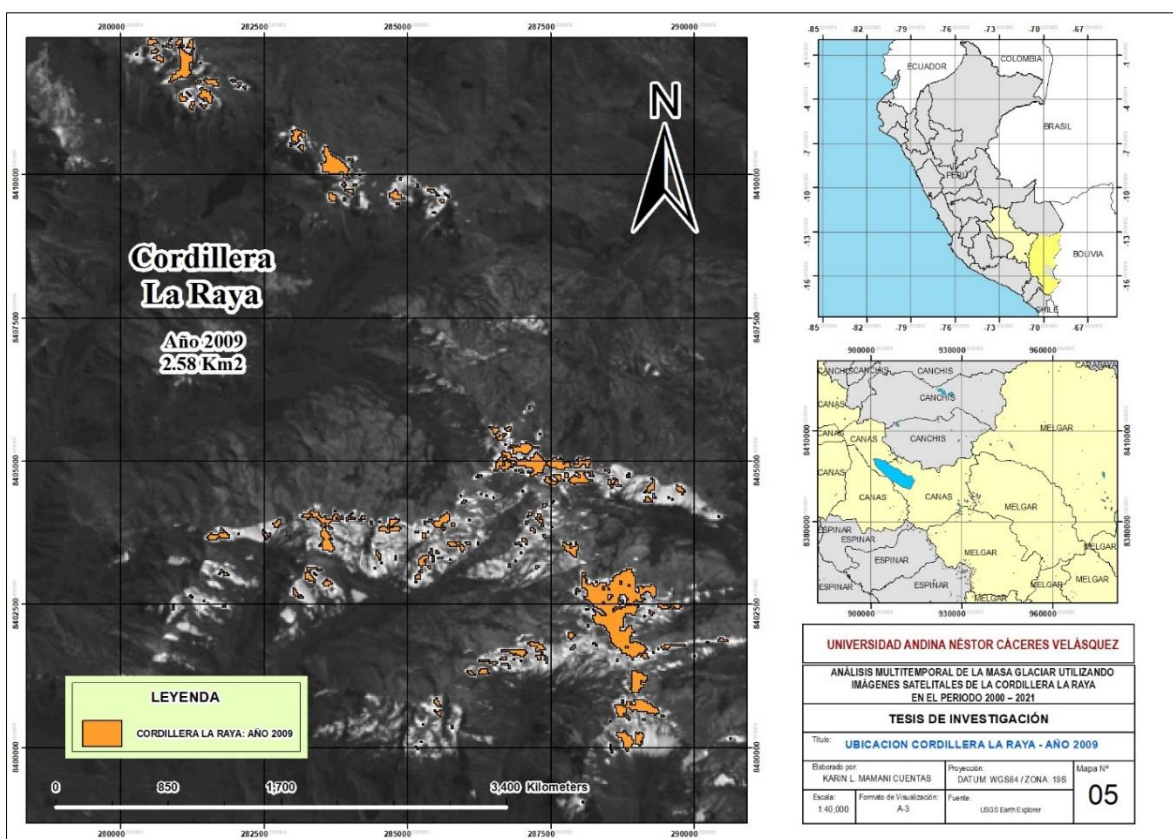
Nota: Imagen satelital procesada en el software QGis y ArcMap.

En la figura correspondiente se observa que para el año 2009 la temperatura mínima registrada fue de 1.0 °C, y la cobertura glaciar indicaba el valor de 2.58 km<sup>2</sup> (el cual demuestra un decrecimiento de área de 0.17 km<sup>2</sup> con respecto al año 2006) para llegar a esta conclusión ha sido necesario cumplir cuidadosamente con la selección de la imagen satelital, la cual busca la estación de otoño (estación que tiene la presencia de nubosidad < al 15%); posterior a ello se descarga la imagen de USGS y procesa en el software QGIS, recortando el área de interés (recorte de máscara en formato "shapefile"), así procedemos a hallar la NDSI (Índice

Diferencial Normalizado de Nieve), luego procedimos a vectorizar el mapa y corregimos geoméricamente el área del glaciar para determinar su área en km<sup>2</sup>.

**Figura 32**

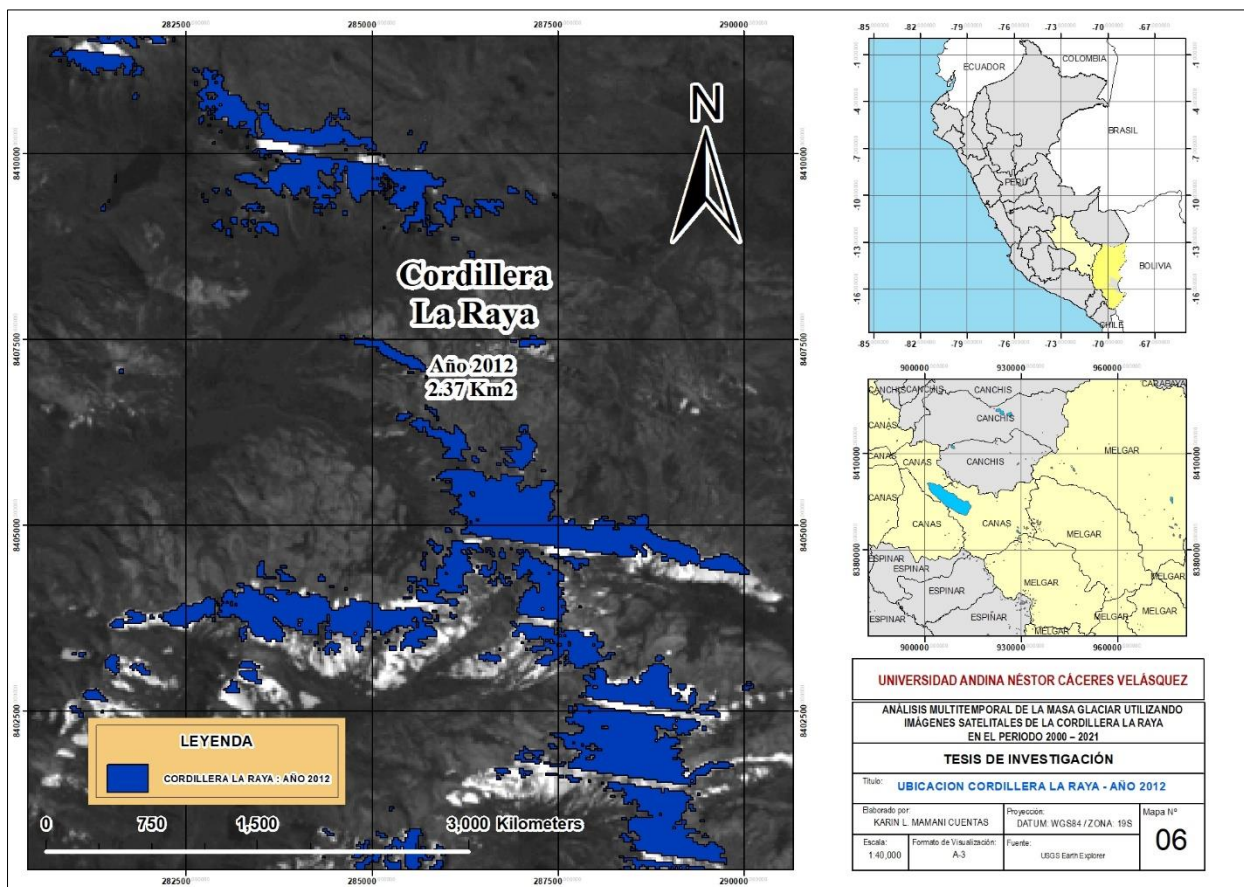
*Mapa de cobertura del área glaciar en la cordillera La Raya: año 2009*



*Nota:* Imagen satelital procesada en el software QGis y ArcMap.

### Figura 33

#### Mapa de cobertura del área glaciaria en la cordillera La Raya: año 2012

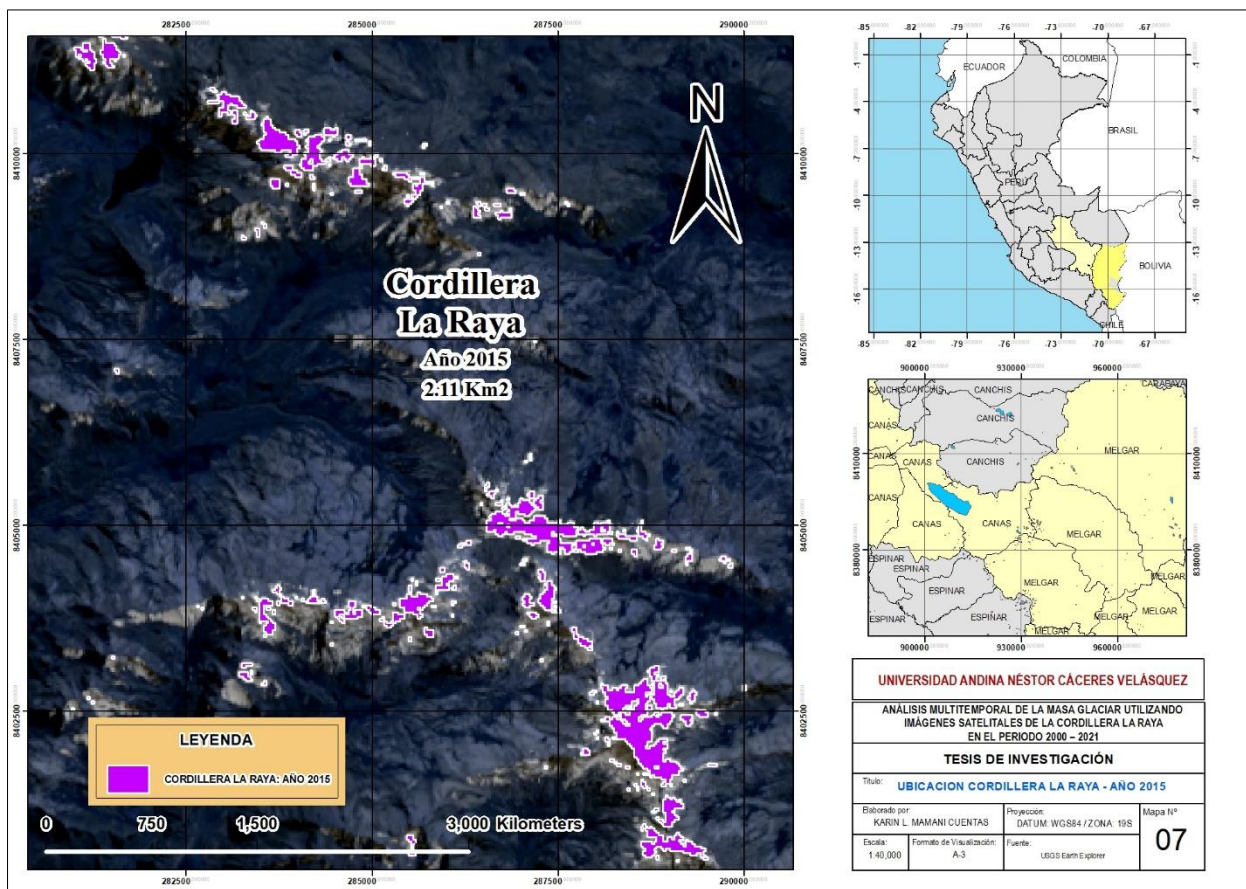


Nota: Imagen satelital procesada en el software QGis y ArcMap.

En la figura correspondiente se observa que para el año 2012 la temperatura mínima registrada fue de 0.4 °C, y la cobertura glaciaria indicaba el valor de 2.37 km<sup>2</sup> (el cual demuestra un decrecimiento de área de 0.21 km<sup>2</sup> con respecto al año 2009) para llegar a esta conclusión ha sido necesario cumplir cuidadosamente con la selección de la imagen satelital, la cual busca la estación de otoño (estación que tiene la presencia de nubosidad < al 15%); posterior a ello se descarga la imagen de USGS y procesa en el software QGIS, recortando el área de interés (recorte de máscara en formato "shapefile"), así procedemos a hallar la NDSI (Índice Diferencial Normalizado de Nieve), luego procedimos a vectorizar el mapa y corregimos geométricamente el área del glaciario para determinar su área en km<sup>2</sup>.

### Figura 34

#### Mapa de cobertura del área glaciaria en la cordillera La Raya: año 2015

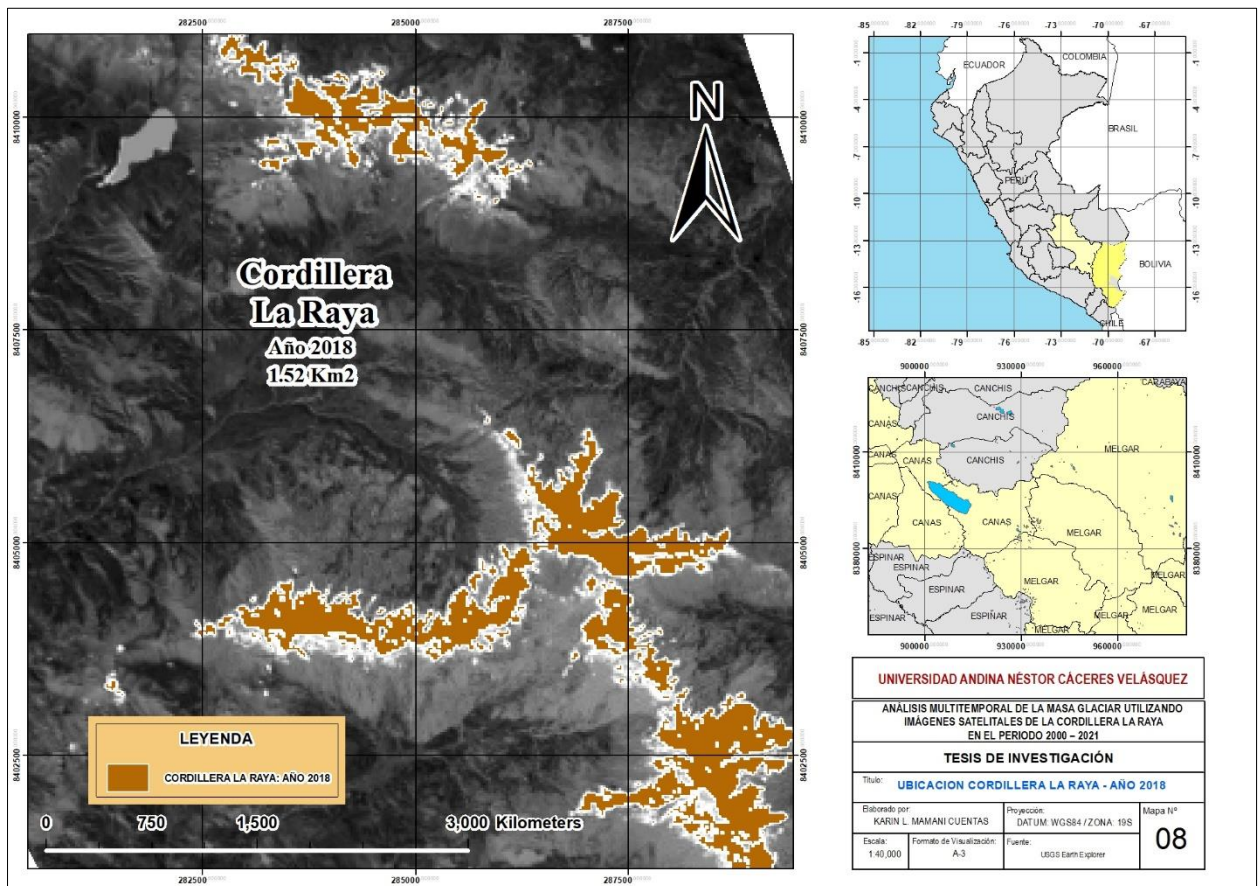


Nota: Imagen satelital procesada en el software QGis y ArcMap.

En la figura correspondiente se observa que para el año 2015 la temperatura mínima registrada fue de  $-1.1\text{ }^{\circ}\text{C}$ , y la cobertura glaciaria indicaba el valor de  $2.11\text{ km}^2$  (el cual demuestra un decrecimiento de área de  $0.26\text{ km}^2$  con respecto al año 2012) para llegar a esta conclusión ha sido necesario cumplir cuidadosamente con la selección de la imagen satelital, la cual busca la estación de otoño (estación que tiene la presencia de nubosidad  $<$  al 15%); posterior a ello se descarga la imagen de USGS y procesa en el software QGIS, recortando el área de interés (recorte de máscara en formato "shapefile"), así procedemos a hallar la NDSI (Índice Diferencial Normalizado de Nieve), luego procedimos a vectorizar el mapa y corregimos geoméricamente el área del glaciario para determinar su área en  $\text{km}^2$ .

**Figura 35**

*Mapa de cobertura del área glaciaria en la cordillera La Raya: año 2018*

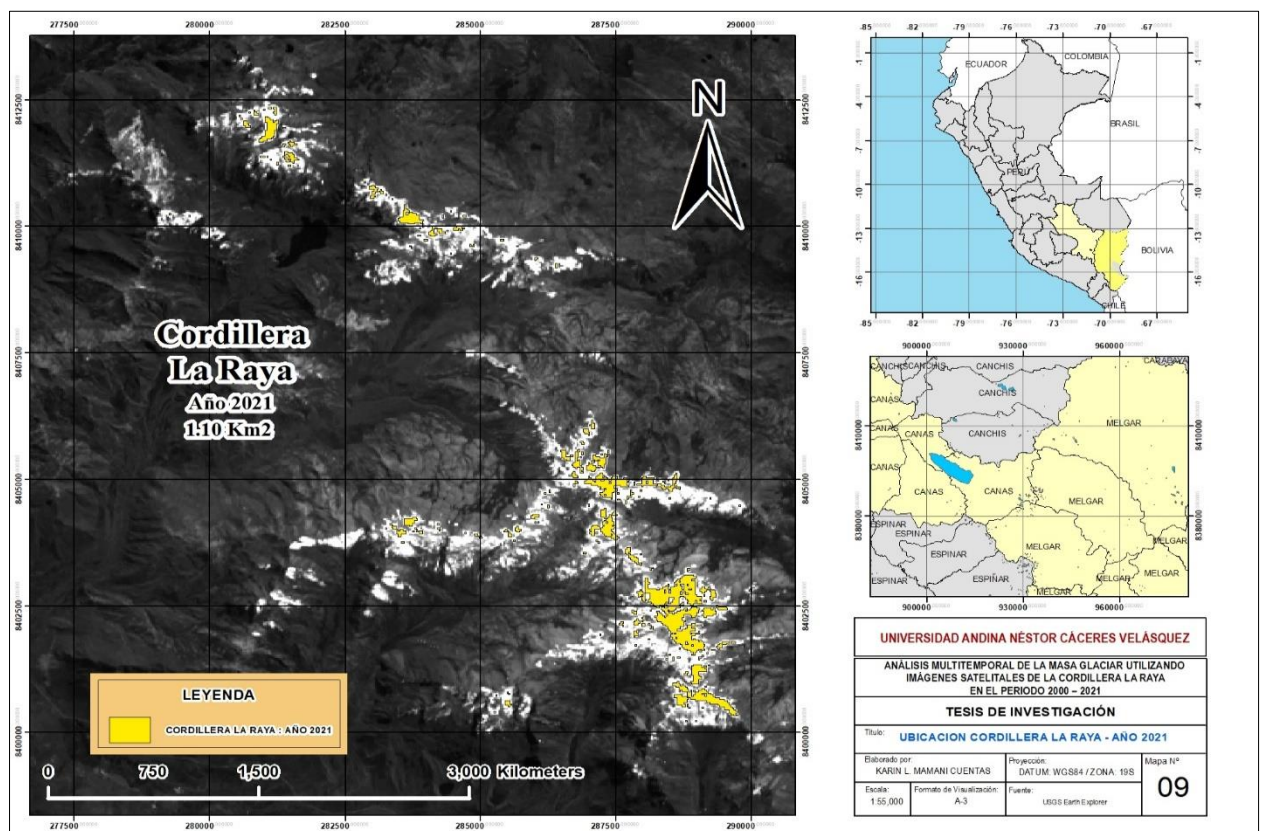


*Nota:* Imagen satelital procesada en el software QGis y ArcMap.

En la figura correspondiente se observa que para el año 2018 la temperatura mínima registrada fue de  $-1.2\text{ }^{\circ}\text{C}$ , y la cobertura glaciaria indicaba el valor de  $1.52\text{ km}^2$  (el cual demuestra un decrecimiento de área de  $0.59\text{ km}^2$  con respecto al año 2015) para llegar a esta conclusión ha sido necesario cumplir cuidadosamente con la selección de la imagen satelital, la cual busca la estación de otoño (estación que tiene la presencia de nubosidad  $<$  al 15%); posterior a ello se descarga la imagen de USGS y procesa en el software QGIS, recortando el área de interés (recorte de máscara en formato "shapefile"), así procedemos a hallar la NDSI (Índice Diferencial Normalizado de Nieve), luego procedimos a vectorizar el mapa y corregimos geoméricamente el área del glaciario para determinar su área en  $\text{km}^2$ .

### Figura 36

#### Mapa de cobertura del área glaciaria en la cordillera La Raya: año 2021



Nota: Imagen satelital procesada en el software QGis y ArcMap.

En la figura correspondiente se observa la cobertura del año 2021 la temperatura mínima registrada fue de 0.4 °C, y la cobertura glaciaria indicaba el valor de 1.10 km<sup>2</sup> (el cual demuestra un decrecimiento de área de 0.42 km<sup>2</sup> con respecto al año 2018) para llegar a esta conclusión ha sido necesario cumplir cuidadosamente con la selección de la imagen satelital, la cual busca la estación de otoño (estación que tiene la presencia de nubosidad < al 15%); posterior a ello se descarga la imagen de USGS y procesa en el software QGIS, recortando el área de interés (recorte de máscara en formato "shapefile"), así procedemos a hallar la NDSI (Índice Diferencial Normalizado de Nieve), luego procedimos a vectorizar el mapa y corregimos geoméricamente el área del glaciario para determinar su área en km<sup>2</sup>.



#### **4.3. DEL OBJETIVO ESPECÍFICO 02: ESTIMAR LA PREDICCIÓN DE INCREMENTO O PÉRDIDA DE MASA GLACIAR EN LA CORDILLERA LA RAYA EN EL AÑO 2040.**

La regresión lineal posee enfoque matemático utilizado para describir la relación entre diversas variables. En este sentido, comprendemos que estas son herramientas estadísticas que permiten prever el comportamiento futuro de una variable en función de otra ya conocida. El proceso se halla en estimar un valor (Y) a partir de una variable independiente (X).

La regresión lineal simple se centra en formalizar una relación entre una sola variable independiente y su variable dependiente correspondiente, la cual se representa mediante una línea recta. Sin embargo, cuando los puntos en un gráfico están dispersos y no se alinean perfectamente con una línea central imaginaria, no es posible trazar una línea recta que pase por todos ellos. En su lugar, la regresión lineal se utiliza para encontrar la posición óptima de dicha línea, minimizando la distancia entre los puntos y la línea recta. Aunque algunos puntos pueden quedar alejados de la línea, el objetivo es que esas distancias sean lo más pequeñas posible.

La ecuación de la línea recta posee la siguiente conformación:

$$Y = \beta_0 + \beta_1 X + \varepsilon,$$

donde:

- Y es representada por la variable dependiente.
- $\beta_0$  y  $\beta_1$  son dos constantes desconocidas que han de representar el punto interseccionante y la pendiente individualmente.



Para el presente caso de estudio tenemos que la variable independiente para el presente objetivo será el área de cubierta glaciar y la variable dependiente será el año de análisis; con lo cual lograremos obtener en que año próximo la cubierta de glaciar estaría llegando a valores de cero

**Tabla 8**

*Evolución de la cobertura glaciar de la cordillera La Raya del periodo 2000 - 2021*

<b>Año</b>	<b>Área de cobertura glaciar (km<sup>2</sup>)</b>
2000	<b>3.67</b>
2003	<b>2.82</b>
2006	<b>2.75</b>
2009	<b>2.58</b>
2012	<b>2.37</b>
2015	<b>2.11</b>
2018	<b>1.52</b>
2021	<b>1.10</b>

*Nota:* En la tabla se reflejan los datos obtenidos de procesar las imágenes satelitales en el programa QGis y ArcMap.

Después de seleccionar los datos de año y área de cobertura glaciar registrada se ingresan los datos al programa estadístico SPSS y se hace un análisis de regresión lineal y una gráfica con línea de tendencia de datos y  $R^2$  con las siguientes tablas de significancia estadística.

**Tabla 9***Análisis de regresión lineal en el programa estadística SPSS*

Resumen del modelo				
Modelo	R	R cuadrado	R cuadrado ajustado	Error estándar de la estimación
1	0,970 <sup>a</sup>	0,941	0,931	0,21047

a. Predictores: (Constante), ÁREA CUBIERTA GLACIAR KM2

*Nota:* Producida en SPSS.

Del gráfico anterior tenemos que la columna 02 "R" significa el coeficiente de correlación-de-Pearson con valor de 0.970, el cual significa que existe una correlación lineal ampliamente robusta y positiva entre ambas variables que nos encontramos analizando (debemos mencionar que la correlación-de-Pearson puede variar entre -1.00 hasta 1.00, donde el valor de 1.00 indica una correlación positiva perfecta y el -1.00 indica una correlación negativa perfecta y el valor de 0.00 indica que no hay correlación lineal entre las dos variables). El otro coeficiente a analizar se encuentra en la tercera columna "R cuadrado" con valor encontrado de 0.941 que también es conocida como el coeficiente determinativo y es una medida estadística que indica cuanta variabilidad de la variable independiente (la cubierta de área glaciar) puede ser explicada por la variable dependiente (años); la condición para validar el dato de tal columna tiene base en que: Si "R cuadrado" es igual a cero, indica que el modelo no explica ninguna variabilidad en Y a través de X, la otra condicionante es que si "R cuadrado" es igual a uno (1.00) formaliza que el modelo explica integramente la variación en Y a través de X (significando que para el presente caso todas las variaciones observadas en Y pueden explicarse por las variaciones en X). Además, podemos añadir que nuestro R cuadrado con

valor de 0.941 tiene la misma validación de indicar que el 94.1% de estimación de cobertura glaciar en el año investigado puede ser explicado por el modelo de regresión lineal.

**Tabla 10**

*Análisis de regresión lineal en el programa estadística SPSS*

		ANOVA <sup>a</sup>				
Modelo		Suma de cuadrados	gl	Media cuadrática	F	Sig.
1	Regresión	4,218	1	4,218	95,215	,000 <sup>b</sup>
	Residuo	,266	6	,044		
	Total	4,484	7			

a. Variable dependiente: AÑO

b. Predictores: (Constante), ÁREA CUBIERTA GLACIAR KM2

*Nota:* Producida en SPSS.

Del gráfico anterior nos podemos cuestionar si es posible construir un modelo de regresión a partir de la variable de "R cuadrado" y "R cuadrado ajustado"; es por ello que surge la prueba de ANOVA, procedemos a verificar el grado de significancia y tenemos el valor de 0.000 es menos a 0.005, concluyendo que es aceptable el valor encontrado a partir de los datos ingresados al paquete estadístico.

**Tabla 11***Análisis de regresión lineal en el programa estadística SPSS*

<b>Coefficientes<sup>a</sup></b>				
Modelo	Coeficientes no estandarizados		t	Sig.
	Desv. Error			
1 (Constante)		21,765	9,866	,000
AREA		,011	-	,000
CUBIERTA	B			
GLACIAR	214,744			
KM2	-0,106			
			Coefficientes estandarizados	
			Beta	
			-,970	

a. Variable dependiente: AÑO

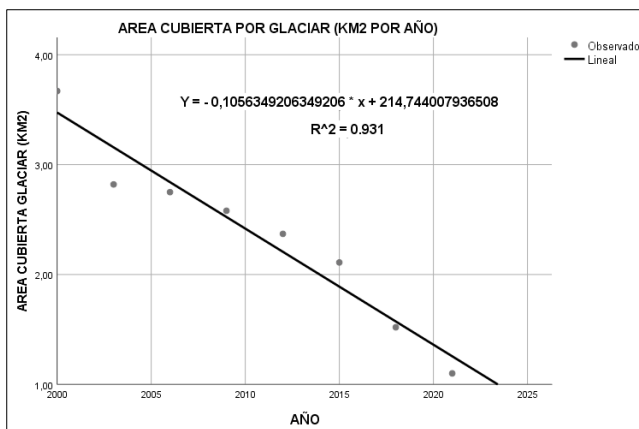
Nota: Producida en SPSS.

A partir de la tabla 11, podemos emplear los coeficientes y obtener la ecuación de regresión lineal; además, en la quinta columna se observa la "t de student" aquí podemos observar que ambos valores son iguales o mayores a 1.96, por lo que se implica que la variable y la constante son estadísticamente significativos, y el nivel de significancia es menor a 0.005.

Para construir nuestro modelo, se usan los datos hallados en la tabla anterior y procedemos a escribir la ecuación de regresión lineal; por lo tanto, en la ecuación cambiar en caso de la variable "X" el año deseado, de dicha forma podremos obtener el año en que se estima obtener la escasez de glaciación en la cordillera La Raya.

**Figura 37**

*Regresión lineal área cubierta por glaciar en la cordillera La Raya*



Nota: Producida en SPSS.

En la siguiente tabla, bajo configuración de:

$$Y = \beta_0 + \beta_1 X$$

$$Y = 214,744 + -0,106 * X$$

**Tabla 12**

*Evolución de la cobertura glaciar de la cordillera La Raya del periodo 2000 - 2021*

Año	Área de cobertura glaciar (km²)
2000	3.67
2003	2.82
2006	2.75
2009	2.58
2012	2.37
2015	2.11
2018	1.52
2021	1.10
2023	1.11
2026	0.79
2029	0.48
2032	0.16
2033	0.06
2034	0.00

Nota: En la tabla se reflejan los datos obtenidos de procesar las imágenes satelitales en el programa QGIS y ArcMap.



De la tabla anterior observamos que en base al rango de años de estudio de la presente investigación iniciamos en el año 2000 con un área de cobertura glaciar de 3.67km; después de proceder con el análisis estadístico de regresión lineal tenemos que para el año 2034 el área de cobertura glaciar será de 0.00 km<sup>2</sup>; dicha aseveración se realizó en base a la metodología abordada de análisis y procesamiento de imágenes satelitales descritas en los anteriores objetivos presentados.

#### **4.4. DEL OBJETIVO ESPECÍFICO 03: PROYECTAR LA PERDIDA DE LA COBERTURA DE MASA GLACIAR DESDE EL AÑO 2021 HASTA EL 2034.**

Como tercer objetivo específico aplicamos la regresión lineal encontrada del segundo objetivo específico, por ello usamos la ecuación lineal para desglosar la información y determinar anualmente desde el año 2021 hasta el año que estadísticamente tendremos una cobertura glaciar de 0.00 km<sup>2</sup>. A continuación mostramos el área de cobertura glaciar proyectada según año.

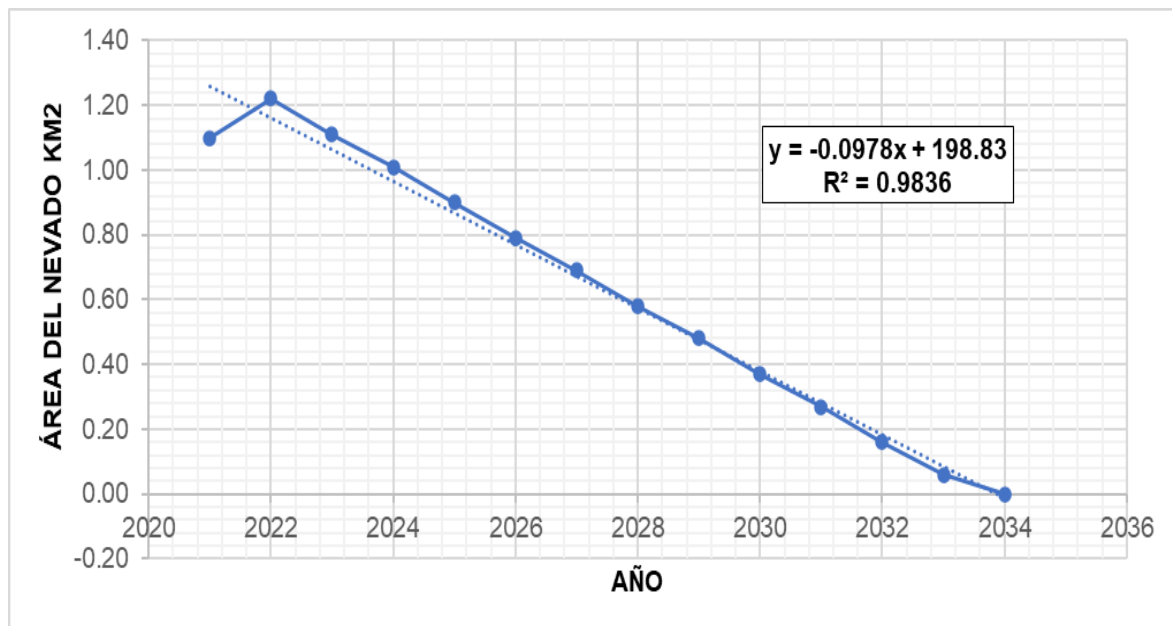
**Tabla 13**

*Evolución de la cobertura glaciar de la cordillera La Raya del periodo 2021 – 2034.*

<b>Año</b>	<b>Área de cobertura glaciar (km<sup>2</sup>)</b>
2021	1.10
2022	1.22
2023	1.11
2024	1.01
2025	0.9
2026	0.79
2027	0.69
2028	0.58
2029	0.48
2030	0.37
2031	0.27
2032	0.16
2033	0.06
2034	0.00

*Nota:* En la tabla se reflejan los datos obtenidos de la ecuación cuadrática lineal del segundo objetivo específico.

Adicionalmente se muestra en el gráfico el inicio del análisis desde el año 2021 que nos muestra un área de cobertura glaciar de. 1.0 Km<sup>2</sup>; el 2022 muestra un área de cobertura glaciar de. 1.22 Km<sup>2</sup> (un ligero incremento según análisis estadístico); el 2023 muestra un área de cobertura glaciar de 1.11 Km<sup>2</sup> (nuevamente un ligero descenso); así llegamos hasta el año 2033, donde tenemos que se muestra un área de cobertura glaciar de 0.06 Km<sup>2</sup> y para el año 2034 se tiene un área de cobertura glaciar de. 0.00 km<sup>2</sup>.

**Figura 38***Regresión lineal área cubierta por glaciación en la cordillera La Raya (2021 al 2034)*

*Nota:* En la figura se muestra el descenso de cobertura glaciación.

#### 4.5. PRUEBA DE HIPÓTESIS

Deducimos finalmente que la hipótesis inicial es correcta, ya que la investigación confirmó la existencia de una característica inversa entre la dinámica glaciación (en términos de área y volumen) y la variación espacial en la cordillera La Raya. Los resultados obtenidos mediante pruebas de correlación (Pearson y Rho de Spearman), aplicadas de acuerdo al tipo de distribución de los datos, respaldaron esta conclusión. En particular, se empleó la prueba de correlación lineal de Pearson para datos con distribución normal, y la de Rho de Spearman para datos no normales, con el fin de determinar el grado de correlación entre la dinámica glaciación a nivel global y la pérdida de cobertura glaciación. Se adoptó un nivel de confianza del 95% para evaluar la significancia ( $\alpha$ ) de los resultados, los cuales revelaron una correlación inversa entre buena y muy buena ( $r$  entre 0.61 y 0.89) entre la dinámica glaciación global y la pérdida de cobertura glaciación, con valores específicos de correlación entre 0.72 y 0.85.



En resumen, la investigación demuestra que cuanto más intensa es la dinámica glaciaria global, mayor es la pérdida de cobertura glaciaria. Sin embargo, es importante señalar que las proyecciones futuras pueden estar influenciadas por otros factores, tales como las características morfológicas, topográficas y climáticas, incluyendo fenómenos como el ENOS, los escenarios RCP y los patrones de precipitación.

### Tabla 14

#### *Pruebas estadísticas de normalidad y correlación*

Prueba estadística	Dinámica glaciaria mundial (km <sup>2</sup> )	Área de cobertura glaciaria (km <sup>2</sup> )
Pearson $r^2$	0.61	0.72
Rho de Spearman	0.89	0.85

*Nota:* En la tabla se reflejan los datos obtenidos de la ecuación cuadrática lineal del segundo objetivo específico.

Por lo tanto, se acepta la hipótesis Alternativa el mismo que ha sido corroborada en la presente investigación.

#### 4.6. DISCUSIÓN

Los resultados graficados en el anterior capítulo de la cobertura glaciaria de la cordillera La Raya fueron satisfactorios, ya que las áreas calculadas mostraron una gran concordancia con los datos del inventario de glaciares realizado por la Autoridad Nacional del Agua (ANA) y el Ministerio de Agricultura y Riego (MINAGRI) en 2014. En dicho estudio se analizaron los años 1990, 2000, 2010 y 2017. Para validar los resultados obtenidos en esta investigación, se utilizaron las ecuaciones específicas para el análisis de glaciares mediante teledetección, como se explicó previamente, lo que permitió procesar correctamente las imágenes descargadas del portal USGS.

El cálculo del Índice de Nieve de Diferencia Normalizada (NDSI) fue útil para identificar distintas superficies en la cordillera La Raya, como suelos, vegetación y nubes. No obstante, se detectaron algunos errores asociados a las sombras, que confundían las áreas glaciales con otras coberturas, lo que exigió realizar correcciones manuales, sobre todo en zonas donde coincidían lagunas, glaciares y sombras. Por su parte, aunque el Índice de Agua de Diferencia Normalizada (NDWI) fue eficaz para identificar cuerpos de agua grandes y profundos, resultó menos preciso al detectar lagunas pequeñas y de poca profundidad.

A través del procesamiento de imágenes satelitales, se determinó que entre los años 2000 y 2021, la cordillera La Raya perdió un total de 2.570 km<sup>2</sup> de cobertura glaciaria, lo que corresponde a una pérdida anual de aproximadamente 0.36 km<sup>2</sup>. Este valor es comparable a la tasa de retroceso anual de 0.47 km<sup>2</sup> observada en el nevado Huascarán entre 1990 y 2017, y a la pérdida de 0.50 km<sup>2</sup>/año reportada por Gómez W. en 2010, debido a la similitud en las metodologías empleadas para el procesamiento de las imágenes satelitales. A continuación, se presenta una tabla que resume el comportamiento del retroceso glaciario en Sudamérica, incluyendo los datos de la presente investigación.

**Tabla 15**

*Discusión de reducción de cobertura glaciar de diversas investigaciones.*

Glaciar	Año	Imagen usada	Referencia	Área (Km <sup>2</sup> )
Cotopaxi	1976	Fotografías vist aérea	Jordan. et al. 2005	19.24
	1987	Landsat TM	K Veettil. et al. (2016)	13.65
	1997	Fotografías aereas	Jordan. et al. 2005	13.45
	2001	Landsat ETM+	K Veettil. et al. (2012)	12.76
	2014	Landsat OLI	K Veettil. et al. (2016)	11.37
Nevado Tuco	1975	Landsat MSS	K Veettil. et al. (2016)	4.33
	1987	Landsat TM.	K Veettil. et al. (2016)	3.32
	1998	Landsat TM	K Veettil. et al. (2016)	2.85
	2005	Landsat TM	K Veettil. et al. (2016)	2.58
	2015	Landsat OLI	K Veettil. et al. (2016)	2.21
Nevado Cololo	1975	Landsat MSS	K Veettil. et al. (2016)	43.70
	1989	Landsat TM	Sanches (2013)	35.44
	1997	Landsat TM	Sanches (2013)	31.40
	2008	Landsat TM	Sanches (2013)	25.51
	2015	Landsat OLI	K Veettil. et al. (2016)	17.84
Nevado Coropuna	1975	Landsat MSS	K Veettil. et al. (2016)	66.00
	1986	Landsat TM	K Veettil. et al. (2016a)	57.57
	1997	Landsat TM	K Veettil. et al. (2016a)	52.51
	2006	Landsat TM	K Veettil. et al. (2016a)	48.63
	2015	Landsat OLI	K Veettil. et al. (2016)	43.04
Nevados Allin Capac y Chichi Capac	1975	Landsat TM	Diaz Aguilar, Renny Daniel et al., (2017)	52.30
	1985	Landsat TM	Diaz Aguilar, Renny Daniel et al., (2017)	33.50
	1995	Landsat TM	Diaz Aguilar, Renny Daniel et al., (2017)	24.90
	2005	Landsat TM	Diaz Aguilar, Renny Daniel et al., (2017)	20.10
	2015	Landsat TM	Diaz Aguilar, Renny Daniel et al., (2017)	16.90
Glaciar Chimbolla: Cordillera La Raya	2000	Landsat TM	Este estudio	3.67
	2003	Landsat TM	Este estudio	2.82
	2006	Landsat TM	Este estudio	2.75
	2009	Landsat TM	Este estudio	2.58
	2012	Landsat TM	Este estudio	2.37
	2015	Landsat TM	Este estudio	2.11
	2018	Landsat TM	Este estudio	1.52
2021	Landsat TM	Este estudio	1.10	

*Nota:* Antecedentes y presente estudio.

En el estudio realizado por Huayaney, M. (2008) en Ancash, específicamente en el glaciar Cojup en el sector de la laguna Palcacocha, se



observó una disminución significativa en la cobertura glaciar. En 1989, el área glaciar era de 67.8109 km<sup>2</sup>, mientras que en 1998 se redujo a 52.9353 km<sup>2</sup>, para 2005 el área fue de 50.9837 km<sup>2</sup> y en 2014 disminuyó aún más a 41.5184 km<sup>2</sup>. Este retroceso equivale a una pérdida del 38.77% de la cobertura glaciar entre 1989 y 2014. De manera similar, Arévalo, A. (2015) llevó a cabo una investigación en la Cordillera Blanca, situada entre Ancash y La Libertad, donde, durante el periodo de análisis 2004-2014, la superficie glaciar pasó de 515.4 km<sup>2</sup> a 484.4 km<sup>2</sup>, lo que representó una reducción del 6% del total.

Otro estudio relevante fue el de Díaz Aguilar, Renny Daniel et al. (2017), quienes analizaron los nevados Allin Capac y Chichi Capac, en la región de Puno, una investigación geográficamente cercana a la cordillera La Raya. En este análisis, se descubrió que en 1975 la cobertura glaciar era de 52.3 km<sup>2</sup>, pero para 2015 se había reducido a 16.9 km<sup>2</sup>, lo que equivale a una pérdida total de 35.6 km<sup>2</sup>. Además, en 1975, el 35% de la cobertura glaciar se encontraba por debajo de los 5000 metros sobre el nivel del mar, mientras que en 2015 este porcentaje había disminuido al 9%.

En el presente estudio sobre la cordillera La Raya, se observaron patrones similares en cuanto a las condiciones geográficas que influyen en la formación de glaciares, donde la altitud desempeña un papel clave. Sin embargo, la extensión de la masa glaciar varía entre los diferentes glaciares. Los resultados muestran que la cobertura glaciar en La Raya fue de 3.67 km<sup>2</sup> en el año 2000, disminuyendo a 2.82 km<sup>2</sup> en 2003, 2.75 km<sup>2</sup> en 2006, 2.58 km<sup>2</sup> en 2009, 2.37 km<sup>2</sup> en 2012, 2.11 km<sup>2</sup> en 2015, 1.52 km<sup>2</sup> en 2018, y finalmente 1.10 km<sup>2</sup> en 2021. En promedio, se registró una reducción total de 2.57 km<sup>2</sup> durante los 22 años estudiados, lo que representa una pérdida del 70.03% entre 2000 y 2021.



La tabla adjunta resume estos cambios en la superficie glaciar analizada en este estudio, junto con los resultados de investigaciones previas. Por ejemplo, entre 1975 y 2015, los porcentajes de pérdida de superficie glaciar en Cotopaxi fueron del 57.65%, en el nevado Tuco del 48.96%, en el nevado Cololo del 59.17%, y en el nevado Coropuna del 34.78%. Cabe destacar que la mayor tasa de retroceso glaciar ocurrió entre 1975 y 1998, con pérdidas del 30.1%, 34.18%, 28.14% y 20.43% respectivamente, siendo la Cordillera Blanca un caso de especial atención.

Los resultados de Ortiz y Torres en la microcuenca de la Laguna Llanganuco muestran una reducción de 1.523 km<sup>2</sup> entre 1987 y 1996, y de 2.345 km<sup>2</sup> entre 1996 y 2017. Estos hallazgos son consistentes con los resultados de este estudio, que registró una disminución de 1.350 km<sup>2</sup> entre 1990 y 2000, y de 3.816 km<sup>2</sup> en los 10 años posteriores.

Finalmente, según las proyecciones del INAIGEM (2018), se prevén las siguientes fechas para la desaparición de glaciares en las peruanas cordilleras: Chila en 2021, Chonta en 2023, La Viuda y Huanzo en 2024, La Raya en 2031, Urubamba en 2034, Carabaya en 2038, Huallanca en 2039, Huaytapallana en 2040, Huagoruncho y Vilcabamba en 2042, Central en 2048, Ampato en 2052, Raura en 2056, Apolobamba en 2066, Vilcanota en 2075, Huayhuash en 2099 y la Cordillera Blanca en 2111. La estimación de que la cobertura glaciar en La Raya alcanzará los 0.00 km<sup>2</sup> en 2034 coincide con los datos proyectados por el INAIGEM.

## CONCLUSIONES

**Primera:** Después de analizar el comportamiento multitemporal de la cordillera La Raya utilizando imágenes satelitales del departamento de Cusco y Puno en el periodo 2000– 2021 usando la teledetección y softwares como QGIS y ArcMap se encontró que la cartografía de superficie glaciar fue elaborada a partir del cálculo del NDSI y se mostró precisión destacable a causa de la marcada signatura espectral (característica de la nieve que la diferencia de otras cubiertas); entonces la variación de cobertura glaciar en la cordillera desde el año 2000 al año 2021 fue en decrecimiento de 2.57 km<sup>2</sup> (en términos de porcentaje equivale a una reducción del 70.03%), así también tenemos una tasa promedio de reducción de 0.37 km<sup>2</sup>/año; también aclaramos que de todas las cordilleras presentes en la cordillera peruana, la cordillera La Raya es la más pequeña de entre todas las cordilleras ubicadas al sur del Perú (con una extensión glaciar de 31km); pero su decrecimiento viene de forma lenta a comparación de otros glaciares de las demás cordilleras.

**Segunda:** Acorde al objetivo de determinar la pérdida de la superficie de masa glaciar en la cordillera La Raya en el periodo 2000 – 2021 se elaboró mapas de cobertura glaciar y así obtuvimos que para el año 2000 se tuvo una cobertura glaciar de 3.67 km<sup>2</sup>; para el año 2003 la cobertura glaciar fue de 2.82 km<sup>2</sup>; para el año 2006 la cobertura glaciar fue de 2.75 km<sup>2</sup>; para el año 2009 la cobertura glaciar fue de 2.58 km<sup>2</sup>; para el año 2012 la cobertura glaciar fue de 2.37 km<sup>2</sup>; para el año 2015 la



cobertura glaciar fue de 2.11 km<sup>2</sup>; para el año 2018 la cobertura glaciar fue de 1.52 km<sup>2</sup>; para el año 2021 la cobertura glaciar fue de 1.10 km<sup>2</sup>; como indican los datos de interés, tenemos un decrecimiento que se da de forma lineal; por otro lado, los datos del INAIGEM indican que para el año 2014 indicaba que la cordillera presentaba un área total cubierta de glaciar equivalente a 3.06 km<sup>2</sup>; así mismo, para el año 2016 precisó encontrar la cobertura glaciar en la cantidad de 1.91 km<sup>2</sup>, considerando que el año de 1962 se encontraba la cantidad de 11.27 km<sup>2</sup> (por ende podemos decir que hubo una reducción del 83,05% en el periodo mencionado).

**Tercera:** Acorde al objetivo de estimar la predicción de incremento o pérdida de masa glaciar en la cordillera La Raya en el año 2040 usamos el modelo estadístico de regresión lineal utilizando los datos de "año" (como variable Y) & "área de cobertura glaciar - km<sup>2</sup>" (variable X); dicho análisis se realizó para estimar directamente en que año la cobertura glaciar indicaría valores de 0.00 km<sup>2</sup>; usando el programa SPSS se determinó que el coeficiente de correlación de Pearson "R" tuvo un valor de 0.970 el cual significa que existe una correlación lineal ampliamente robusta y positiva, la ecuación formada es [  $Y = 214,744 + -0,106 * X$  ] y después de ingresar años posteriores al 2021 encontramos que la cobertura glaciar será de 0.00 km<sup>2</sup> en el año 2034, esta estimación se afirma por lo declarado por el INAIGEM que en el año 2018 estimó que la cordillera La Raya desaparecería en el año 2031 junto a otras cordilleras del sur del Perú.



**Cuarta:** Acorde usamos la ecuación lineal para desglosar la información y determinar anualmente desde el año 2021 que nos muestra un área de cobertura glaciar de 1.0 Km<sup>2</sup>; el 2022 muestra un área de cobertura glaciar de 1.22 Km<sup>2</sup> (un ligero incremento según análisis estadístico); el 2023 muestra un área de cobertura glaciar de 1.11 Km<sup>2</sup> (nuevamente un ligero descenso); así llegamos hasta el año 2033, donde tenemos que se muestra un área de cobertura glaciar de 0.06 Km<sup>2</sup> y para el año 2034 se tiene un área de cobertura glaciar de 0.00 km<sup>2</sup>.



## RECOMENDACIONES

- Primera:** Se recomienda a otros investigadores validar los datos obtenidos del procesamiento para otorgar mayor credibilidad a los datos obtenidos de la estimación de cobertura glaciar, esto aplicando otros métodos de campo mediante técnicas de medición de desglaciación como medición de caudales de riachuelos y volumen de almacenamiento de las lagunas adyacentes.
- Segunda:** Se recomienda a otros investigadores promover la cuantificación multitemporal para hallar la correlación de datos respecto al pasado, presente y futuro de los recursos hídricos adyacentes a los glaciares, lagunas y humedales de la cordillera La Raya.
- Tercera:** Se recomienda a otros investigadores emplear el uso imágenes con característica de 5% de nubosidad; ello con la finalidad de extraer con mayor visibilidad las coberturas, evitando así la interrupción con la presencia de "cirrus".
- Cuarta:** Se recomienda a otros investigadores emplear el uso de sensores satelitales de una misma resolución espacial, lográndose con ello el resultado de trabajos en las mismas condiciones.



## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Aguilón, A., et al. (2012). Ambientes glaciares. UNAM-Perú, p. 29.
- Alva, M., & Meléndez, J. (2008). Aplicación de la teledetección para el análisis multitemporal de la regresión glaciaria en la Cordillera Blanca. Universidad Nacional Mayor de San Marcos, Lima-Perú, p. 75.
- Autoridad Nacional del Agua (ANA). (2014). Inventario nacional de glaciares y lagunas del Perú. Recuperado de <http://www.sernanp.gob.pe/huascarán>
- Anil, V., & Pratibha, S. (2017). Assessment of glacier fluctuations in the Himalaya. *Science and Geopolitics of The White World*, 183-213.
- Administración de Parques Nacionales (APN - SIB). (2005). Protocolo para el procesamiento de imágenes satelitales Landsat para aplicaciones de la administración de parques nacionales. Buenos Aires, Argentina, p. 21.
- Ariza, A. (s.f.). Grupo interno de trabajo en percepción remota y aplicaciones geográficas Instituto Geográfico. Recuperado de [http://ocw.upm.es/ingenieria-cartografica-geodesica-yfotogrametria/topografia-cartografia-geodesia/contenidos/TEMA\\_11\\_FOTOGRAMETRIA\\_Y\\_TELEDETECCION/sis-t\\_capturay\\_analisis\\_inform.pdf](http://ocw.upm.es/ingenieria-cartografica-geodesica-yfotogrametria/topografia-cartografia-geodesia/contenidos/TEMA_11_FOTOGRAMETRIA_Y_TELEDETECCION/sis-t_capturay_analisis_inform.pdf)
- Baojuan, S., Yetang, W., & Zhongqin, L. (2017). Glacier shrinkage in the Chinese Tien Shan Mountains from 1959/1972 to 2010/2012. *Arctic, Antarctic, and Alpine Research*, 49(2), 213.
- Georges, C. (2004). 20th-century glacier fluctuations in the tropical Cordillera Blanca, Perú. *Arctic, Antarctic, and Alpine Research*, 100-107.
- Chander, G., Markham, B., & Helder, D. (2009). Estimating recent glacier changes in Central Himalaya, India, using remote sensing data. En R. Singh, U.



- Schickhoff, & S. Mal (Eds.), *Climate change, glacier response, and vegetation dynamics in the Himalaya* (pp. 893–903). Cham: Springer.
- Colonia, D. F., & Torres, J. E. (2007). *Determinación del retroceso glaciar en la microcuenca de Llanganuco, a través del análisis multitemporal en el periodo 1987-2007*. Universidad Nacional Santiago Antúnez de Mayolo, Facultad de Ciencias del Ambiente, Huaraz, Ancash-Perú, p. 2.
- Copé de los Mozos, R. (2012). *Cálculo del retroceso glaciar en la isla de Livingston y de su línea de costa para la actualización de cartografía*. Valencia, España: Máster en Tecnologías de Información Geográfica, p. 9.
- Darío, I., & Darío, R. (2006). *Metodología de la investigación*. Universidad EART, Colombia, p. 158. ISBN: 958-8281-11-3.
- Gómez, W., & Zamora, N. (2008). *Evaluación de la cobertura glaciar utilizando técnicas de teledetección espacial en la subcuenca del río Quellcayhuanca – Río Santa*. Universidad Nacional Federico Villarreal, Facultad de Ingeniería Geográfica, Ambiental y Ecoturismo, p. 10.
- Harris, A. (2017). Índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI). Recuperado de <http://www.harrisgeospatial.com/docs/alphabeticallistspectralindices.html>
- IPCC. (2014). *Cambio climático: Impactos, adaptación y vulnerabilidad*. Contribución del Grupo de Trabajo II al Quinto Informe de Evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático, p. 200.
- Jack, D., Ives, B., & Mool, K. (2010). *Formation of glacial lakes in the Hindu Kush-Himalayas and GLOF risk assessment*. International Centre for Integrated Mountain Development, Kathmandu, p. 1-56.



- Kääb, A., et al. (2014). Glacier mapping and monitoring based on spectral data. *Global Land Ice Measurements from Space*, p. 14.
- Kodirekkal, K. (2017). Cultural adaptation to climate change among indigenous people of South India. *Cambio Climático*, 1–14.
- López, I., Valero, B., & Mark, B. (2017). Hydrological and depositional processes associated with recent glacier recession in Yanamarey catchment, Cordillera Blanca (Peru). *Science of the Total Environment*, 272-282.
- Mal, S., Singh, R., & Schickhoff, U. (2016). Estimating recent glacier changes in Central Himalaya, India, using remote sensing data. En R. Singh, U. Schickhoff, & S. Mal (Eds.), *Climate change, response of glaciers and vegetation dynamics in the Himalayas* (p. 58). Cham: Springer.
- McFeeters, S. (2007). The use of the normalized difference water index (NDWI) in the delineation of open water features. *International Journal of Remote Sensing*, p. 7.
- MINAGRI. (2009). *Importancia de los glaciares en el Perú*. Lima-Perú, p. 1.
- Morales, B., & Martel, A. (2017). La unidad norte de la Cordillera Blanca y el cambio climático. *Revista de Glaciares y Ecosistemas de Montaña*, p. 14.
- Moreno, G. (2007). *Introducción a la metodología de la investigación educativa* (2ª ed.). Guadalajara, México: Progreso S.A. de C.V., p. 128.
- Muñoz, J., & Sobrino, A. (2009). Obtención de la temperatura de la superficie terrestre a partir de la serie histórica Landsat. Valencia, España, p. 2.
- Muñoz, D., & Montenegro, A. (2008). Análisis multitemporal de cambios de uso del suelo y coberturas en la microcuenca Las Minas, Corregimiento de la Laguna, Municipio de Pasto, Departamento de Nariño, Colombia. p. 9.



- Municipalidad de Miranda. (2010). Esquema de ordenamiento territorial - Diagnóstico territorial. Paraguay, p. 1.
- National Geographic. (2024). ¿Qué es calentamiento global?. Recuperado de <http://www.nationalgeographic.es/medio-ambiente/que-es-el-calentamiento-global>
- Paez, B., & Garcia, A. (2016). Análisis multitemporal del retroceso glaciar en la Sierra Nevada de Santa Marta – Colombia para los períodos 1986, 1996, 2007 y 2014. Bogotá D.C., Colombia: Universidad Distrital Francisco José de Caldas, p. 8.
- Pérez, C., & Muñoz, A. (2006). Teledetección: nociones y aplicaciones. Universidad de Salamanca, España, p. 80.
- Qiao, L., et al. (2015). Glacier changes in the Lancang River Basin, China, between 1968–1975 and 2005–2010. Arctic, Antarctic, and Alpine Research (2<sup>a</sup> ed.), 335–344.



# ANEXOS



### MATRIZ DE CONSISTENCIA

**TITULO:** ANÁLISIS MULTITEMPORAL DE LA MASA GLACIAR UTILIZANDO IMÁGENES SATELITALES DE LA CORDILLERA LA RAYA EN EL PERIODO 2000 - 2021

ANÁLISIS MULTITEMPORAL DE LA MASA GLACIAR UTILIZANDO IMÁGENES SATELITALES DE LA CORDILLERA LA RAYA EN EL PERIODO 2000 – 2021							
Problema	Objetivos	Hipótesis	Variable-	Dimensión-	Indicador	Unidad	Metodología
Problema General	Objetivo General	Hipótesis General					
¿Cuál es el comportamiento multitemporal de la cordillera La Raya utilizando imágenes satelitales del departamento de Puno y Cusco en el periodo 2000– 2021?	Analizar el comportamiento multitemporal de la cordillera La Raya utilizando imágenes satelitales del departamento de Puno y Cusco en el periodo 2000 – 2021	El comportamiento multitemporal de la cordillera La Raya utilizando imágenes satelitales del departamento de Puno y Cusco en el periodo 2000 – 2021 posee una tendencia de perdida.	<b>Variable Dependiente</b> Análisis multitemporal de la cobertura de masa glaciar	Variabilidad multitemporal de la cobertura de masa glaciar	Temperatura media anual	°C	<b>Tipo de Investigación</b> Cuantitativa No-experimental Explicativa Longitudinal
<b>Problema Especifico 1</b>	<b>Objetivo Especifico 1</b>	<b>Hipótesis Especifica 1</b>	<b>Variable Independiente</b>	Extensión de cobertura de masa glaciar en la cordillera	Incremento de cobertura de masa glaciar según año	Km2	<b>Técnicas</b> - Exploración visual - Procesamiento de imágenes satelitales - Estimación de área de cobertura glaciar
¿Cuánta es la perdida de la cobertura de masa glaciar en la cordillera La Raya en el periodo 2000 – 2021?	Determinar la perdida de la cobertura de masa glaciar en la cordillera La Raya en el periodo 2000 – 2021.	Se tiene el efecto de perdida de la cobertura de masa glaciar en la cordillera La Raya en el periodo 2000 – 2021 a causa de la dinámica glaciar espacial mundial.	Cordillera La Raya: periodo 2000 - 2021				
<b>Problema Especifico 2</b>	<b>Objetivo Especifico 2</b>	<b>Hipótesis Especifica 2</b>			Reducción de cobertura de masa glaciar según año	Km2	
¿Cuánta es la predicción de la perdida de la cobertura de masa glaciar	Estimar la predicción de perdida de la cobertura de masa glaciar en la	El efecto de perdida de cobertura de masa glaciar en la cordillera La Raya hasta el					



en la cordillera La Raya en el año 2040?	cordillera La Raya en el año 2040.	año 2040 se corrobora estadísticamente mediante la regresión.					<b>Instrumentos</b> - USGS Earth Explorer - Software Qgis - Software Arc Map
<b>Problema Especifico 3</b>	<b>Objetivo Especifico 3</b>	<b>Hipótesis Especifica 3</b>					
¿Cuánta es la pérdida de la cobertura de masa glaciar en la cordillera La Raya anualmente desde el año 2021 hasta el 2034?	Proyectar la pérdida de la cobertura de masa glaciar en la cordillera La Raya anualmente desde el año 2021 hasta el 2034.	El efecto de pérdida de la cobertura de masa glaciar en la cordillera La Raya anualmente desde el año 2021 hasta el 2034 es a causa del decrecimiento que llega al 0.00 % de cobertura glaciar.					



ANEXO 1
FORMULARIO DE AUTORIZACIÓN

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

Formato digital [X]

Fecha de entrega: 06/01/2025

1. Datos del autor (es):

Formulario with fields for author information: Nombres y Apellidos, Dirección, DNI/Carné de Extranjería/Pasaporte N°, Teléfono, email, Facultad y/o Escuela de Posgrado, Escuela Profesional o Mención, Título o Grado Académico a optar, Asesor, and a section for work type and title.

Palabras claves, (3 a 5 términos): COMPORTAMIENTO, MULTITEMPORAL, COBERTURA GLACIAR

¿Esta obra se desarrolló en la UANCV 1, 2?

2

1 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.

2 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: CONTAMINACIÓN Y CALIDAD AMBIENTAL - P22

Firma de Autor



huella digital

06 DE ENERO DEL 2025

Fecha

