



# UNIVERSIDAD NACIONAL DEL ALTIPLANO

## ESCUELA DE POSGRADO MAESTRÍA EN ECOLOGÍA



### TESIS

**ANÁLISIS MULTITEMPORAL DE LA COBERTURA GLACIAR DEL  
NEVADO ANANEA (PUNO, PERÚ) Y SU INFLUENCIA CLIMÁTICA,  
PERÍODO 1985 – 2022**

**PRESENTADA POR:**

**MILER SHOWIL CANAZA ORTIZ**

**PARA OPTAR EL GRADO ACADÉMICO DE:**

**MAESTRO EN ECOLOGÍA**

**CON MENCIÓN EN EVALUACIÓN DEL IMPACTO AMBIENTAL**

**PUNO, PERÚ**

**2023**

Reporte de similitud

NOMBRE DEL TRABAJO

**ANÁLISIS MULTITEMPORAL DE LA COBERTURA GLACIAR DEL NEVADO ANANA (PUNO, PERÚ) Y SU INFLUENCIA CLIMÁTICA**

AUTOR

**MILER SHOWIL CANAZA ORTIZ**

RECUENTO DE PALABRAS

**25619 Words**

RECUENTO DE CARACTERES

**131392 Characters**

RECUENTO DE PÁGINAS

**115 Pages**

TAMAÑO DEL ARCHIVO

**2.5MB**

FECHA DE ENTREGA

**Dec 20, 2023 11:25 PM GMT-5**

FECHA DEL INFORME

**Dec 20, 2023 11:27 PM GMT-5**

● **14% de similitud general**

El total combinado de todas las coincidencias, incluidas las fuentes superpuestas, para cada base

- 11% Base de datos de Internet
- 2% Base de datos de publicaciones
- Base de datos de Crossref
- Base de datos de contenido publicado de Crossref
- 9% Base de datos de trabajos entregados

● **Excluir del Reporte de Similitud**

- Material bibliográfico
- Material citado
- Material citado
- Coincidencia baja (menos de 10 palabras)

UNIVERSIDAD NACIONAL DEL ALTIPLANO PUNO

Alfredo Loza Del Carpio, D. Sc.  
FACULTAD DE CIENCIAS BIOLÓGICAS



Steven Jared Enrique Corales  
INFORMACIÓN ESTADÍSTICA  
CIP. 116625



# UNIVERSIDAD NACIONAL DEL ALTIPLANO

## ESCUELA DE POSGRADO

### MAESTRÍA EN ECOLOGÍA

#### TESIS

ANÁLISIS MULTITEMPORAL DE LA COBERTURA GLACIAR DEL NEVADO  
ANANEA (PUNO, PERÚ) Y SU INFLUENCIA CLIMÁTICA, PERÍODO 1985 -  
2022



PRESENTADA POR:

MILER SHOWIL CANAZA ORTIZ

PARA OPTAR EL GRADO ACADÉMICO DE:

MAESTRO EN ECOLOGÍA

CON MENCIÓN EN EVALUACIÓN DEL IMPACTO AMBIENTAL

APROBADA POR EL JURADO SIGUIENTE:

PRESIDENTE

Dr. GILMAR GAMALIEL GOYZUETA CAMACHO

PRIMER MIEMBRO

Mg. DANTE MAMANI SAIRITUPAC

SEGUNDO MIEMBRO

M.Sc. JORGE ARUHUANCA CARTAGENA

ASESOR DE TESIS

D.Sc. ALFREDO LUDWIG LOZA DEL CARPIO

Puno, 30 de octubre de 2023

ÁREA: Ecología – Evaluación del impacto ambiental

TEMA: Análisis multitemporal de la cobertura glaciaria del nevado Ananea (Puno, Perú) y su influencia climática, período 1985 – 2022

LÍNEA: Recursos naturales y medio ambiente – calidad ambiental



## DEDICATORIA

A mi querida familia por el sustento y gratitud.



## AGRADECIMIENTOS

Quiero expresar mi agradecimiento a Dios por permitir la realización de este trabajo de investigación, a la Universidad Nacional del Altiplano por su respaldo en mi formación profesional, y a mi valiosa familia por su constante apoyo y comprensión. Asimismo, agradezco a mi asesor de tesis, el Dr. Alfredo Loza, por su guía, apoyo y valiosas recomendaciones durante este proceso.



## ÍNDICE GENERAL

	<b>Pág.</b>
DEDICATORIA	i
AGRADECIMIENTOS	ii
ÍNDICE GENERAL	iii
ÍNDICE DE TABLAS	vi
ÍNDICE DE FIGURAS	viii
ÍNDICE DE ANEXOS	x
RESUMEN	xii
ABSTRACT	xiii
INTRODUCCIÓN	1

### CAPÍTULO I

#### REVISIÓN DE LITERATURA

1.1. Marco teórico	3
1.1.1. Glaciares	3
1.1.1.1. Tipos de glaciares	4
1.1.1.2. Glaciares tropicales	4
1.1.1.3. Retroceso glaciar	5
1.1.1.4. Situación de glaciares en Perú	5
1.1.2. Teledetección y percepción remota	5
1.1.2.1. Espectro electromagnético	6
1.1.2.2. Análisis multitemporal	6
1.1.2.3. Firma espectral	7
1.1.2.4. Normalized Difference Snow Index (NDSI)	7
1.1.2.5. Sistemas de información geográfica	7
1.1.2.6. Imágenes satelitales	8
1.1.2.7. Programa Landsat	8
1.1.2.8. Resoluciones del sensor satelital	11
1.1.2.9. Correcciones para imágenes Landsat	11
1.1.2.10. Corrección radiométrica	11
1.1.2.11. Calibración radiométrica	12
1.1.2.12. Corrección atmosférica por flash atmospheric correction	13
1.1.2.13. Corrección geométrica	14
1.1.2.14. Clasificación supervisada	14



1.1.3. Indicadores climáticos	15
1.1.3.1. Precipitación y temperatura	15
1.1.3.2. Fenómeno climático “El Niño”	16
1.1.3.3. El Niño y La Niña, antecedentes en el Perú	17
1.1.3.4. Cambio climático	19
1.1.3.5. Calentamiento global	19
1.1.4. Series de tiempo	19
1.1.4.1. Prueba de normalidad	19
1.1.4.2. Regresión y correlación lineal	20
1.1.5. Topografía del nevado Ananea	21
1.1.6. Geología regional del área de investigación	22
1.1.7. Aspecto biótico del área en investigación	22
1.1.8. Actividad minera en el nevado de Ananea	23
1.2. Antecedentes	24

## **CAPÍTULO II**

### **PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA**

2.1. Identificación del problema	28
2.2. Enunciados del problema	29
2.3. Justificación	30
2.4. Objetivos	30
2.4.1. Objetivo general	30
2.4.2. Objetivos específicos	31
2.5. Hipótesis	31
2.5.1. Hipótesis general	31
2.5.2. Hipótesis específicas	31

## **CAPÍTULO III**

### **MATERIALES Y MÉTODOS**

3.1. Lugar de estudio	32
3.2. Población	37
3.3. Muestra	37
3.4. Método de investigación	38
3.5. Descripción detallada de métodos por objetivos específicos	38



## CAPÍTULO IV

### RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1. Cambios multitemporales de la cobertura glaciar Ananea	49
4.1.1. Análisis estadístico	51
4.1.2. Validación del modelo de regresión lineal simple	56
4.1.3. Cambios morfológicos	58
4.2. Comportamiento histórico de las series de precipitación y temperatura	61
4.2.1. Dinámica de la precipitación sobre el glaciar Ananea	61
4.2.2. Dinámica de la temperatura máxima sobre el glaciar Ananea	63
4.2.3. Dinámica de la temperatura mínima sobre el glaciar Ananea	67
4.3. Estimación de los futuros escenarios sobre el comportamiento glaciar	70
4.3.1. Estadística descriptiva	71
4.3.2. Análisis de correlación de variables	71
4.3.3. Modelo de regresión lineal múltiple	73
4.3.4. Verificación de multicolinealidad	75
4.3.5. Estimación del modelo final	76
4.3.6. Validación del modelo	79
CONCLUSIONES	85
RECOMENDACIONES	86
BIBLIOGRAFÍA	87
ANEXOS	94



## ÍNDICE DE TABLAS

	<b>Pág.</b>
1. Características espectrales de las imágenes Landsat 5 y 7	9
2. Características espectrales de las imágenes Landsat 8	10
3. Características climáticas de los dos episodios de El Niño en el Perú	18
4. Descripción de la accesibilidad hacia el nevado Ananea	35
5. Características espectrales de la imagen satelital Landsat 8	40
6. Cambios multitemporales de la cobertura glaciaria Ananea, 1985 - 2022	51
7. Guía de interpretación del coeficiente de correlación	49
8. Estadística descriptiva de área del nevado Ananea, periodo (1985 – 2022)	52
9. Matriz de correlación de Pearson del área de glaciaria y periodo (1985-2022)	52
10. Modelo de regresión lineal simple	54
11. Proyección de la cobertura glaciaria hacia el futuro	55
12. Lista de errores residuales de valores observados y predichos	56
13. Prueba de normalidad	57
14. Homogeneidad de varianzas	58
15. Matriz de correlación de Pearson del área de glaciaria Ananea y precipitación (1985-2022)	62
16. Matriz de correlación de Pearson del área de glaciaria Ananea y temperatura máxima (2000-2022)	65
17. El análisis de varianzas de la regresión, periodo (2001 - 2022)	66
18. Modelo de regresión lineal de temperatura	66
19. Matriz de correlación de Pearson del área de glaciaria Ananea y temperatura mínima (2001-2022)	68
20. Matriz de correlación de Pearson del área de glaciaria Ananea y producción minera (2001-2022)	70
21. Estadística descriptiva del área del glaciaria Ananea y variables independientes	71
22. Matriz de correlación de Pearson	72
23. Modelo inicial de regresión lineal múltiple	74
24. Matriz de correlación de las variables independientes	76
25. Factor de inflación de varianzas (VIF)	76
26. Análisis de varianzas del modelo final	77
27. Factor de inflación de varianzas del modelo final	77



<b>28.</b> Estimación del modelo final	78
<b>29.</b> Modelo final de regresión lineal múltiple	78
<b>30.</b> Lista de errores residuales de valores observados y predichos	80
<b>31.</b> Prueba de normalidad	81
<b>32.</b> Homogeneidad de varianza	82
<b>33.</b> Test de Breusch-Pagan (BP)	82
<b>34.</b> Test de Durbin-Watson (DW)	83

## ÍNDICE DE FIGURAS

	<b>Pág.</b>
1. Tipos de glaciar	3
2. Distribución de los glaciares tropicales en América del Sur	4
3. Teledetección, sensores remotos y satélites	6
4. Espectro electromagnético	6
5. Posición de los índices climáticos próximos a América	15
6. Interacción océano-atmósfera sobre el pacífico tropical: Condiciones normales y condiciones El Niño.	17
7. Mapa de ubicación del glaciar Ananea	33
8. Mapa de concesiones correspondiente al área de investigación	34
9. Vista de accesibilidad al área de investigación	35
10. Mapa de cuencas hidrográficas	36
12. Calibración y corrección radiométrica	41
13. Corrección atmosférica por metodo Flaash Atmospheric Correction	41
14. Corrección geométrica de las imágenes satelitales	42
15. Combinación de bandas de la imagen satelital Landsat 7	43
16. Cálculo del Índice de Diferencia Normalizado de Nieve (NDSI), Landsat 5 y 7.	44
17. Cálculo del Índice de Diferencia Normalizado de Nieve (NDSI) de Landsat 8	44
18. Índice NDSI, modificado en modo Rainbow, imagen del año 1987	45
19. Índice NDSI, modificado en modo Rainbow, imagen del año 2019	45
20. Clasificación supervisada de la imagen satelital	46
21. Variación multitemporal de la cobertura glaciar.	53
22. Proyección de la cobertura glaciar Ananea	54
23. Histograma y Q-Q plot de errores	57
24. Glaciar Ananea flanco lado Oeste - Este	59
25. Mapa de la variaciones multitemporales del glaciar Ananea	60
26. Influencia de la precipitación en la superficie glaciar	62
27. Variación multitemporal de la temperatura máxima	64
28. Influencia de la temperatura en el área glaciar	65
29. Dinámica temporal de la temperatura mínima, periodo 1985 a 2022	67
30. Dinámica temporal de la temperatura mínima, periodo 2000 a 2022	68
31. Variación de la producción minera en el periodo 2001 a 2022	69



<b>32.</b> Correlación entre múltiples variables de la presente investigación	73
<b>33.</b> Diagrama de cajas y bigotes sobre la significancia de las variables	75
<b>34.</b> Dinámica temporal de la cobertura glaciaria y T° máxima	79
<b>35.</b> Histograma y distribución de errores	80
<b>36.</b> Linealidad de la cobertura glaciaria	81



## ÍNDICE DE ANEXOS

	<b>Pág.</b>
1. Operacionalización de variables	94
2. Imágenes satelitales	96
3. Mapa de Glaciar de Ananea	97
4. Panel fotográfico	98

## RESUMEN

Los glaciares de los Andes son una de las principales fuentes de agua en América del Sur y experimentaron una disminución considerable en las últimas décadas debido al cambio climático. En la región suroriental de los Andes peruanos se localiza el nevado de Ananea, cuyas cumbres alcanzan alturas que van desde los 5100 hasta los 5800 metros sobre el nivel del mar. El objetivo de la investigación fue evaluar la variación de la cobertura glaciar de Ananea en el periodo comprendido entre 1985 y 2022, utilizando 19 imágenes LANDSAT (TM, ETM y OLI), a estas imágenes se le aplicó la calibración radiométrica, corrección atmosférica y geométrica, seguidamente el cálculo del Índice de Diferencia Normalizado de Nieve (NDSI) y, por último, la clasificación supervisada. Los resultados del estudio revelan cambios multitemporales de la cobertura glaciar de Ananea con una pérdida significativa del 62.32% en los últimos 37 años. El comportamiento histórico de la variable temperatura máxima tuvo un impacto significativo en la variación glaciar, con correlación del 0.73 ( $R^2 = 54.2\%$ ). Por último, se llevó a cabo la estimación del glaciar Ananea en futuros escenarios mediante el modelo de regresión lineal múltiple utilizando variables con nivel de significancia alta (P-valor  $< 0.05$ ). De esta manera, permitió estimar la decadencia de la cobertura glaciar de Ananea para el año 2056.

**Palabras clave:** Ananea, cambios, clima, glaciar, imagen Landsat.

## ABSTRACT

The glaciers of the Andes are one of the main sources of water in South America and they have experienced a considerable decrease in recent decades due to climate change. In the southeastern region of the Peruvian Andes is located the Ananea snow-capped mountain, whose summits reach heights ranging from 5100 to 5800 meters above sea level. The purpose of the research was to evaluate the variation of Ananea's glacier coverage in the period between 1985 and 2022, using 19 LANDSAT images (TM, ETM, and OLI), radiometric calibration, atmospheric and geometric correction, followed by calculation of the Normalized Difference Snow Index (NDSI) and, finally, supervised classification. The study's results reveal multitemporal changes in the glacier coverage of Ananea with a significant loss of 62.32% in the last 37 years. The historical behavior of the maximum temperature variable significantly impacted glacier variation, with a correlation of 0.73 ( $R^2 = 54.2\%$ ). Finally, the estimation of the Ananea glacier in future scenarios was carried out using the multiple linear regression model using variables with a high significance level ( $P\text{-value} < 0.05$ ). In this way, it was possible to estimate the decline of the glacier coverage of Ananea for the year 2056.

**Keywords:** Ananea, changes, climate, glacier and landsat image.



Dr. Renzo F. Valdivia Terrazas  
Docente Principal UNA-PUNO

## INTRODUCCIÓN

De acuerdo con el Panel Intergubernamental sobre el Cambio Climático (IPCC, 2019), Se calcula que los glaciares en todo el mundo han experimentado una disminución en su masa a una velocidad acelerada desde la década de 1990. Durante ese lapso, la tasa de pérdida de masa de los glaciares se duplicó en comparación con la década de 1980. Estos ejemplos ilustran claramente que el deshielo de los glaciares es un problema global y alarmante. Además de los impactos a nivel local, el derretimiento de los glaciares contribuye al aumento del nivel del mar, la escasez de agua dulce, y afecta tanto al turismo como a la economía.

La presencia de glaciares es esencial para la supervivencia de la humanidad y el desarrollo de las naciones y capacidad para reservar y proveer agua hace que se conviertan en reservas fundamentales para el sustento del desarrollo de actividades socioeconómicas, como también para los ecosistemas (CAN, 2014).

Los glaciares tropicales desempeñan un papel fundamental como principal suministro de agua dulce para las ciudades magnas de Sudamérica (CAN, 2014). Los Andes albergan la gran mayoría, más del 99%, de estos glaciares tropicales, según lo mencionado en un estudio realizado por Kaser (1999). Además, se estima que aproximadamente el 70% de estos glaciares se encuentran en territorio peruano, como señala Vuille et al. (2008). Lamentablemente, durante las últimas cuatro décadas, los glaciares de los Andes peruanos disminuyeron en un 42.6%. (ANA, 2014).

El retroceso de los glaciares, o la desglaciación, se debe a diversas causas, como el cambio climático, la variación de las temperaturas, modificación en los patrones de precipitación, efectos de retroalimentación y la actividad minera local. Es importante destacar que el cambio climático es la causa principal de la desglaciación, mientras que las demás variables pueden influir de manera sinérgica o modular el proceso (IPCC, 2014). Estas causas interactúan entre sí y pueden tener impactos variados según la región y las condiciones locales.

Por tanto, es crucial llevar a cabo medidas orientadas a reducir las emisiones de gases de efecto invernadero, como el dióxido de carbono. Estas emisiones han contribuido de manera significativa al calentamiento global, desencadenando así un derretimiento acelerado de los glaciares, muchas veces por el aumento de las temperaturas. Por otro

lado, la actividad minera también podría influenciar acelerando estos procesos, como en el caso de la minería desarrollada en inmediaciones del nevado de Ananea por las minas como Rinconada, Corporación Minera Ananea SAC, Empresa Minera, Titan SRL, y Unidad Minera Untuca de la empresa CORI PUNO SAC, que actualmente se hallan en la etapa de explotación y localmente estarían contribuyendo a la variación de la cobertura glaciaria tal como se evidencia en el presente estudio. En efecto, la actividad minera artesanal a los pies del nevado Ananea genera contribuciones puntuales en el proceso de la desglaciación, asociado también a los cambios climáticos globales, evidenciados por un incremento permanente de las temperaturas, producto de diferentes actividades de origen antropogénico. En ese sentido, se hace necesario cuantificar la magnitud de esos cambios producidos a través de los años en ambientes poco estudiados como en los Andes de la región Puno y verificar si podría haber algún aporte provocado por esta actividad en la zona, vinculado al cambio climático, consiguiendo el fundamento básico para la planificación de actividades de mitigación y en una herramienta primordial de gestión ambiental, útil para autoridades locales y para conocimiento de la población en general, aportando además al mejor conocimiento de la dinámica ecológica y ambiental de nuestros ecosistemas alto andinos.

La presente investigación está organizada en 4 capítulos, los cuales se detallan a continuación: en el capítulo I – Revisión de la Literatura, se detallará el marco teórico, es decir las bases teóricas de los glaciares, análisis multitemporal, teledetección, sensores remotos e imágenes satelitales. En la segunda parte se detallará los antecedentes previos que se desarrollaron los investigadores nacionales e internacionales. En el capítulo II – Planteamiento del Problema, se detallará la identificación y enunciados del problema de investigación, la justificación del porque se realizó la investigación, los objetivos generales y específicos de la investigación y finalmente las hipótesis generales y específicas de la investigación realizada. En el capítulo III – Materiales y Métodos, se detallará la ubicación del lugar de estudio de la investigación, la población, muestra, el método de investigación y la descripción de los métodos por objetivo específico. En el capítulo IV - Resultados y Discusión, se detallará las conclusiones, recomendaciones, bibliografía y finalmente los anexos de la investigación.

## CAPÍTULO I

### REVISIÓN DE LITERATURA

#### 1.1. Marco teórico

##### 1.1.1. Glaciares

Un glaciar es una masa de hielo formada por la acumulación de nieve que se comprime y endurece con el tiempo, convirtiéndose en hielo, porque se encuentran en las zonas de alta montaña y en los polos y se mueven lentamente debido a la gravedad y la erosión, son importantes para el mantenimiento del equilibrio ecológico de la tierra y fuente primordial de agua dulce (Haeberli y Hoelzle, 2007).



Figura 1. Tipos de glaciar

Fuente: Instituto Nacional de Investigación en Glaciares y Ecosistemas de Montaña, (2018).

### 1.1.1.1. Tipos de glaciares

Según Kaser (1999), existen diferentes tipos de glaciares, algunos de los cuales se describen a continuación:

**Glaciares de colgados:** Estos glaciares son denominados "colgados" porque se ubican en pendientes empinadas y a menudo están suspendidos en laderas de montañas en lugar de extenderse sobre un valle o una llanura.

**Glaciares cubiertos:** Los "glaciares cubiertos" son un tipo de glaciares que están cubiertos por una capa de roca, sedimentos o escombros, la capa de material que puede variar en espesor.

**Las morrenas:** Las morrenas son acumulaciones de material no consolidado, como rocas, sedimentos, arena, grava y arcilla, que se depositan y se acumulan en y alrededor de los glaciares. Estos depósitos glaciales son el resultado de la acción erosiva y de transporte de los glaciares a medida que avanzan y retroceden a lo largo del paisaje.

### 1.1.1.2. Glaciares tropicales

Los glaciares tropicales se ubican dentro de la región ecuatorial, en esta zona se encuentra el 50 por ciento de la superficie terrestre, habita el 70 por ciento de la población mundial; se generan factores climáticos como los monzones, los huracanes y el fenómeno El Niño, por lo que se trata del motor climático del mundo (Santillana, 2015).



Figura 2. Distribución de los glaciares tropicales en América del Sur

Fuente: Santillana, (2015).

### **1.1.1.3. Retroceso glaciar**

El retroceso glaciar es un proceso en el que el frente o borde de un glaciar se aleja o retrocede de su posición original debido a la disminución del volumen de hielo. Este fenómeno puede originarse debido a diversos factores, entre ellos, el incremento de la temperatura del aire y del agua, que señalan que los glaciares alpinos se están reduciendo rápidamente en respuesta al cambio climático global, lo que tiene implicaciones importantes para la disponibilidad de agua dulce en la región y para la seguridad de las personas que viven en áreas cercanas a los glaciares (Diaz *et al.*, 2017) El estudio destaca la importancia de la monitorización continua de los glaciares para comprender mejor su comportamiento y predecir su futuro (Haeberli *et al.*, 2007).

### **1.1.1.4. Situación de glaciares en Perú**

Los glaciares en Perú están experimentando un retroceso significativo debido al cambio climático. Según un informe del Ministerio del Ambiente de Perú, los glaciares en la Cordillera Blanca, una de las regiones más glaciares de Perú, se han reducido en un 30% en las últimas tres décadas entre 1980 y 2017 (MINAM, 2018).

### **1.1.2. Teledetección y percepción remota**

La teledetección se refiere al procedimiento de obtener información acerca de un objeto, región o fenómeno mediante el análisis de datos recopilados por dispositivos remotos, como sensores en satélites o aviones. Se utiliza para el monitoreo de la tierra, la atmósfera y el océano, y para aplicaciones en campos como la agricultura, la geología, la climatología, la cartografía y la gestión del medio ambiente (Lillesand *et al.*, 2015).

Los sensores remotos son dispositivos que permiten capturar información sobre la superficie terrestre desde una distancia, sin necesidad de contacto directo con el objeto o la zona de interés. Estos sensores pueden capturar información en forma de imágenes, datos espectrales o datos de elevación, y son utilizados en diversas aplicaciones, como la teledetección, la cartografía, la agricultura, la geología, la gestión del medio ambiente y la meteorología (Jensen, 2016).



Figura 3. Teledetección, sensores remotos y satélites.

Fuente: Lillesand *et al.* (2015).

### 1.1.2.1. Espectro electromagnético

El espectro electromagnético es el rango completo de todas las ondas electromagnéticas que se propagan en el espacio, que incluyen desde las ondas de radio de baja frecuencia hasta los rayos gamma de alta frecuencia, donde las ondas electromagnéticas se caracterizan por su longitud de onda y su frecuencia, y diferentes tipos de ondas tienen diferentes aplicaciones prácticas, como la transmisión de señales de radio, la calefacción por microondas, la iluminación con luz visible y la radioterapia con rayos X (Campbell y Wynne, 2011).

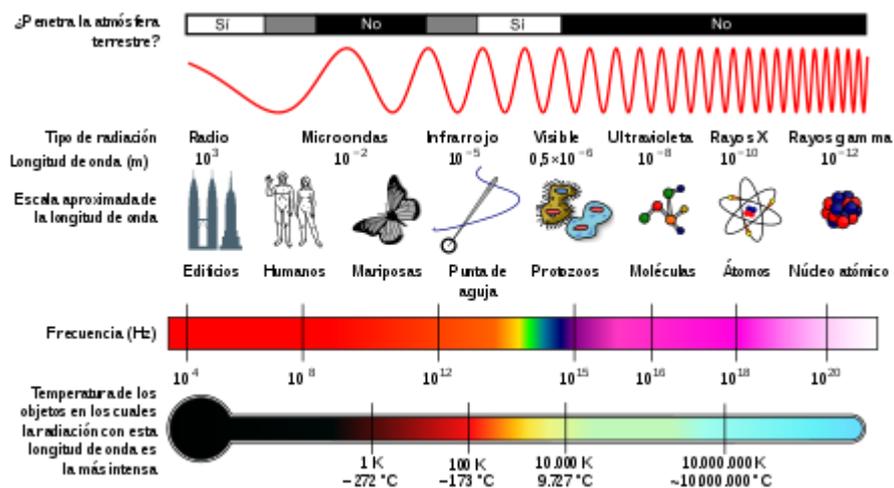


Figura 4. Espectro electromagnético.

Fuente: Campbell y Wynne (2011).

### 1.1.2.2. Análisis multitemporal

El análisis multitemporal se refiere al análisis de datos de imágenes satelitales o de otro tipo que se han adquirido en diferentes momentos en el tiempo. El objetivo

principal es identificar y cuantificar los cambios en el paisaje o en el medio ambiente a lo largo del tiempo (Lu y Weng, 2007).

El análisis multitemporal es un método importante para la teledetección y se aplica en varios campos, como la gestión de recursos naturales, la evaluación de impacto ambiental, la planificación urbana, la agricultura, la silvicultura y la gestión de desastres naturales.

### **1.1.2.3. Firma espectral**

La firma espectral se refiere al patrón único de reflectancia o emisión de una superficie terrestre en función de la longitud de onda de la radiación electromagnética incidente o emitida. Cada material o tipo de cobertura terrestre tiene una firma espectral característica que se puede utilizar para identificarlo y distinguirlo de otros materiales o tipos de cobertura (Richards y Jia, 2006).

### **1.1.2.4. Normalized Difference Snow Index (NDSI)**

El Índice Normalizado de Nieve (Normalized Difference Snow Index o NDSI,) es un índice espectral utilizado para detectar la presencia de nieve en imágenes de satélite. Este índice se calcula a partir de la reflectancia en dos bandas espectrales, la banda visible y la banda del infrarrojo cercano (NIR), y según Hall *et al.* (1995), define la siguiente ecuación:

$$\text{NDSI} = (R_{\text{NIR}} - R_{\text{vis}}) / (R_{\text{NIR}} + R_{\text{vis}})$$

Donde  $R_{\text{NIR}}$  y  $R_{\text{vis}}$  son las reflectancias en las bandas del NIR y visible, respectivamente.

El valor resultante del índice varía de -1 a 1, y los valores cercanos a 1 indican una alta probabilidad de presencia de nieve, mientras que los valores cercanos a -1 indican una baja probabilidad. El NDSI se utiliza comúnmente para detectar la presencia de nieve en regiones montañosas y en áreas polares (Hall *et al.*, 1995).

### **1.1.2.5. Sistemas de información geográfica**

La teledetección y los sistemas de información geográfica (SIG) están estrechamente relacionados, ya que la teledetección proporciona una fuente de datos para los SIG y los SIG proporcionan una plataforma para el estudio y visualización de los datos de teledetección. Los datos de teledetección pueden ser importados en un SIG y utilizados para crear mapas temáticos y modelos de la

superficie terrestre. Por otro lado, los SIG pueden proporcionar herramientas para el análisis espacial de los datos de teledetección, lo que permite la identificación de patrones y cambios en la superficie terrestre (Lillesand *et al.*, 2015).

#### **1.1.2.6. Imágenes satelitales**

Una imagen satelital es una imagen de la superficie terrestre obtenida por medio de un sensor a bordo de un satélite. Estas imágenes son utilizadas en múltiples aplicaciones, como el monitoreo ambiental, la agricultura, la planificación urbana y la gestión de desastres naturales. Así mismo las imágenes satelitales se adquieren en distintas bandas del espectro electromagnético y con diferentes resoluciones espaciales y temporales, lo que permite obtener información detallada sobre la superficie terrestre (Jensen, 2016).

#### **1.1.2.7. Programa Landsat**

El Programa Landsat es uno de los programas más antiguos de teledetección y ha proporcionado imágenes de alta calidad de la superficie terrestre desde 1972 (Campbell y Wynne, 2014). A continuación, se describen brevemente las tipologías de los satélites Landsat 1, 2, 3, 5, 7 y 8:

- Landsat 1: Fue lanzado en 1972 y tuvo una vida útil de 6 años. Tenía una resolución espacial de 80 metros y operaba en 4 bandas espectrales.
- Landsat 2: Fue lanzado en 1975 y operó durante 7 años. Tenía una resolución espacial de 80 metros y operaba en 7 bandas espectrales.
- Landsat 3: Fue lanzado en 1978 y operó durante 8 años. Tenía una resolución espacial de 80 metros y operaba en 7 bandas espectrales.
- Landsat 5: Fue lanzado en 1984 y operó durante 29 años, convirtiéndose en el satélite Landsat más longevo en operación. Tenía una resolución espacial de 30 metros y operaba en 7 bandas espectrales.
- Landsat 7: Fue lanzado en 1999 y sigue en operación actualmente. Tiene una resolución espacial de 30 metros y opera en 8 bandas espectrales.
- Landsat 8: Fue lanzado en 2013 y sigue en operación actualmente. Tiene una resolución espacial de 30 metros y opera en 11 bandas espectrales.

### A. Sensor Thematic Mapper™ – Landsat 4 Y 5

El sensor Thematic Mapper (TM), es un instrumento incorporado en los satélites Landsat 4 y 5 que proporciona imágenes de alta resolución espectral de la superficie terrestre, donde el TM está compuesto por 7 bandas espectrales que abarcan desde el rango visible hasta el infrarrojo térmico. La resolución espacial es de 30 metros para las bandas visibles e infrarrojas, y de 120 metros para la banda térmica, según (James y Campbell, 2015).

Tabla 1

*Características espectrales de las imágenes Landsat 5 y 7*

Modo espectral	Resolución		Radiométrica (bits)	Temporal (día)	
	espacial (m)	Espectral (micras)			
Multiespectral	30	Banda 1 azul	0.45 – 0.52	8	16
		Banda 2 verde	0.52 – 0.60		
		Banda 3 roja	0.63 – 0.69		
		Banda 4 infrarrojo cercano 1	0.76 – 0.90		
		Banda 5 Infrarrojo cercano 2	1.55 – 1.75		
		Banda 7 Infrarrojo medio	2.08 – 2.35		
		Termal	120		

Fuente: Ariza (2013).

### B. Sensor “ETM” Landsat 7

El Sensor Landsat 7 es un instrumento utilizado en teledetección que se encuentra a bordo del satélite Landsat 7, este sensor es capaz de capturar imágenes de la superficie terrestre en siete bandas espectrales diferentes, incluyendo el espectro visible y el infrarrojo cercano y lejano (Markham, 2005).

El sensor Landsat 7 es un sensor remoto que forma parte de la misión Landsat de la NASA y que se utiliza para la observación de la tierra desde el espacio. Así mismo, este sensor es capaz de capturar imágenes multiespectrales de alta

resolución de la superficie terrestre, lo que permite estudiar y monitorizar los cambios en la vegetación, la geología, el clima y otros aspectos ambientales.

### C. Sensor “OLI” Landsat 8

El Landsat 8 es un sensor remoto utilizado en la misión Landsat de la NASA para la observación de la tierra desde el espacio, al igual que el Landsat 7, el Landsat 8 es capaz de capturar imágenes multiespectrales de alta resolución de la superficie terrestre, lo que permite estudiar y monitorizar los cambios en la vegetación, la geología, el clima y otros aspectos ambientales.

El Landsat 8 tiene una resolución espacial de 30 metros, pero también cuenta con una banda adicional llamada “banda pancromática” que tiene una resolución espacial de 15 metros. Además, el sensor captura imágenes en once bandas espectrales, que van desde el visible hasta el infrarrojo térmico (Ariza, 2013).

Tabla 2

*Características espectrales de las imágenes Landsat 8.*

Sensor	Bandas	Longitud de onda ( $\mu\text{m}$ )	Resolución (m)
Landsat 8	Banda 1 – Aerosol costero	0.43 – 0.45	30
	Banda 2 - Azul	0.45 – 0.51	30
	Banda 3 - Verde	0.53 – 0.59	30
	Banda 4 - Rojo	0.64 – 0.67	30
	Banda 5 – Infrarrojo cercano (NIR)	0.85 – 0.88	30
	Banda 6 – SWIR 1	1.57 – 1.65	30
	Banda 7 – SWIR 2	2.11 – 2.29	30
	Banda 8 - Pancromático	0.50 – 0.68	15
	Banda 9 - Cirrus	1.36 – 1.38	30
	Banda 10 – Infrarrojo térmico (TIRS) 1	10.60 – 11.19	100
	Banda 11 – Infrarrojo térmico (TIRS) 2	11.50 – 12.51	100

Fuente: Ariza (2013).

#### **1.1.2.8. Resoluciones del sensor satelital**

La resolución espacial se define como la capacidad de un sensor remoto para diferenciar entre objetos cercanos en la superficie terrestre, y se refiere a la menor distancia que puede ser percibida entre dos objetos en una imagen capturada por un sensor remoto, y está determinada por la geometría del sistema de adquisición de imágenes, como la altura del satélite y la longitud focal de la cámara, donde la resolución espacial se expresa típicamente en metros por píxel o en metros por unidad de área. Por lo tanto, una mayor resolución espacial significa que el sensor puede capturar detalles más finos en la superficie terrestre (Richards y Jia, 2006).

La resolución espectral se refiere a la capacidad de un sensor remoto para identificar diversas longitudes de onda de la luz en la superficie terrestre. Esta medida está relacionada con la cantidad de bandas espectrales que un sensor puede captar y la amplitud de cada banda. Un sensor con alta resolución espectral puede percibir pequeñas variaciones en la reflectancia de la luz en distintas longitudes de onda, facilitando la discriminación de diversos materiales en la superficie terrestre (Richards y Jia, 2006).

#### **1.1.2.9. Correcciones para imágenes Landsat**

Las correcciones para imágenes Landsat son una serie de ajustes que se aplican a las imágenes adquiridas por los satélites Landsat para mejorar la calidad de la imagen y reducir los efectos de la atmósfera y otras fuentes de error. Estas correcciones incluyen la corrección atmosférica, la corrección topográfica, la corrección de la geometría, la corrección de la radiometría y la corrección de la detección de nubes y sombras (Campbell y Wynne, 2014).

#### **1.1.2.10. Corrección radiométrica**

La corrección radiométrica es un proceso que se utiliza en la teledetección para ajustar los valores de brillo de los píxeles de una imagen para reflejar con mayor precisión la cantidad de energía reflejada o emitida por la superficie terrestre. Esta corrección se realiza para eliminar las variaciones causadas por factores como la distancia del sensor a la superficie terrestre, la variabilidad en la iluminación solar, y la sensibilidad de los detectores en el sensor (Richards y Jia, 2006).

Existen varios métodos de corrección radiométrica, que incluyen la corrección de la respuesta espectral, la corrección de la no uniformidad del detector, la corrección del oscurecimiento de la lente, y la corrección atmosférica.

#### **1.1.2.11. Calibración radiométrica**

La calibración radiométrica es un proceso que se utiliza en teledetección para convertir los valores digitales de brillo de los píxeles de una imagen en unidades físicas de energía radiante reflejada o emitida por la superficie terrestre. Esta conversión se realiza utilizando modelos matemáticos y datos de calibración adquiridos durante el vuelo del satélite. La calibración radiométrica es importante para garantizar la precisión de las mediciones y la comparabilidad entre imágenes adquiridas en diferentes momentos (Martínez, 2005).

Existen diferentes métodos de calibración radiométrica, que varían según el tipo de sensor y los datos de calibración disponibles. En general, el proceso de calibración radiométrica implica la corrección de la respuesta espectral del sensor, la eliminación de la no uniformidad del detector, la corrección del oscurecimiento de la lente y la corrección atmosférica.

#### **A. Corrección por radiancia**

La corrección por radiancia es un proceso que se utiliza en teledetección para corregir los valores digitales de brillo de los píxeles de una imagen y convertirlos en unidades de las variaciones en la respuesta espectral del sensor, la distancia del sensor a la superficie terrestre, la variabilidad en la iluminación solar y otros factores que afectan la medición de la radiación (Richards y Jia, 2006).

La corrección por radiancia se utiliza en conjunción con otras correcciones, como la corrección atmosférica y la corrección de la geometría, para producir una imagen final con mayor precisión y exactitud.

#### **B. Corrección por reflectancia**

La corrección por reflectancia es un proceso que se utiliza en teledetección para corregir los valores digitales de la luz de los píxeles de una imagen y convertirlos en unidades de reflectancia de la superficie terrestre. Esta corrección tiene en cuenta las variaciones en la iluminación solar y la atmósfera para producir una

imagen que refleja con mayor precisión la reflectividad de la superficie terrestre (Martínez, 2005).

La corrección por reflectancia es una de las correcciones más importantes en teledetección porque permite la comparación de imágenes adquiridas en diferentes momentos y en diferentes condiciones atmosféricas.

### **C. Corrección por dark subtraction**

La corrección por dark subtraction es un proceso que se utiliza en teledetección para corregir los valores digitales de las imágenes que se ven afectados por las señales de fondo o ruido producido por el sensor. Esta corrección se realiza restando una imagen de “oscuridad” o “dark” que representa el nivel de señal de fondo del sensor en ausencia de luz externa (Richards y Jia, 2006).

La imagen “dark” se adquiere cerrando la tapa del sensor durante una breve exposición para registrar solo la señal de ruido producida por el propio sensor. Luego, la imagen “dark” se resta de la imagen de la escena para eliminar el ruido del sensor y mejorar la calidad de la imagen.

#### **1.1.2.12. Corrección atmosférica por flash atmospheric correction**

La corrección atmosférica por flash atmospheric correction (FAC) es una técnica de corrección atmosférica para imágenes satelitales que se basa en una técnica de filtrado que elimina la componente atmosférica en la señal de imagen. Este método utiliza una imagen de referencia para estimar la transmisión atmosférica y, a continuación, aplica un filtro inverso para corregir la imagen original (Kotchenova *et al.*, 2006).

La corrección atmosférica por FAC es útil en regiones con alta variabilidad atmosférica y en zonas de terreno complejo como áreas montañosas o de gran altitud. Sin embargo, el método requiere de datos adicionales como la información de altura y los modelos de radiación atmosférica, lo que puede aumentar la complejidad del proceso de corrección (Kotchenova *et al.*, 2006).

## **A. Corrección atmosférica por quick atmospheric correction**

La corrección atmosférica quick atmospheric correction (QAC) es un método de corrección atmosférica para imágenes de teledetección que utiliza el modelo de transmisión atmosférica del sensor para estimar la reflectancia de la superficie terrestre sin afectación de la atmósfera (Brian y Barker, 1987). Este método es rápido y fácil de aplicar, ya que no requiere datos adicionales de campo o de modelos atmosféricos. La estimación se utiliza luego para corregir la señal recibida por el sensor, eliminando así los efectos atmosféricos. Aunque este método es fácil de aplicar, se ha demostrado que es menos preciso que otros métodos de corrección atmosférica más complejos y puede ser menos adecuado para áreas con alta variabilidad atmosférica (Markham y Helder, 2005).

### **1.1.2.13. Corrección geométrica**

La corrección geométrica es un proceso de ajuste de la posición y forma de una imagen para que coincida con su ubicación y forma real en el terreno. Este proceso se utiliza para corregir errores de distorsión, rotación, escala y desplazamiento que pueden ocurrir durante la adquisición o el procesamiento de la imagen. Existen diferentes técnicas de corrección geométrica, incluyendo la rectificación de imagen utilizando modelos digitales de elevación (DEM), la corrección utilizando puntos de control y la corrección basada en modelos matemáticos.

La corrección geométrica es importante para muchas aplicaciones de teledetección, incluyendo la clasificación de uso del suelo, la detección de cambios en el terreno y la estimación de áreas y volúmenes.

### **1.1.2.14. Clasificación supervisada**

La clasificación supervisada de imágenes satelitales es una técnica de análisis de datos de teledetección que implica la asignación de categorías o clases a píxeles individuales en una imagen. Se basa en la identificación de patrones espectrales que corresponden a diferentes materiales o características en la superficie de la tierra. En la clasificación supervisada, se seleccionan previamente áreas de entrenamiento que representan las diferentes clases de interés y se extraen las características espectrales de cada una de ellas. Luego, se utiliza un algoritmo para

asignar cada píxel de la imagen a la clase más probable en función de sus características espectrales (Lillesand *et al.*, 2015).

Existen diferentes tipos de clasificadores supervisados, como el clasificador de máxima verosimilitud, el clasificador basado en árboles de decisión y el clasificador basado en redes neuronales. Cada uno de ellos tiene sus propias ventajas y desventajas, y la elección del clasificador adecuado depende de las características de la imagen y los objetivos de la clasificación (Jensen, 2016).

### 1.1.3. Indicadores climáticos

Los indicadores climáticos son medidas utilizadas para describir y cuantificar diferentes aspectos del clima y su variabilidad en una región determinada. Estos indicadores se utilizan para monitorear y evaluar los cambios en el clima a lo largo del tiempo, así como para identificar las tendencias y patrones que pueden estar relacionados con el cambio climático.



Figura 5. Posición de los índices climáticos próximos a América  
Fuente: Jiménez (2014).

#### 1.1.3.1. Precipitación y temperatura

La precipitación se describe como la cantidad de agua, ya sea en estado líquido o sólido, que cae sobre la superficie de la tierra en un período determinado de tiempo. La precipitación es una variable climática fundamental que afecta muchos aspectos del medio ambiente, incluyendo el crecimiento de las plantas, la calidad

del agua, el riesgo de inundaciones y deslizamientos de tierra, entre otros (Pielke, 2008).

La temperatura se refiere a la medida del grado de calor o frío en la atmósfera. Se puede medir en diferentes escalas, como Celsius o Fahrenheit, y se utiliza para describir las condiciones climáticas en una región determinada. La temperatura es una variable climática crítica que influye en muchos procesos ambientales, incluyendo la evapotranspiración, la fotosíntesis y la distribución de las especies.

### **1.1.3.2. Fenómeno climático “El Niño”**

El fenómeno climático conocido como “El Niño” se produce cuando la temperatura superficial del océano pacífico ecuatorial se eleva por encima de lo normal, lo que a su vez puede provocar cambios significativos en los patrones climáticos globales. Este fenómeno se produce de forma periódica, con una frecuencia que varía entre 2 y 7 años, y puede durar varios meses o incluso años (Trenberth y Stepaniak, 2001).

Durante un episodio de El Niño, las lluvias y las tormentas se desplazan hacia el este del pacífico, lo que puede provocar sequías en regiones que normalmente reciben una gran cantidad de precipitaciones, como Australia e Indonesia. Al mismo tiempo, los países de la costa Oeste de América del Sur pueden experimentar inundaciones y deslizamientos de tierra debido a las fuertes lluvias. Además, El Niño también puede tener un impacto en la temperatura global y en los patrones de viento, lo que puede afectar a la agricultura, la pesca y otros sectores económicos en todo el mundo.

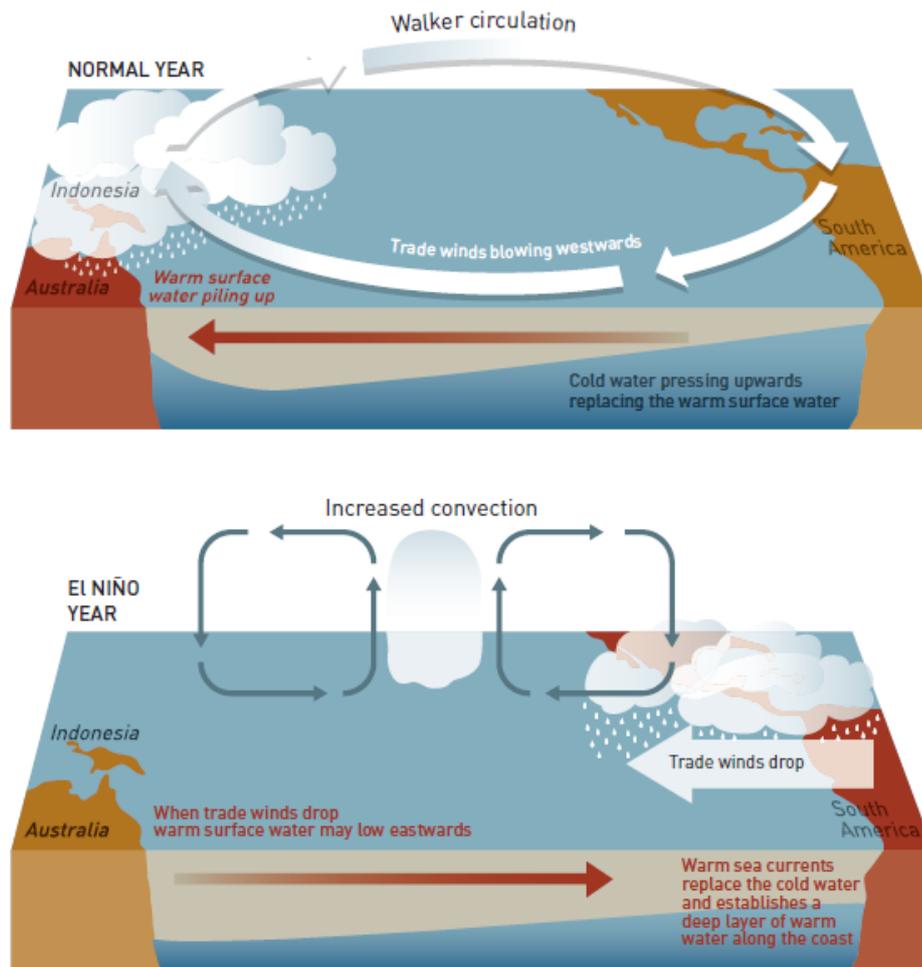


Figura 6. Interacción océano-atmósfera sobre el Pacífico Tropical

Fuente: GGWS (Golden Gate Weather Services), 2017.

### 1.1.3.3. El Niño y La Niña, antecedentes en el Perú

El fenómeno climático de El Niño y La Niña ha sido centro de estudio y análisis durante varias décadas. En el Perú, se han registrado eventos de este fenómeno desde hace más de 150 años. Uno de los estudios más relevantes sobre este fenómeno en el país es el Informe Especial del IPCC sobre los impactos del cambio climático en América Latina y el Caribe, publicado en 2018. En el capítulo 4 del informe, se aborda el impacto del cambio climático en el Perú, en el que se describe la frecuencia, intensidad y efectos del fenómeno de El Niño en el país.

Uno de los episodios más severos del fenómeno de El Niño en Perú tuvo lugar en 1997-1998, destacándose por un inusual aumento de la temperatura en las aguas del océano Pacífico y por intensas lluvias e inundaciones que afectaron extensas áreas del país. Este evento generó consecuencias sustanciales en la economía y la

sociedad peruana, con pérdidas económicas estimadas en miles de millones de dólares y decenas de miles de personas afectadas. Otro evento notable relacionado con el fenómeno de El Niño en Perú ocurrió en 1982-1983, caracterizado también por fuertes precipitaciones e inundaciones en el territorio peruano, así como por sequías en otras partes del mundo.

Por lo tanto, se menciona dos grandes sucesos fenomenales de El Niño ocurridos en los años 1982/1983 y 1997/1998 (ver en Tabla 3).

Tabla 3

*Características climáticas de los dos episodios de El Niño en el Perú*

Episodio de “El Niño”	Anomalías de temperaturas mínimas	de Anomalías de precipitación
El Niño 1982-1983	+8,0 (Chiclayo) +10,0 °C (Chimbote)	En la costa norte: 3000 mm entre setiembre y mayo; en verano, mayores núcleos en Piura. En la sierra sur: déficit severo de precipitación. La costa norte experimenta una precipitación promedio de 3000 mm durante los meses de setiembre a mayo. Durante el verano, se registran núcleos de lluvia más intensa en Piura y Tumbes, con incrementos de alrededor del 2000% en algunas estaciones costeras del norte. En cuanto a la sierra sur, no se mencionan detalles específicos en el texto proporcionado.
El Niño 1997-1998	+8,0 °C desde Chiclayo al Norte Chico	

Fuente: SENAMHI (2014).

Durante el siglo XX y antes del evento excepcional de El Niño en 1997/98, se registraron alrededor de 25 episodios de El Niño de diversas intensidades. Según las referencias bibliográficas, los eventos de El Niño en 1891 y 1925 fueron comparables en intensidad a los de 1982/83 y 1997/98. En lo que va del siglo XXI, de acuerdo al índice ONI (Oceanic Niño Index), se han producido cuatro episodios de El Niño en el Pacífico central: dos de intensidad débil (años 2004/05 y 2006/07) y dos de intensidad moderada (años 2002/03 y 2009/10), (SENAMHI, 2011).

#### **1.1.3.4. Cambio climático**

El cambio climático se define como la transformación a largo plazo del clima de la Tierra, en gran medida atribuible a la emisión de gases de efecto invernadero derivados de las actividades humanas. Este proceso ha llevado a un aumento de la temperatura global, cambios en los patrones de precipitación y otros efectos en el clima y la biodiversidad del planeta (IPCC, 2014).

#### **1.1.3.5. Calentamiento global**

El calentamiento global es el incremento gradual y constante de la temperatura promedio de la superficie terrestre y los océanos. Este fenómeno es principalmente causado por la liberación de gases de efecto invernadero provenientes de actividades humanas, como la quema de combustibles fósiles y la deforestación (IPCC, 2013).

### **1.1.4. Series de tiempo**

Las series de tiempo son un conjunto de datos numéricos recolectados en el tiempo, donde cada observación se registra en un momento específico y se ordena cronológicamente, estos datos pueden ser recolectados en diferentes intervalos de tiempo, como minutos, horas, días, semanas, meses o años. Las series de tiempo se utilizan comúnmente en el análisis estadístico y en la modelación para identificar patrones o tendencias en los datos y hacer predicciones o pronósticos para el futuro, donde los patrones pueden incluir una tendencia creciente o decreciente en el tiempo, una estacionalidad regular en el transcurso de un año o un ciclo más largo, o una variabilidad aleatoria (Box *et al.*, 2015).

#### **1.1.4.1. Prueba de normalidad**

Una prueba de normalidad constituye una herramienta estadística empleada para evaluar si una muestra de datos sigue o no una distribución normal. En una distribución normal, los datos exhiben una forma de campana simétrica, centrada alrededor de la media, con la mayoría de los datos cercanos a la media y valores extremos poco frecuentes. Existen diferentes pruebas de normalidad que se pueden utilizar para evaluar si una muestra de datos se ajusta a una distribución normal, como la prueba de Kolmogorov-Smirnov, la prueba de Shapiro-Wilk y la prueba de Anderson-Darling. Estas pruebas generan un valor de  $p$ , que indica la

probabilidad de que la muestra se distribuya normalmente. Si el valor de  $p$  es menor que un umbral establecido (generalmente 0.05), se rechaza la hipótesis nula de que los datos se distribuyen normalmente (Ghasemi y Zahediasl, 2012).

Según Ghasemi y Zahediasl (2012), las pruebas de normalidad son importantes porque muchas técnicas estadísticas asumen que los datos se distribuyen normalmente, por lo que, si una muestra no cumple con este supuesto, se debe utilizar una técnica estadística diferente.

#### **1.1.4.2. Regresión y correlación lineal**

La regresión y la correlación lineal son técnicas estadísticas utilizadas para evaluar la relación entre dos variables cuantitativas, ambas técnicas se enfocan en medir el grado de asociación entre las variables, pero se diferencian en su enfoque y propósito (Gujarati y Porter, 2009).

La correlación lineal analiza la fuerza y la dirección de la relación lineal entre dos variables. Se expresa en una escala de -1 a 1, donde -1 denota una correlación negativa perfecta (las variables se mueven en direcciones opuestas), 0 indica ausencia de correlación (las variables no están relacionadas), y 1 señala una correlación positiva perfecta (las variables se mueven en la misma dirección). Es fundamental destacar que la correlación lineal no implica causalidad, sino simplemente una asociación estadística entre las variables.

La regresión lineal, por otro lado, se utiliza para predecir el valor de una variable a partir de otra variable. Se ajusta una línea recta a los datos y se utiliza esta línea para hacer predicciones. La regresión lineal también mide la fuerza y la dirección de la relación lineal, pero se enfoca en hacer predicciones en lugar de simplemente describir la asociación.

En resumen, la correlación lineal mide la relación estadística entre dos variables, mientras que la regresión lineal se utiliza para hacer predicciones basadas en esa relación.

## A. Test de regresión lineal

Se trata de un test paramétrico que supone una distribución normal de los datos. Su objetivo es evaluar la existencia de una tendencia lineal al examinar la relación entre el tiempo (x) y la variable de interés (y) según (Chiew y Siriwardena, 2005).

El gradiente de regresión se calcula por:

$$b = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad \text{Ec. 1}$$

y el punto de intersección se calcula como:

$$\alpha = \bar{y} - b\bar{x}$$

El estadístico de prueba es:

$$S = b / \sigma \quad \text{Ec. 2}$$

Donde

$$\sigma = \sqrt{\frac{12 \sum_{i=1}^n (y_i - a - bx_i)}{n(n-2)(n^2-1)}}$$

La prueba estadística S sigue una distribución t de Student con n-2 grados de libertad bajo la hipótesis nula. Los valores críticos de esta prueba para distintos niveles de significancia se obtienen a partir de información estadística de la distribución T de Student. En el contexto de la prueba de regresión lineal, se parte del supuesto de que los datos siguen una distribución normal y que los errores, que reflejan las desviaciones de la tendencia, son independientes y también siguen una distribución normal con una media de cero.

### 1.1.5. Topografía del nevado Ananea

En términos regionales, el área de investigación se ubica en la cordillera oriental del sur de Perú, con altitudes que oscilan entre los 5000 y 5900 metros sobre el nivel del

mar. La zona de estudio tiene una topografía accidentada con picos de nevado bien elevados, el nevado cubre las superficies del flanco oriental y occidental del nevado de Ananea, que en si forma parte de la cordillera oriental en el sur de Perú, límite muy cercano a la frontera con Bolivia.

#### **1.1.6. Geología regional del área de investigación**

En la geología regional, se encuentran rocas antiguas del paleozoico, que incluyen lutitas, pizarras, filitas, cuarcitas y metacuarcitas. La secuencia estratigráfica comprende tanto el paleozoico inferior como el superior, y también se incluye el pérmico superior, además, hay rocas intrusivas que afloran, como los leucogranitos del Pérmico superior.

En cuanto a la geología local, se pueden identificar dos formaciones estratigráficas:

Formación Sandía (Ordovícico): Compuesta por pizarras, filitas, cuarcitas y metacuarcitas de grano fino a grueso. Se subdivide en dos miembros, el inferior compuesto por pizarras, filitas y metacuarcitas finas de color gris oscuro, y el superior compuesto por pizarras, filitas y metacuarcitas de color gris blanquecino de grano medio a grueso.

Formación Ananea (Silúrico-Devónico): Compuesta principalmente por pizarras, lutitas y esquistos de cuarzo-muscovita-clorita, de color gris oscuro, con algunas partes bituminosas, laminadas y foliadas.

Estas dos formaciones, pertenecientes al Paleozoico, tienen una orientación en sentido noreste y presentan buzamientos entre 08° y 25° hacia el sureste.

#### **1.1.7. Aspecto biótico del área en investigación**

El aspecto biótico en el área de investigación, se caracteriza por una diversidad de flora y fauna adaptadas a las condiciones de alta montaña.

En cuanto a la flora, se pueden encontrar especies adaptadas a las altitudes elevadas, como gramíneas, plantas herbáceas, líquenes y musgos. Estas plantas suelen tener una baja estatura y resistir condiciones extremas. Además, en áreas cercanas a cuerpos de agua como ríos y lagunas, es posible encontrar vegetación más variada, como juncos y totoras.

En cuanto a la fauna, la presencia de especies se ve influenciada por la altitud y el grado de intervención humana en la zona. Se pueden encontrar aves como cóndores, águilas, perdices andinas y gallaretas. También se pueden observar roedores como vizcachas y chinchillas. En los cuerpos de agua, es posible encontrar truchas y otras especies de peces adaptados a las condiciones de la zona.

Es importante destacar que la actividad minera en la región puede tener un impacto negativo en el aspecto biótico. La explotación minera puede afectar el hábitat natural de algunas especies y generar cambios en los ecosistemas locales. Por lo tanto, es crucial que se implementen medidas de mitigación y conservación ambiental para preservar la biodiversidad de la zona.

#### **1.1.8. Actividad minera en el nevado de Ananea**

En la zona contiguas del área de investigación está la mina de Rinconada, que se dedica especialmente la extracción y procesamiento de minerales como el oro. La población se involucra en la minería informal, trabajando en minas artesanales y pequeñas operaciones mineras. Esta actividad minera tiene un impacto significativo en la economía local, aunque también presenta desafíos en términos de condiciones laborales y medio ambiente. Además, se debe considerar la actividad minera formal de las empresas CORI PUNO SAC y TITAN SRL.

CORI PUNO SAC: Esta empresa minera se dedica principalmente a la extracción de minerales, con un enfoque en la minería de oro. Sus operaciones están orientadas hacia la minería formal y cuentan con los permisos y licencias correspondientes. CORI PUNO SAC emplea técnicas y tecnologías modernas en sus operaciones mineras, con el objetivo de maximizar la eficiencia y minimizar el impacto ambiental. Además de la extracción de oro, la empresa también puede estar involucrada en la exploración y desarrollo de yacimientos minerales en la región de Puno.

TITAN SRL: Esta empresa minera también se dedica a la extracción de minerales en la región de Puno. Si bien no se dispone de información específica sobre los minerales que extrae, es probable que estén involucrados en la extracción de metales preciosos, como el oro y la plata, o minerales industriales. Al igual que CORI PUNO SAC, TITAN SRL busca operar dentro del marco legal y cumplir con los estándares ambientales establecidos. Su actividad minera puede incluir la operación de minas a

pequeña o mediana escala, empleando prácticas y tecnologías adecuadas para garantizar la seguridad de los trabajadores y el cuidado del medio ambiente.

## 1.2. Antecedentes

Díaz *et al.* (2017), llevó a cabo un análisis temporal de los nevados Allin Capac y Chichi Cápac con el objetivo de examinar las variaciones en la cobertura glaciaria en el período comprendido entre 1975 y 2015. Para llevar a cabo esta evaluación, empleo imágenes satelitales Landsat en conjunto con el Índice de Diferencia Normalizada De Nieve (NDSI) para calcular el área ocupada por los glaciares. Los resultados obtenidos indicaron una notoria disminución en la cobertura glaciaria, pasando de 52.3 km<sup>2</sup> en 1975 a 16.9 km<sup>2</sup> en 2015, lo que implica una pérdida total de 35.6 km<sup>2</sup>. Esta reducción representa el 67% de la cobertura original.

Molano *et al.* (2022), evaluaron el retroceso glaciario en la sierra nevada de Colombia entre 1987 y 2021. Utilizaron imágenes satelitales Landsat y Sentinel-2, así como el software PCI Geomatics, para clasificar cuatro tipos de cobertura: glaciario, cuerpo rocoso, vegetación y superficie de agua. Los resultados revelaron una pérdida aproximada de 1099.59 ha de cobertura glaciaria, lo que representa el 37.92% de cobertura en los últimos 34 años.

Ramos (2018), investigó el nevado Coropuna y su evolución de la cobertura glaciaria. Analizó datos meteorológicos de 47 estaciones cercanas de 1965 a 2014, así como imágenes satelitales Landsat 5 TM y Landsat 8 OLI utilizando el NDSI. Los resultados mostraron que la cobertura glaciaria del nevado Coropuna disminuyó en un 19.4% entre 1987 y 2015.

Cuadros (2014), examinó la evolución de la cobertura glaciaria del nevado Ananea entre 1985 y 2010. Realizó un análisis multitemporal de imágenes satelitales y una prueba de regresión lineal utilizando datos de precipitación anual y temperatura media. Los resultados indicaron que el área de cobertura en 1985 fue de 40.96 km<sup>2</sup>, y para 2010 disminuyó a 30.94 km<sup>2</sup>, perdiendo 10.02 km<sup>2</sup> o el 24.41% de la cobertura en los últimos 25 años.

Silverio (2018), estudió el nevado Coropuna y su impacto por el cambio climático. Utilizó imágenes satelitales Landsat 2 MSS, 5 MSS y 7 TM para estimar la cobertura glaciaria y determinar el espesor de hielo. Sus investigaciones indicaron que el nevado Coropuna

perdió el 62% de su cobertura glaciar, pasando de 123 km<sup>2</sup> en 1955 a 47 km<sup>2</sup> en 2010, con un volumen de almacenamiento de 4.3146 km<sup>3</sup>.

Medina y Mejía (2014), llevaron a cabo un estudio sobre la deglaciación de la Cordillera Parón utilizando análisis multitemporales y multifractales. Utilizaron el método de ratio imagen 4/5 y el NDSI, utilizando imágenes satelitales Landsat TM5 del INPE desde 1987 hasta 2011. Durante este período, se observó una reducción promedio del 18% en la superficie glaciar, mientras que el volumen glaciar presentó variaciones.

En la investigación de Tarazona (2012), sobre el retroceso glaciar del nevado Pastoruri en el Parque Nacional Huascarán, se empleó del NDSI. Se utilizaron imágenes satelitales Landsat 5 TM del GLOVIS (USGS Global Visualization Viewer) correspondientes a los años 1988, 1999 y 2011. Se encontró que entre 1988 y 1999, hubo una regresión glaciar de 184.13 ha (8.33%), y para el año 2011, la reducción fue de 462.22 ha (22.8%).

Inoue (2018), evaluó la evolución de la cobertura glaciar en la subcuenca Blanco del río Santa y su influencia en la disponibilidad hídrica en el periodo 1987-2016. También utilizó el NDSI junto con imágenes Landsat 5TM y Landsat 8 OLI-TIRS, así como técnicas hidrológicas. Los resultados indicaron una disminución del 23.5% en la superficie glaciar durante el período 1987-2016.

Castillo (2017), evaluó la dinámica y los factores que afectan la temperatura y la precipitación. Se utilizaron datos meteorológicos de tres estaciones y se determinó que el glaciar del Pastoruri tenía una superficie de 237 ha en 1997, la cual se redujo a 185 ha en 2016.

El estudio de Nüsser y Schmidt (2021), titulado “Cambios en los glaciares del Nanga Parbat 1856-2020: Un análisis retrospectivo multi-source”, utilizó mapas históricos, fotografías terrestres e imágenes satelitales, así como un modelo digital de elevación para cuantificar los cambios en los glaciares. Este estudio reveló una disminución del 7% en la superficie glaciar y también identificó patrones importantes, como la influencia de avalanchas de hielo y nieve.

Avila *et al.* (2018), llevaron a cabo una cuantificación del retroceso glaciar en el Nevado del Tolima utilizando una metodología que incluyó la corrección radiométrica de datos satelitales, la determinación de índices espectrales (NDSI y Ratio simple), la segmentación de imágenes mediante una clasificación no supervisada y la cuantificación

de la masa glaciar. Los resultados mostraron una pérdida aproximada del 16.71% en el área glaciar.

Das y Sharma (2021), determinaron las velocidades superficiales de los glaciares en la cuenca hidrográfica de Jankar Chhu, Himalaya occidental, India: usaron Landsat time series data (1992–2020), este artículo presenta un análisis espacial y temporal de la velocidad superficial de 33 glaciares en la cuenca hidrográfica de Jankar Chhu. las fluctuaciones de temperatura estacionales que alteran la disponibilidad de agua de deshielo para los procesos subglaciales similares a los otros glaciares del Himalaya. Una tendencia creciente en la velocidad anual manifiesta la tendencia creciente en la temperatura en el Himalaya occidental.

Drenkhan *et al.* (2018), cuantificaron el actual y futura de dimensión del glaciar y lagos en la cuenca de Vilcanota - Urubamba, en este artículo combina un análisis del desarrollo actual (1988–2016) y futuro (2050/2100) de glaciares y lagos en el Cuenca Vilcanota-Urubamba (Cusco, sur del Perú). El área total del glaciar (volumen) disminuyó en un 37,3% de 226,1 km<sup>2</sup> en 1988 a 141,7 km<sup>2</sup> en 2016 y Los lagos adyacentes aumentaron en área en un 15,5 % de 23,3 km<sup>2</sup> (460 lagos) en 1988 a 26,9 km<sup>2</sup> (544 lagos) en 2016.

Monterroso *et al.* (2018), llevaron a cabo una determinación del retroceso glaciar en los volcanes Nevado del Ruiz (VNR), Nevado de Santa Isabel (VNSI) y Nevado del Tolima (VNT). Utilizaron imágenes satelitales Landsat 8 e imágenes de coherencia obtenidas mediante la técnica DinSAR de Radarsat II. También calcularon índices espectrales y realizaron una clasificación supervisada para diferenciar el límite del hielo. Entre 2010 y 2015, la capa de hielo en los volcanes objeto de estudio experimentó una reducción del 24%, 42% y 60% respectivamente.

En el análisis realizado por Gallegos *et al.* (2018), sobre la variación temporal y espacial de la cobertura glaciar en el nevado Cayambe, Ecuador, se encontró que al inicio del periodo la ocupación glaciar era de 23,85 km<sup>2</sup>, mientras que al final del mismo había disminuido a 15,36 km<sup>2</sup>. Esto representa una reducción porcentual del 25,53% según las fotografías aéreas analizadas y del 25,58% según las imágenes satelitales estudiadas.

San Martín *et al.* (2021), determinaron el conjunto de accidentes geográficos proglaciares en un circo glaciar que retrocede rápidamente debido al aumento de temperatura desde 1970, El análisis multitemporal del retroceso del Glaciar Chato nos permitió

interpretar que la mayoría de estas geoformas se generaron cuando el paisaje quedó libre de hielo después de 2005. La pendiente suave del suelo del circo del glaciar Chato, el espesor del hielo delgado y la ocurrencia de un umbral rocoso cerca del frente del glaciar habría promovido el rápido adelgazamiento del glaciar y la desconexión de hielo muerto.

Serra *et al.* (2022), estimaron el post-LGM glacial and geomorphic evolution of the Dora Baltea valley, donde presentan una reconstrucción detallada de la historia glacial posterior al LGM de la cuenca del Dora Baltea, que albergó una de los principales sistemas glaciares cuaternarios de los Alpes europeos occidentales, la secuencia de desglaciación a lo largo del valle de Dora Baltea se puede correlacionar con períodos paleoclimáticos específicos del Lateglacial al Holoceno, en línea con las reconstrucciones glaciares post-LGM de otras zonas alpinas.

Lizarzaburu *et al.* (2012), investigaron la retracción de los glaciares en las elevadas cumbres de los Andes Peruanos, centrándose en el Santuario Nacional de Ampay, Apurímac. En este caso específico, las conclusiones señalan que entre los años 1997 y 2011, la extensión glacial en el Ampay experimentó un retroceso de 160 hectáreas, evidenciando sus morrenas recién expuestas.

Gonzales (2011), en el análisis temporal del Nevado Ampay dentro del marco del cambio climático, abarcando el período de 1986 a 2011, se proyecta que la retracción glacial es inminente, estimándose una pérdida de 108 hectáreas, lo que equivale al 56% desde 1986 hasta el año 2011. Se identificó un incremento en la superficie glacial entre 1999 y 2002, atribuible a la variabilidad climática.

Gómez *et al.* (2012), en su publicación de evaluación de la cobertura glacial utilizando técnicas de teledetección espacial en la subcuenca del río Quellcayhuanca – río Santa. Llegó a la conclusión de la evolución del nevado en el periodo comprendido de 1987 al 2012, encontrando que la pérdida de nevado en este periodo es de 11,80 km<sup>2</sup>, lo que representa una pérdida de 0,50 km<sup>2</sup>/año.

## CAPÍTULO II

### PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

#### 2.1. Identificación del problema

Los glaciares desempeñan un papel fundamental en la existencia de la humanidad y el crecimiento de los países. Su capacidad esencial para almacenar y suministrar agua los convierte en reservas vitales para sustentar el desarrollo de actividades socioeconómicas, así como para los ecosistemas (CAN, 2014).

En Sudamérica, los glaciares tropicales son la principal fuente de agua dulce para algunas de las ciudades más grandes (López-Moreno et al., 2014). Los Andes albergan más del 99% de los glaciares tropicales (Kaser, 1999), y Perú posee aproximadamente el 70% de ellos, que vienen presentando un retroceso de 22% desde 1970 (Vuille et al., 2008). En los últimos 40 años, los glaciares de los Andes peruanos han disminuido en un 42.6% (Autoridad Nacional del Agua, 2014). El deshielo acelerado ya amenaza a la captación de agua y energía para la costa árida del país, donde habitan dos tercios de la población peruana (INRENA-UGRH, 2007).

Según el informe del MINAM (2018), en los últimos 35 años, los glaciares en el Perú han experimentado una reducción del 25% de su superficie total. Esta disminución ha llevado a una pérdida de aproximadamente el 12% en el volumen de agua glaciar. Se estima que, en los próximos años, todos los glaciares ubicados por debajo de los 5 mil metros desaparecerán debido al derretimiento. Esta situación tiene un impacto significativo, ya que la disponibilidad de agua se verá reducida. Dado que el país depende en gran medida de los regímenes hídricos provenientes de los glaciares, se anticipan consecuencias negativas en diversos aspectos. Entre ellas se incluyen la calidad y el volumen del agua, así como sus efectos en la salud, la agricultura y las repercusiones en la economía. Estos

factores afectarán directamente los niveles de desarrollo y el bienestar de la población que se vea afectada por esta situación.

## 2.2. Enunciados del problema

En los flancos de glaciar Ananea se encuentran las minas de Rinconada, Corporación minera Ananea SAC, Empresa Minera. Titan SRL, y Unidad Minera Untuca de la empresa CORI PUNO SAC, actualmente todas ellas se encuentran en la etapa de explotación y localmente contribuyen a la variación de la cobertura glaciar por la intensa actividad minera en la zona. En efecto, la actividad minera artesanal a los pies del nevado Ananea constituyen aportes locales en el proceso de desglaciación, aunado también a los cambios climáticos globales, evidenciados por un incremento permanente de las temperaturas, producto de diferentes actividades de origen antropogénico. En ese sentido, es necesario cuantificar la magnitud de esos cambios producidos a través de los años en ambientes poco estudiados como en los Andes de la región Puno y si podría haber algún aporte provocado por la actividad minera de la zona respecto a los cambios climáticos globales. Esto repercutiría en la planificación de actividades de mitigación y en una herramienta de gestión ambiental útil para las autoridades locales y para el conocimiento de la población en general, así como para un mejor conocimiento de la dinámica ecológica y ambiental de nuestros ecosistemas alto andinos.

### Problema general

¿Está ocurriendo un proceso de desglaciación debido al cambio climático y actividades mineras en el nevado Ananea?

### Problemas específicos

¿Se estará suscitando una variación multitemporal en la cobertura glaciar del nevado Ananea?

¿habrán variado temporalmente las incidencias de precipitación y temperatura en inmediaciones al nevado Ananea?

¿Cómo serán las variaciones y predicciones de la cobertura del glaciar Ananea en el futuro?

## 2.3. Justificación

Los glaciares en las zonas tropicales son especialmente susceptibles a las fluctuaciones en las condiciones atmosféricas terrestres, tales como cambios en la temperatura del aire, niveles de precipitación, humedad y nubosidad. Esto se debe a que, dado su ubicación en los trópicos, experimentan la pérdida de hielo durante todo el año (Vuille et al., 2008). En la actualidad, la investigación acerca de los glaciares se ha convertido en uno de los principales marcadores utilizados para analizar las transformaciones en el clima, como lo señala el Informe del Panel Intergubernamental sobre Cambio Climático, así como el Observatorio de Cambio Climático del Perú (IPCC, 2014).

La disminución de los glaciares tiene un impacto significativo en la conservación de los ecosistemas conectados a ellos, así como en la regulación del clima y el ciclo del agua. Además, afecta la disponibilidad de agua, el suministro a las comunidades cercanas y la realización de actividades productivas. Los andes sudamericanos albergan el 99% de los glaciares tropicales del mundo y el 71% de ellos se encuentran en las cordilleras del Perú (Kaser, 2002). Estos glaciares representan una importante fuente de agua dulce en nuestro país. En este sentido, los glaciares actúan como reservas de agua que regulan su flujo a lo largo del año, almacenándola durante la época húmeda para liberarla durante la época seca.

La disminución de los glaciares es un indicio del cambio climático causado por la actividad humana, pero es importante tener en cuenta que los glaciares suelen reaccionar a lo largo de décadas o incluso más tiempo. Esto sugiere que el actual retroceso de los glaciares es el resultado de una combinación de factores, que incluyen la variabilidad natural del clima y las influencias humanas en curso (Marzeion et al., 2014). La reducción de los glaciares en la región de los Andes Peruanos se acelera durante los años de El Niño, pero, por otro lado, durante los años de La Niña, tienden a mantener su extensión o incluso a aumentarla (López et al., 2017).

## 2.4. Objetivos

### 2.4.1. Objetivo general

- Evaluar la variación de la cobertura glaciar del nevado Ananea y el análisis de datos históricos de SENAMHI para el periodo 1985 - 2022.

#### 2.4.2. Objetivos específicos

- Determinar los cambios multitemporales de la cobertura glaciar, así como la tasa de retroceso glaciar de Ananea.
- Determinar el comportamiento histórico de las series de precipitación y temperatura en la variación de la cobertura glaciar.
- Estimar los futuros escenarios sobre el comportamiento glaciar, mediante un modelo estadístico de regresión lineal.

### 2.5. Hipótesis

#### 2.5.1. Hipótesis general

- La evolución de la superficie glaciar del nevado Ananea presenta variación considerable con relación directa a los datos históricos de SEHAMHI que infiere sobre cambio climático y calentamiento global.

#### 2.5.2. Hipótesis específicas

- Mediante el uso de herramientas de teledetección se determina la variación de la superficie glaciar y una velocidad moderada de retroceso de la superficie glaciar.
- Según el análisis de datos de temperatura y precipitación presenta una curva negativa y tendencia variable por los factores locales.
- La proyección de datos por métodos estadísticos sobre el comportamiento glaciar Ananea. evidencia un continuo retroceso de su cobertura en el tiempo.

## CAPÍTULO III

### MATERIALES Y MÉTODOS

#### 3.1. Lugar de estudio

El nevado de Ananea es una montaña ubicada en el departamento de Puno, en el sur de Perú, en la región de los Andes. El departamento de Puno se encuentra en el extremo sureste de Perú y limita con Bolivia. El nevado de Ananea se encuentra en la cordillera de los Andes, específicamente en el límite entre las provincias de San Antonio de Putina y Sandia, en la región de Puno (Figura 7).

A nivel mundial, el nevado de Ananea es parte de la cadena de montañas de los Andes, que es la cordillera más larga y una de las más altas del mundo. Los Andes se extienden a lo largo de varios países de América del Sur, incluyendo Perú, Bolivia, Chile, Argentina, Colombia, Ecuador y Venezuela. El área de investigación se encuentra en el sector peruano de los Andes, cerca de la frontera con Bolivia. Las coordenadas UTM - WGS84 del punto central de referencia son los siguientes:

Este: 452920.825

Norte: 8385305.351

Altitud: 5800 m.s.n.m.

Zona 19 L – Sur

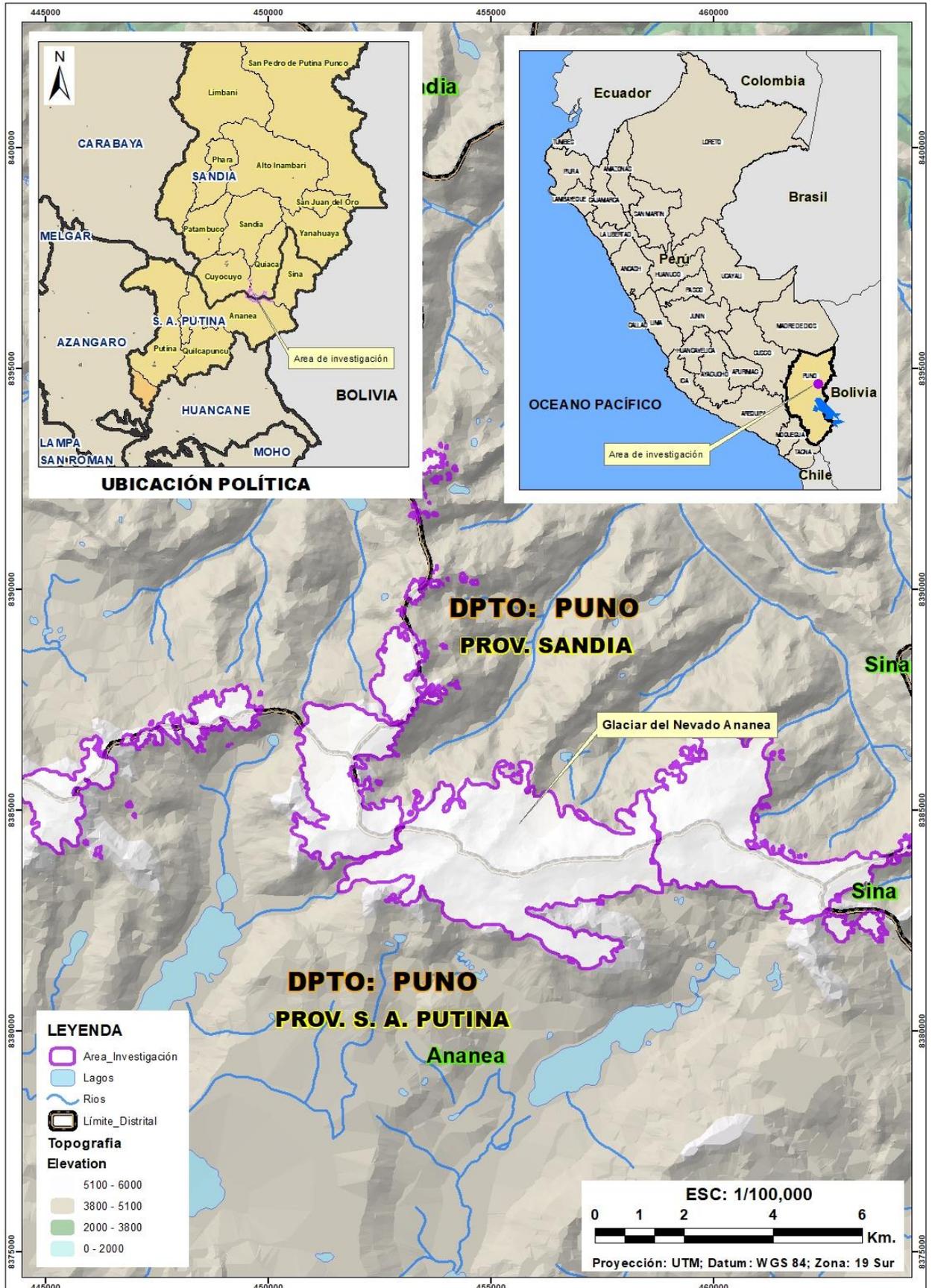


Figura 7. Mapa de ubicación del glaciar Ananea

El área de investigación se encuentra situado dentro varias concesiones mineras de las cuales los más destacables son: Ana María I, II, III y IV. Perteneciente a la Corporación Minera Ananea S.A. (CMASA), Titan S.R.L. y Cori Puno S.A.C (Figura 8).

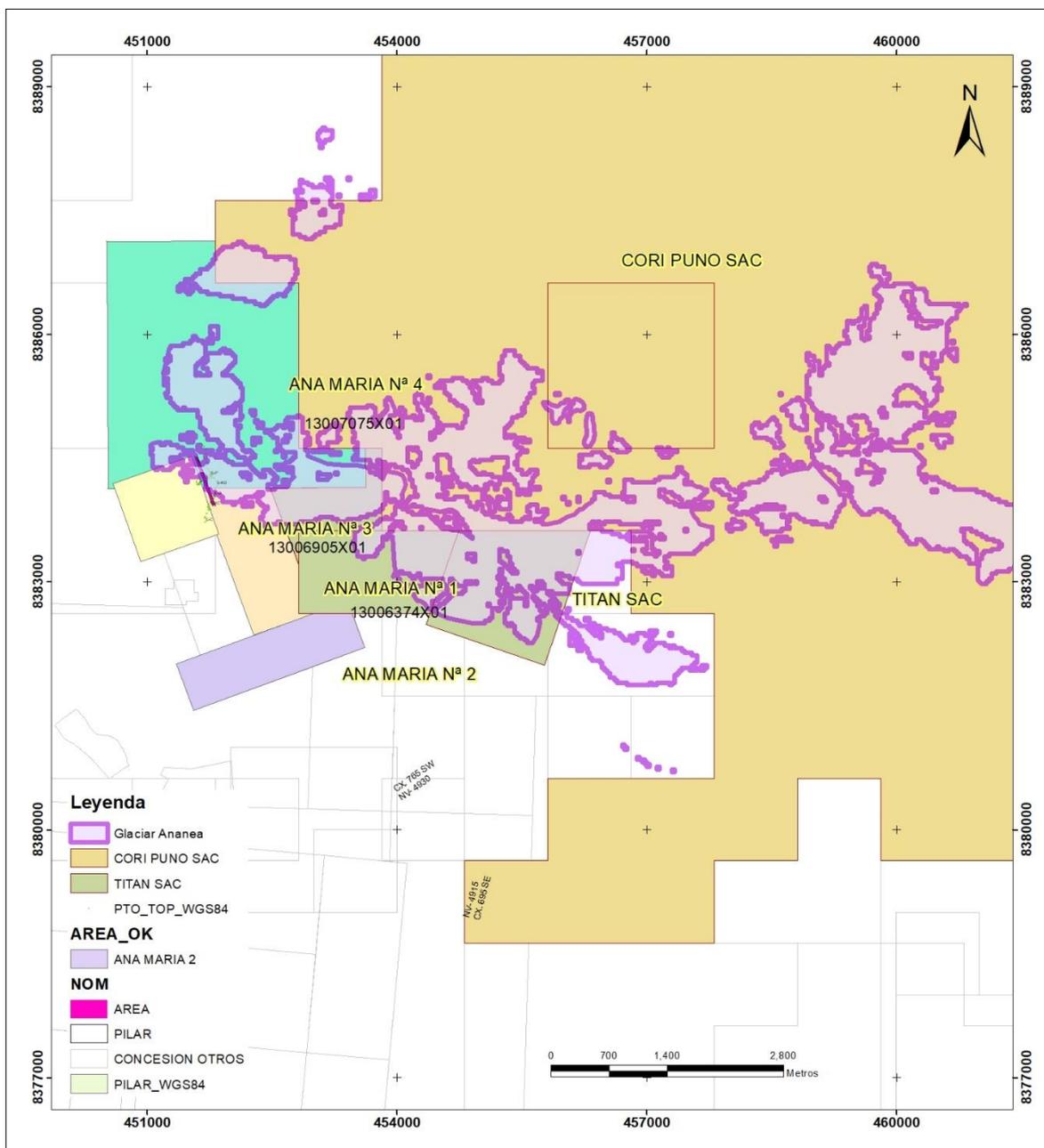


Figura 8. Mapa de concesiones dentro del área de investigación

Para acceder al área de investigación se recomienda emplear dos rutas cuyas descripciones, distancias y tiempos, se especifican en la Tabla 4. Así mismo, se muestra la ubicación visual mediante el uso de la herramienta Google Earth (Figura 9).

Tabla 4

*Descripción de la accesibilidad hacia el nevado Ananea*

Localidades	Distancia (km)	Tipo de vía	Tiempo
Lima - Juliaca	1266	Asfaltada	20 h 36 min.
Juliaca - Ananea	140	Asfaltada	02 h 50 min.
Ananea – Nevado Ananea	35	Trocha carrozable	45 min.

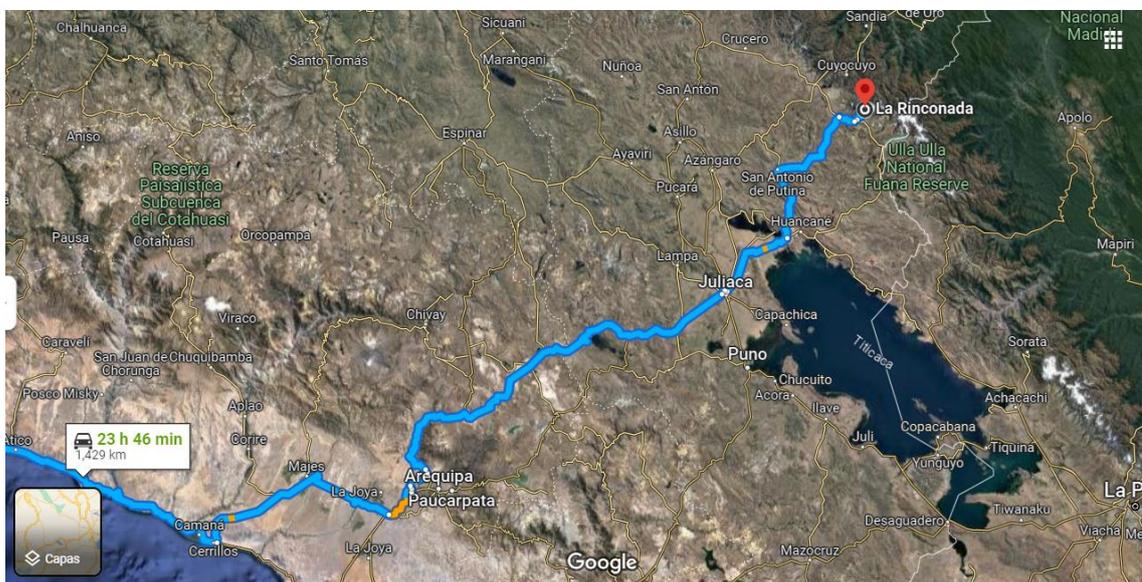


Figura 9. Vista de accesibilidad al área de investigación

## Hidrografía

El nevado Ananea suministra agua a dos regiones hidrográficas, incluyendo una de las 84 cuencas hidrográficas del Amazonas y parte de las 13 cuencas hidrográficas del Titicaca. La primera región abarca los ríos Cuyocuyo, Sandia, Quiaca, Inambari, Limbani y Putina Punco, mientras que la segunda región incluye los ríos Rinconada, Ananea, Putina, Potoni, Crucero y Azángaro (Figura 10). Estas subcuencas presentan un sistema de flujo estacional, con caudales altos durante los meses de verano (noviembre a marzo) y bajos durante los meses de invierno, el caudal promedio anual del río Azángaro es de  $49.9 \text{ m}^3/\text{s}$  (ANA, 2014).



Figura 10. Mapa de cuencas hidrográficas

## **Clima**

La región en general se caracteriza por tener un clima frío y seco, con temperaturas promedio que varían entre -2 y 10 grados Celsius. Durante las noches, las temperaturas mínimas pueden llegar a -10 grados Celsius. La precipitación anual promedio es de alrededor de 600 mm, siendo la temporada de lluvias de diciembre a marzo y la época seca de abril a noviembre. Según la clasificación climática de Köppen, el clima del nevado Ananea, ubicado en el distrito de Ananea en la región de Puno, Perú, se clasifica como un clima de tundra alpino (ET). Este tipo de clima se caracteriza por temperaturas frías a lo largo del año, con veranos cortos y frescos.

## **Geología**

La geología regional presenta rocas antiguas del paleozoico inferior, conformadas por lutitas, pizarras, filitas, cuarcitas, metacuarcitas. Así mismo, afloran cuerpos ígneos compuesto por rocas leucograníticas del pérmico superior.

Localmente se tiene la presencia de la formación Sandia del ordovícico, la formación Ananea del silúrico – devónico, la zona no está muy plegada, pero tiene la actividad tectónica intensa y fallamiento de tipo regional y local, como la falla Esperanza, San Andrés, Carmen, Lunar y otros que son considerados como control estructural de las estructuras mineralizadas de oro. Dichas estructuras se encuentran en mantos ligeramente plegados cuyos ejes de plegamiento son de rumbo NO y sus potencias varían de 1 cm a 30 cm, también posee vetas de 0.5 a 20 cm de potencia y vetillas de oro con presencia de cuarzo gris ahumado a gris azulado, brillo grasoso con espesores variables hasta 2 cm.

### **3.2. Población**

La población comprende la cobertura glaciaria del nevado de Ananea, desde los años 1985 hasta el 2022. que pertenece a la cordillera Oriental, Puno – Perú.

### **3.3. Muestra**

Para el caso del estudio se evaluó el área total del nevado Ananea completamente correspondiente a las superficies de los años 1985 hasta 2022, durante los meses de mayo a setiembre que son los meses de estiaje. Por lo tanto, la muestra corresponde a estas condiciones.

### **3.4. Método de investigación**

El tipo de investigación es correlacional, de enfoque cuantitativo y el diseño de investigación es observacional.

Porque se observa el fenómeno tal y como se dan en su contexto natural, para después analizarlo. Es correlacional porque en la investigación se realiza una comparación de los datos a través de paquetes estadísticos.

### **3.5. Descripción detallada de métodos por objetivos específicos**

#### **3.5.1. Diseño de las variables analizadas**

La descripción de las variables a ser analizadas en este objetivo específico se menciona a continuación:

Variable dependiente: Cambios multitemporales del nevado Ananea cada dos años (Variable respuesta).

Variable independiente: Periodo anual entre 1985 a 2022 (Variable predictora).

#### **3.5.2. Procedimiento metodológico**

Se efectuó la obtención de imágenes satelitales Landsat TM, ETM y OLI del Servicio Geológico de los Estados Unidos (USGS Earth Explorer), luego se utilizó softwares para el análisis de imágenes multiespectrales para los procedimientos de calibración y corrección radiométrica, corrección atmosféricas y orthorectificación así la como la georreferenciación y luego se realizó el análisis multitemporal de las imágenes satelitales desde los años 1985 a 2022. Así mismo se realizó la combinación de bandas espectral y el Índice de Diferencia Normalizada de Nieve (NDSI) para la clasificación supervisada de la cobertura glaciar. En esta parte, para conseguir los resultados se desarrolló los siguientes procedimientos:

- Clasificación supervisada de las imágenes satelitales en softwares del sistema de información geográfica (GIS, QGIS y otros).
- Vectorización de datos alfanuméricos, de datos ráster a capas vectoriales.
- Estimación del área glaciar con respecto al periodo de análisis y la determinación la tasa del retroceso glaciar.

- Generación de gráficos, histogramas y mapas temáticos referidos a fines meteorológicos.
- Imágenes satelitales Landsat 1, 3, 5 y 8, este material fue obtenida del Servicio Geológico de los Estados Unidos (USGS Earth Explorer), también de la plataforma de Administración Nacional de Aeronáutica y el Espacio (NASA) mediante su visor Earth Data y la plataforma científica Google Earth Engine.
- El procesamiento, validación y modelo digital de elevación (DEM) se realizó en Software Gis, Qgis y Envi.
- Para satisfacer los resultados esperados se efectuó modelos estadísticos de regresión lineal, mediante el uso de software Rstudio, también se obtuvo el análisis temporal de la cobertura glaciar, perfiles espectrales y mapas temáticos.

### **3.5.3. Obtención de las imágenes satelitales**

Se realizó la obtención de 20 imágenes satelitales de Landsat 5, 7 y 8 durante el periodo de 1985 – 2022, enseguida se hizo el tratamiento de las imágenes mediante el siguiente procedimiento: combinación de bandas, longitudes de onda, se añadió los valores de pérdidas y ganancias, corrección radiométrica, atmosférica y geométrica.

Las imágenes satelitales que fueron utilizados para el presente análisis son Landsat TM, ETM y OLI con resolución espacial de 30 metros a excepción de la banda pancromática de la Landsat 8 que tiene 15 metros de resolución espacial. Las resoluciones de los sensores Landsat 5 se presentan en la (Tabla 5).

Tabla 5

*Características espectrales de la imagen satelital Landsat 7.*

<b>Bandas Landsat 7</b>	<b>Longitud de Onda (<math>\mu\text{m}</math>)</b>	<b>Resolución (m)</b>
Banda 1 - Azul	0.45 - 0.52	30
Banda 2 - Verde	0.52 - 0.60	30
Banda 3 - Rojo	0.63 - 0.69	30
Banda 4 - Infrarrojo Cercano (NIR)	0.77 - 0.90	30
Banda 5 - SWIR	1.57 - 1.75	30
Banda 6 - Infrarrojo Térmico	10.40 - 12.50	30
Banda 7 - SWIR	2.09 - 2.35	30
Banda 8 - Pancromática	0.52 - 0.90	15

Fuente: Giri et al. (2017).

#### **3.5.4. Calibración y corrección radiométrica**

La corrección radiométrica es el proceso para ajustar los valores de brillo de los píxeles de una imagen para reflejar con mayor precisión la cantidad de energía reflejada o emitida por la superficie terrestre. La calibración radiométrica es un proceso para convertir los valores digitales (VD) de brillo de los píxeles de una imagen a radiancia. Esta conversión se realiza utilizando modelos matemáticos y datos de calibración adquiridos durante el vuelo del satélite.

Existen diferentes métodos de calibración radiométrica, que varían según el tipo de sensor y los datos de calibración disponibles. Por lo tanto, se ha utilizado el método Cross -Track illumination corrección, Dark subtraction, corrección de reflectancia y radiancia. Cabe resaltar que para este proceso fue necesario insertar valores de longitudes de onda en la metadata de la imagen.

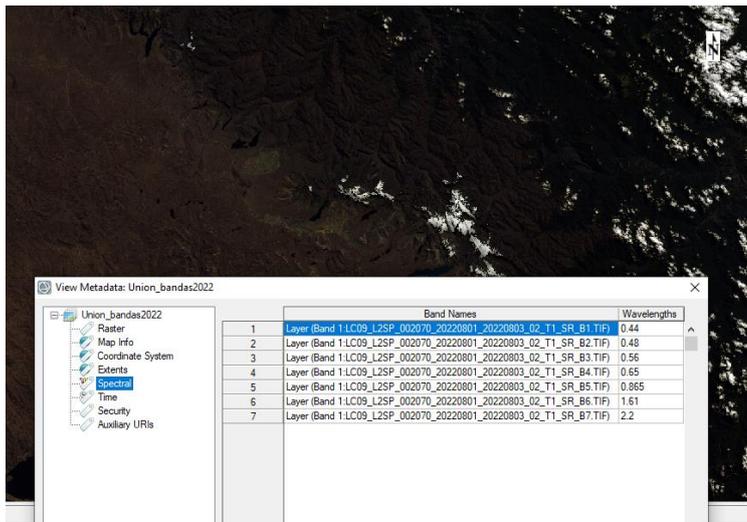


Figura 11. Calibración y corrección radiométrica

### 3.5.5. Corrección atmosférica

La siguiente corrección se realizó por método de Flaash Atmospheric Correction, donde esta técnica consiste en la eliminación de los componentes de aerosoles suspendidos en la atmosfera. De tal modo para el cálculo de la corrección fue necesario insertar datos sobre valores de pérdida y ganancia que encuentra en el file metadata de Landsat, del mismo modo, fue necesario datos como: la elevación media de la zona, tamaño de pixel, la fecha y hora de adquisición de la imagen, condición atmosférica, el ángulo de elevación solar, azimut solar, tipo de sensor y altura de sensor. En concreto este procedimiento nos permite mejorar la visibilidad, nubosidad, humedad, gradiente de temperatura, emisión de gases como el dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>).

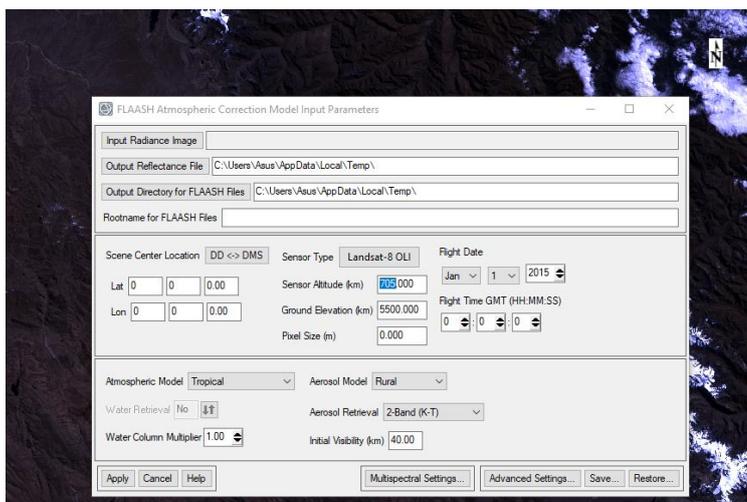


Figura 12. Corrección atmosférica por método Flaash Atmospheric Correction

### 3.5.6. Corrección geométrica

Para la parte de corrección geométrica de las imágenes Landsat se utilizó una metodología empírica llamada puntos de control en base a la topografía a escala 1:100,000, que fue generada por la Carta Nacional Peruana y el cuadrángulo 30X y 30Y del Instituto Nacional Geológico Minero Metalúrgico del Perú (INGEMMET). Así mismo se realizó un modelo digital de elevación (DEM) con las curvas de nivel del cuadrángulo nacional, dicho modelo se utilizó para efectuar la ortho rectificación tomando como base la altitud. Las imágenes satelitales fueron obtenidas en el sistema de referencia WGS 1984, proyección Universal Transversal Mercator (UTM), zona 19S, en formato Geotif. Los puntos de control se refieren a una geometría de puntos plasmados en la imagen satelital y la base de comparación que ambos deben tener el punto en común, las que pueden ser intersección de vías, infraestructura y entre otros (Figura 13).

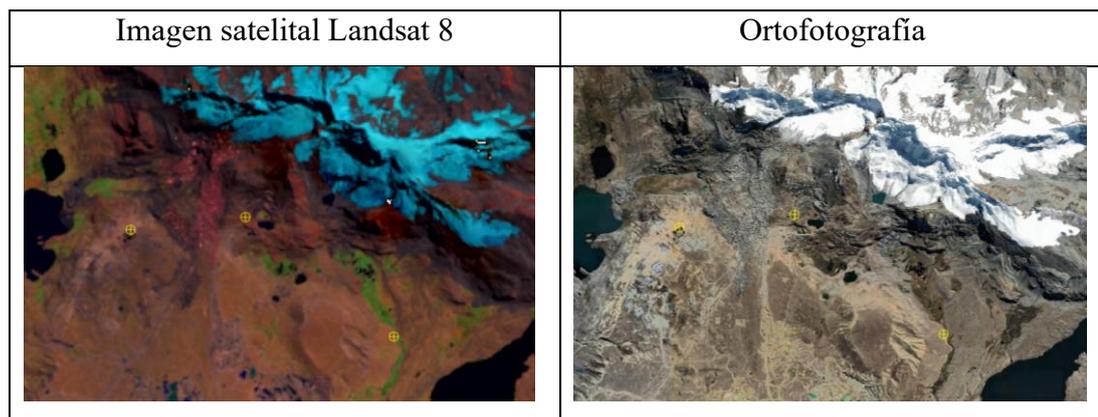


Figura 13. Corrección geométrica de las imágenes satelitales

### 3.5.7. Combinación de bandas espectrales

Para determinar los cambios multitemporales de la variación del área del glaciar Ananea, se analizaron las diferentes bandas espectrales de los satelitales en un período igual a 37 años que están comprendidas entre los años 1985 a 2022. Se realizó la composición de las distintas bandas espectrales, específicamente la banda 432 y 753 del Landsat 8 (Figura 14).

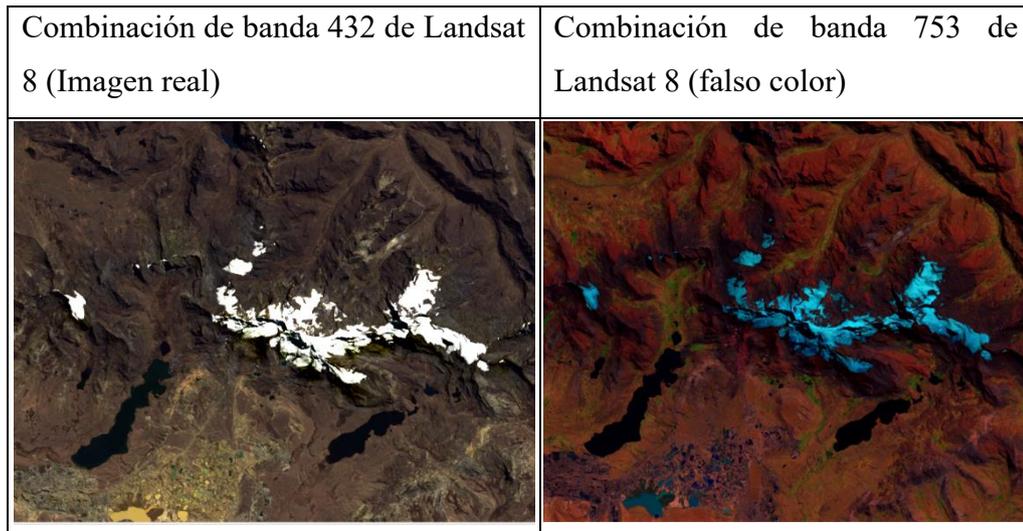


Figura 14. Combinación de bandas en las imágenes Landsat 8, 2022

### 3.5.8. Cálculo del NDSI

El Índice de Diferencia Normalizado de Nieve (NDSI), fue mejorado en base a los autores planteados por Hall (1995), Medina y Mejía (2014) y cuadros (2014). El NDSI es calculado mediante la ecuación 3 y 4 para imágenes Landsat 5, 7 y 8 respectivamente.

$$\text{NDSI}_{L5,7} = \left[ \frac{B2-B5}{B2+B5} \right] \quad \text{Ec. (3)}$$

$$\text{NDSI}_{L8} = \left[ \frac{B3-B6}{B3+B6} \right] \quad \text{Ec. (4)}$$

Donde: B2, B3, B5 y B6 son las bandas de una imagen Landsat, con respecto la banda 2 verde. Cabe resaltar que los índices anteriores planteados por varios autores son irrelevantes en otras condiciones geográficas puesto que la diferencia de reflectancia entre nieve y cuerpos de agua (lagunas al pie del nevado) no existe diferencia espectral por la similitud de reflectancia. Por lo tanto, se añade una banda al índice NDSI planteado (Ec.3 Ec4), para tal fin la banda 3 (Landsat 5, 7) y la banda 4 (Landsat 8), dicha modificación en el índice NDSI (Ec. 3B y 4B) mejora la reflectancia y resalta la superficie de hielo y nieve.

$$\text{NDSI}_{L5,7} = \left[ \frac{B2-B5}{B2+B5} \right] - B3 \quad \text{Ec. (3B)}$$

$$\text{NDSI}_{L8} = \left[ \frac{B3-B6}{B3+B6} \right] - B4 \quad \text{Ec. (4B)}$$

Hay que mencionar que ambas ecuaciones tienen el mismo fin, considerando que la ecuación 3 fue planteada por Hall (1995), lo aplicaron Medina y Mejía (2014), Cuadros (2014) y Díaz *et al.*, (2017). Sin embargo, en esta investigación se modificó la ecuación clásica por causa de que el índice anterior no diferencia completamente la presencia de nieve y el cuerpo agua para tal fin se plantea la ecuación 3B y 4B (Figura 15).

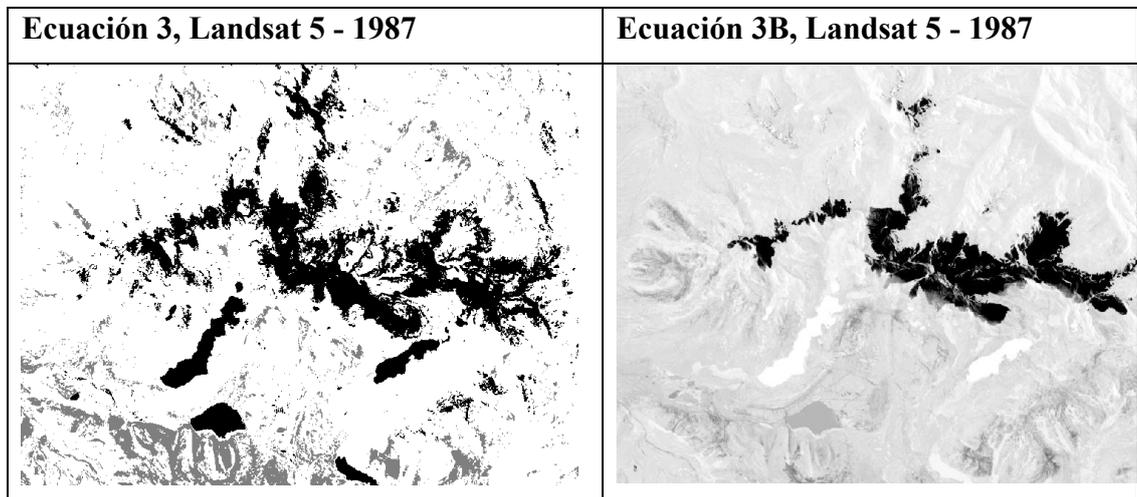


Figura 15. Cálculo del Índice de Diferencia Normalizado de Nieve (NDSI) de Landsat 5 y 7, Ananea - 2022.

Del mismo modo la ecuación 4, presenta variabilidad en el índice de cálculo de las bandas verde e infrarroja de onda corta y la ecuación 4B incluye la banda roja en el cálculo de cociente de NDSI (Figura 16).

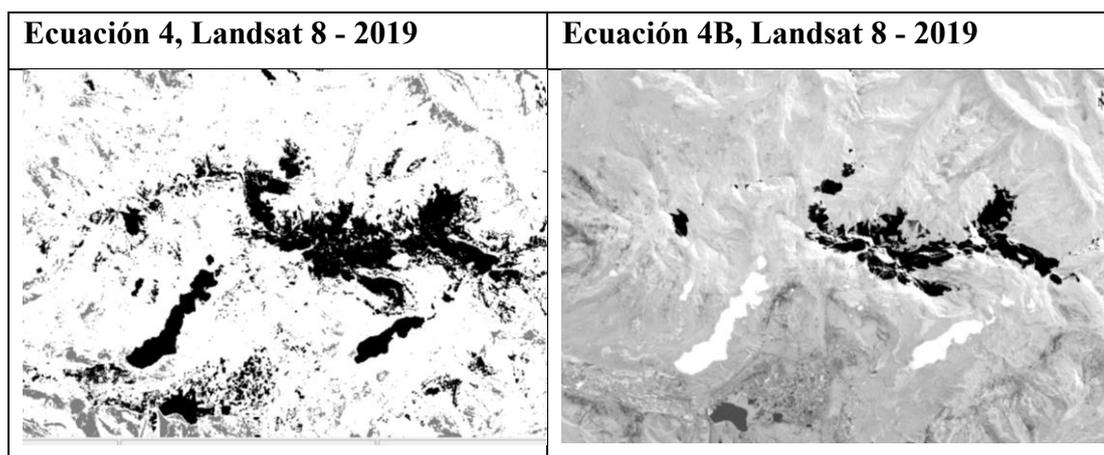
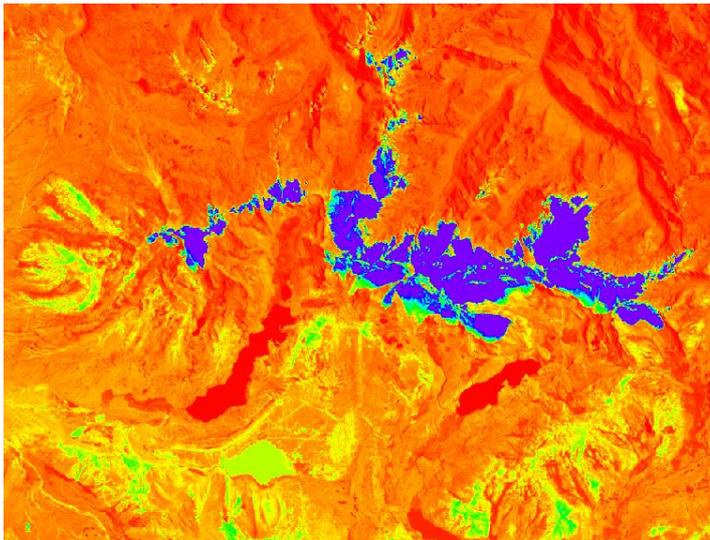


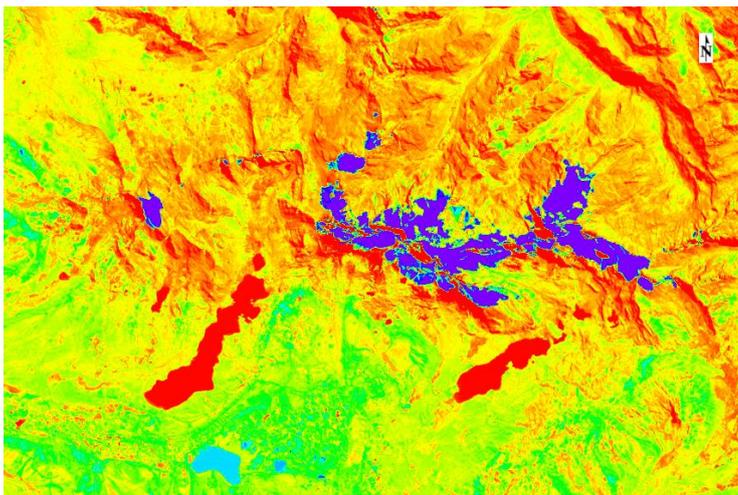
Figura 16. Cálculo del Índice de Diferencia Normalizado de Nieve (NDSI) de Landsat 8, Ananea -2022.

A continuación, se describe el NDSI de la ecuación 3B en modo de combinación de colores Rainbow, de la imagen Landsat 5 del año 1987 (Figura 17).



*Figura 17.* Índice NDSI, modificado en modo Rainbow, imagen del año 1987.

En la Figura 18 se muestra el índice NDSI de la ecuación 4B en modo de combinación de colores Rainbow, de la imagen Landsat 8 del año 2019.



*Figura 18.* Índice NDSI, modificado en modo Rainbow, imagen del año 2019.

### **3.5.9. Clasificación y vectorización**

Para la etapa de clasificación se utilizó el Índice de Diferencia Normalizado de Nieve (NDSI) para la ecuación 3B del Landsat 5 - 7 y la ecuación 4B para Landsat 8, así mismo se efectuó la clasificación supervisada.

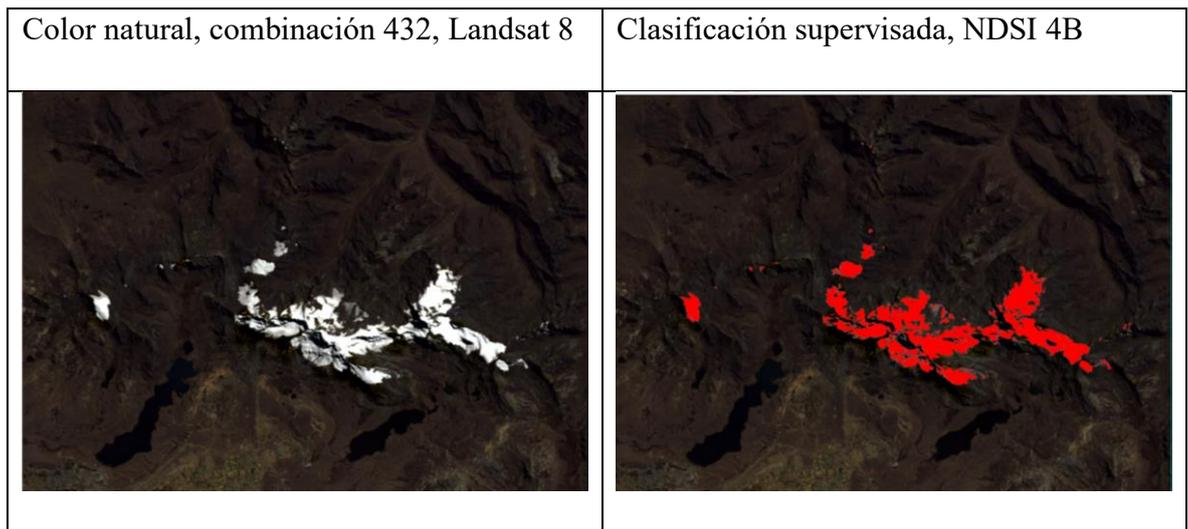


Figura 19. Clasificación supervisada de la imagen satelital, Ananea – 2022.

Se realizó la clasificación supervisada por medio regiones de interés (valores de píxeles) y el algoritmo de clasificación llamada paralelepiped clasification, que es un algoritmo que considera rango de valores de cada banda, formando un paralelepípedo multidimensional que define la clase de cobertura, un pixel es clasificado dentro de una clase, si sus valores están dentro del paralelepípedo correspondiente. Sin embargo, una de las mayores desventajas es que los píxeles cuyas firmas se superponen a dos o más paralelepípedos no pueden ser clasificados (Richards and Jia, 2006). Por lo demás es efectivo para la detección del NDSI, después se realiza un algoritmo de posclasificación para eliminar los errores a nivel de pixel y exportar en formato vector, shp, dwg, que son usualmente más utilizados.

### 3.5.10. Aplicación de la prueba estadística

En la parte de estadística se aplicó la regresión lineal simple, considerando los dos variables y la obtención de correlación Pearson y por último se realizó la validación de la modelo predictora (Errores residuales, prueba de Shapiro Wilk, la normalidad de errores y la homogeneidad de varianza).

## 3.6. Comportamiento histórico de las series de precipitación y temperatura

### 3.6.1. Descripción de las variables analizadas

La descripción de la variable a ser analizadas en este objetivo específico es:

- Variable dependiente: Comportamiento histórico de la precipitación y temperatura media anual (Variable respuesta).

- Variable independiente: Periodo anual entre 1985 a 2022 (Variable predictora).

### **3.6.2. Procedimiento metodológico**

Se efectuó la obtención de los parámetros meteorológicos del registro histórico de Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú (SENAMHI, 2022), particularmente de la estación meteorológica Ananea. Los datos climáticos que se utilizaron fueron temperatura mínima y máxima en grados centígrados (°C) y precipitación acumulada en milímetros por año (mm/año). Con los datos obtenidos se realizó el análisis de correlación entre variables y cálculo de regresión lineal simple, para determinar la influencia de variables mencionados sobre la cobertura glaciar y la variación de la temperatura media anual considerando algunas expectativas futuras.

### **3.6.3. Equipos y/o materiales**

Los equipos y/o materiales utilizados para cumplir el objetivo planteado fueron los siguientes:

- Datos históricos de las estaciones meteorológicas de Ananea y Sandia, dicha información será analizada y ordenada en el programa informático Microsoft Excel.
- Análisis de gráficos, cálculo de la correlación de los variables, prueba estadística, se realizará con el uso de herramientas estadísticos (Infostat, Rstudio).

### **3.6.4. Aplicación de la prueba estadística**

En la parte de estadística se aplicó la regresión lineal simple, se efectuó la correlación entre la variable respuesta y predictora, y por último se obtuvo el grado de influencia de la temperatura sobre la variación del área glaciar.

## **3.7. Estimación de los futuros escenarios sobre el comportamiento glaciar**

### **3.10.1. Descripción de las variables analizadas**

La descripción de la variable a ser analizadas en este objetivo específico se menciona a continuación:

- Variable dependiente: Cambio multitemporal del glaciar Ananea (Variable respuesta).

- Variable independiente: Periodo anual, temperatura máxima, temperatura mínima, precipitación, actividad minera. (Variables predictoras).

### **3.10.2. Procedimiento metodológico**

De acuerdo a los resultados obtenidos sobre el comportamiento glaciario se procedió a calcular la proyección de datos hacia futuros escenarios, mediante el test de regresión lineal múltiple y matriz de correlación de las variables tiempo (A), temperatura máxima (TMA), temperatura mínima (TMI), precipitación (PP), episodio El Niño (NI), actividad minera (MI) y área de la cobertura glaciaria (AGLA).

Se utilizó la información de los parámetros meteorológicos analizados y cambios periódicos de la cobertura glaciaria, para posteriormente aplicar cálculos estadísticos de progresión a escenarios futuros de la muestra, para tal fin se cumplió con el uso del paquete estadístico Rstudio.

### **3.10.3. Aplicación de la prueba estadística**

En esta parte se aplicó la estadística descriptiva, correlaciones variables y regresión lineal múltiple, además se realizó el análisis de multicolinealidad de variables y la validación del modelo por medio de análisis de errores residuales, prueba de normalidad y la homogeneidad de varianza. Para este fin se utilizó las herramientas estadísticas (Rstudio y Infostat).

## CAPÍTULO IV

### RESULTADOS Y DISCUSIÓN

#### 4.1. Cambios multitemporales de la cobertura glaciar Ananea

La estimación de los cambios multitemporales de la cobertura glaciar Ananea se realizó mediante el uso de 19 imágenes LANDSAT (TM, ETM y OLI) y recursos visuales de GOOGLE EARTH. Este análisis abarcó un período de 37 años, desde 1985 hasta 2022, con un intervalo de revisión cada 2 años. Durante este proceso, se determinó la variación en la extensión de la superficie glaciar en kilómetros cuadrados (km<sup>2</sup>), la tasa de cambio anual en porcentaje (%) y la tasa de retroceso en porcentaje (%) (ver Tabla 6).

Tabla 6

*Cambios multitemporales de la cobertura glaciar Ananea, 1985 - 2022.*

Años	Sensor LANDSAT	Área de Glaciar (km <sup>2</sup> )	Variación del área (km <sup>2</sup> )	Tasa de cambio anual (%)	Tasa de retroceso (%)
1985	TM	48.87		-	100.00
1987	TM	46.67	2.19	4.49	95.51
1989	TM	45.92	0.75	1.61	93.97
1991	TM	44.40	1.52	3.32	90.86
1993	TM	42.96	1.44	3.24	87.92%
1995	TM	40.99	1.97	4.59	83.88
1997	TM	39.21	1.78	4.34	80.24
1999	TM	36.69	2.52	6.44	75.08
2001	TM	37.04	-0.35	-0.96	75.80
2003	TM	36.11	0.93	2.50	73.90

2005	TM	35.95	0.16	0.44	73.57
2007	ETM	32.50	3.45	9.61	66.50
2009	ETM	31.19	1.31	4.02	63.83
2011	ETM	29.89	1.30	4.16	61.17
2013	ETM	29.49	0.40	1.33	60.36
2015	OLI	26.28	3.21	10.90	53.78
2017	OLI	21.49	4.79	18.21	43.99
2019	OLI	20.35	1.15	5.33	41.64
2021	OLI	18.56	1.79	8.78	37.99
2023	OLI	18.26	0.30	1.62	37.37
TOTAL		682.82	30.60	4.95	

Fuente: Elaborado a partir de Landsat y Google Earth (1985 -2022)

En la Tabla 6, se muestra la tasa de cambio anual para los distintos periodos de análisis, dichos valores varían entre -0.9 a 18.21 %, considerando la tasa promedio de cambio anual a 4.95% y la tasa de retroceso para el año 2022 es 37.68% que indica una pérdida considerable del 62.32% en los últimos 37 años con respecto a su área inicial de 48.87 km<sup>2</sup> en el año 1985, mientras que para el año 2022 la superficie ha disminuido a 18.26 km<sup>2</sup>, en efecto se estima una disminución promedio del 16.84% por década y una tasa promedio de 2.42 km<sup>2</sup>/año.

ANA (2014), presentó el inventariado de glaciares en el Perú, resaltando que en los últimos 40 años, los glaciares de las 19 cordilleras glaciares del Perú han sufrido pérdida de su cobertura en más de 40%, lo que corrobora Díaz *et al.*, (2017), con el estudio realizado sobre los cambios de la cobertura glaciar del nevado Allin Capac y Chichi Capac, que entre 1975 – 2015, han sufrido una pérdida del 67%, del área glaciar, equivalente a una disminución de 17%/anual y una tasa promedio de 0,89 km<sup>2</sup>/año. Del mismo modo Cuadros (2014), determinó la reducción de la cobertura glaciar del nevado Ananea entre 1985 - 2010 en 24.41 % de cobertura en los últimos 25 años, de la misma forma Silverio (2018), estableció la pérdida de masa glaciar en 62% en el estudio del nevado Coropuna y su impacto por el cambio climático. En definitiva, el presente estudio es recíproco con otros estudios resaltando la pérdida de su cobertura glaciar en más del 40% de su área inicial.

#### 4.1.1. Análisis estadístico

En la investigación cuantitativa, una fase crucial es el procesamiento, análisis e interpretación de los datos recolectados utilizando el instrumento correspondiente. En esta investigación, se utilizó la estadística inferencial, la cual juega un papel importante al proporcionar al investigador la capacidad de encontrar significancia en los resultados obtenidos. Según Sánchez y Meza (1984), la estadística permite comparar dos o más grupos de datos con el fin de determinar si las posibles diferencias entre ellos son reales o simplemente producto del azar.

Según Gujarati y Porter (2009), las técnicas que se enfocan en medir el grado de asociación entre las variables, es la regresión y correlación lineal, estos se diferencian en su enfoque y propósito. Para este fin se aplicó la correlación de Pearson para medir la relación estadística entre dos variables, que se denota por un coeficiente de correlación “r” que es un indicador que se calcula utilizando las puntuaciones de una variable en relación con las puntuaciones de otra variable, donde este coeficiente puede variar entre -1,00 y +1,00 (Hernández *et al.*, 2006) y para interpretar su valor se utiliza la Tabla 7:

Tabla 7

*Guía de interpretación del coeficiente de correlación*

Variación de “r”	Interpretación
-1,00	Correlación negativa perfecta
-0,90	Correlación negativa muy fuerte
-0,75	Correlación negativa considerable
-0,50	Correlación negativa media
-0,25	Correlación negativa débil
-0,10	Correlación negativa muy débil
0,00	No existe correlación alguna entre las variables
+0,10	Correlación positiva muy débil
+0,25	Correlación positiva débil
+0,50	Correlación positiva media
+0,75	Correlación positiva considerable
+0,90	Correlación positiva muy fuerte
+1,00	Correlación positiva perfecta

Fuente: Hernández *et al.* (2006)

Chiew y Siriwardena (2005), evaluó la existencia de una tendencia lineal mediante la relación entre un variable (x) y la variable de interés (y) se aplica la prueba de regresión lineal para predecir el valor de una variable a partir de otra variable que se ajusta una línea recta y mediante el ajuste de datos se puede realizar las predicciones.

Tabla 8

*Estadística descriptiva de área del glaciar Ananea, periodo (1985 – 2022)*

Variable	N	Media	Desviación estándar	Mínimo	Máximo	Curtosis
Año	19	2004.00	11.83	1985.00	2022.00	-1.38
Área (km <sup>2</sup> )	19	34.14	9.59	18.26	48.87	-1.23

En la Tabla 8 se muestra la estadística descriptiva, donde se resalta la media, desviación estándar y curtosis, se indica que la media para el área glaciar es 34.14 km<sup>2</sup> y desviación estándar de 9.59, donde se interpreta que el área glaciar de la muestra se desvía en promedio 9.59 km<sup>2</sup> respecto a media indicada.

Tabla 9

Matriz de correlación de Pearson del área de glaciar y periodo (1985-2022)

Variabes	Área (km <sup>2</sup> )	Año
Área (km <sup>2</sup> )	1	-0.99
Año	-0.99	1

En la Tabla 9, se aplicó la prueba estadística de correlación lineal, que sirva para analizar la relación entre dos variables (Gujarati y Porter, 2009). Donde el resultado es el coeficiente de correlación (r) igual a -0.99, que indica correlación negativa perfecta según la escala de correlación de Hernández et al, (2006). Muestra que a medida que pasen los años hay retroceso de la superficie glaciar de Ananea.

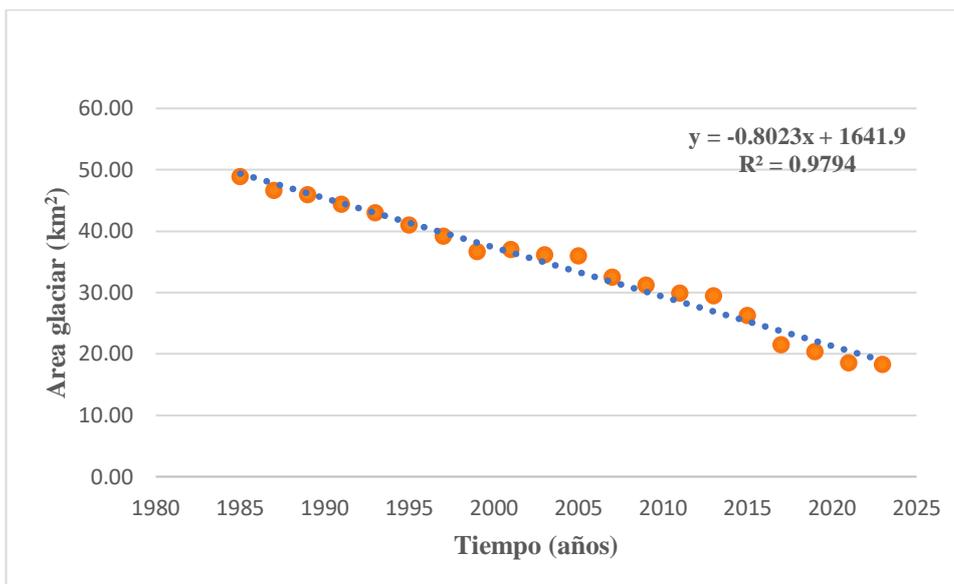


Figura 20. Variación multitemporal de la cobertura glaciar (1985 – 2022).

En la Figura 20, la línea de tendencia es de pendiente negativa que indica cambios multitemporales de la cobertura glaciar de Ananea y su coeficiente de determinación ( $R^2$ ) es alta, con un valor del 97.9% que denota el buen ajuste de los datos. Además, se identifica que, en los años 1998, 2007 y 2013 experimentaron algunas variaciones considerables que se relaciona directamente con los episodios del fenómeno de El Niño fuerte, moderado y débil (SENAMHI, 2014). Por otro lado, el rápido retroceso de los glaciares plantea una amenaza para el sustento de muchas personas y los ecosistemas, especialmente en Bolivia, Ecuador y Perú, que se encuentran entre las regiones más vulnerables al deshielo glaciar (Vuille *et al.*, 2008). En relación a esto, Hansen *et al.*, (2010) destacan que los glaciares actúan como reservorios temporales de agua. Es preocupante observar la variación del volumen en los nevados de las cordilleras.

Tomando en cuenta la Figura 21, podemos obtener la ecuación (Ec. 5), que es un modelo de regresión lineal simple. Esta ecuación se utilizó para realizar el pronóstico de una variable a partir de otra variable (Gujarati y Porter, 2009).

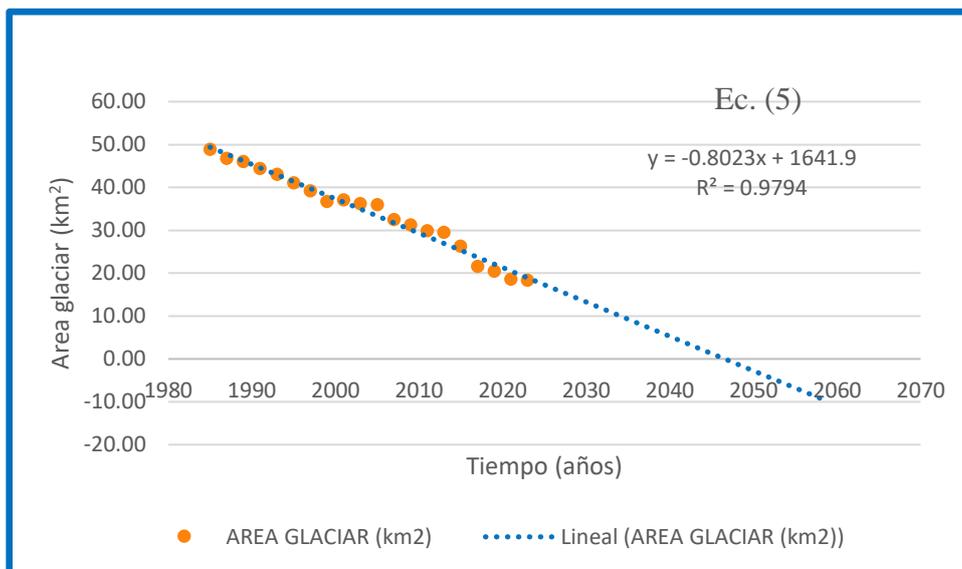


Figura 21. Proyección de la cobertura glaciar Ananea.

Finalmente se realizó los análisis estadísticos en software Rstudio, efectuando la correlación de Pearson y el modelo de regresión lineal simple hacia el futuro tal como se visualiza en la Figura 21. Dicha regresión es planteada por la ecuación 5, que es una prueba paramétrica que asume que los datos se distribuyen normalmente. (Chiew y Siriwardena, 2005).

Tabla 10

Modelo de regresión lineal simple

	Estimación	Error Std.	Tvalor	P	Nivel signif.
(Intercepto)	1642.1175	54.87053	29.93	<2e-16	***
Tiempo	-0.80238	0.02738	-29.3	<2e-16	***

Según la Tabla 10, se denota que el error residual estándar es 1.412 en 18 grados de libertad múltiple, R-cuadrado es 0.9795, R-cuadrado ajustado es 0.9783 F-estadístico: 858.8 en 1 y 18 grados de libertad, p-valor:  $2.2e-16 < 0.05$ , la cual es altamente significativo.

La ecuación de regresión lineal simple: Área glaciar (km<sup>2</sup>) = 1642.12 – 0.80(Tiempo)

Realizando la regresión lineal simple hacia el futuro buscando el valor cero del área glaciar según la ecuación de la regresión nos indica la siguiente proyección:

Tabla 11

*Proyección de la cobertura glaciar hacia el futuro*

N	Tiempo (años)	Área glaciar (km <sup>2</sup> )	Coef. Regresión	Descripción
1	2038	11.72	1642.12	Desglaciación en Proceso
2	2053	0	1642.12	Desaparición del glaciar Ananea

En la Tabla 11, de acuerdo al modelo de regresión lineal simple se estima la decadencia del glaciar Ananea para el año 2053. Sin embargo, es importante considerar otros factores climáticos como la temperatura media anual, precipitación acumulada anual, la actividad minera local y el fenómeno El Niño.

El fenómeno El Niño que ocurrió entre los años 1985 y 1998, fue responsable de una notable pérdida en la cobertura glaciar. Durante este periodo, se observó una línea de tendencia con la pendiente negativa, alcanzando un 24.4% de reducción. Esta tendencia coincide con las épocas de mayor presencia del fenómeno El Niño, incluyendo eventos moderados (1986-1987, 1987-1988, 1991-1992), muy fuertes (1982-1983, 1997-1998) y dos de intensidad débil (2004-2005, 2006-2007) según SENAMHI (2014).

Los efectos del episodio El Niño incluyeron anomalías climáticas como lluvias intensas y tormentas que se desplazaron desde el pacífico hacia la cordillera de los andes. Estas condiciones climáticas resultaron en sequías en algunas regiones y en inundaciones y deslizamientos de tierra en otras áreas. Estos eventos aceleraron el retroceso glaciar durante el periodo de 1985 a 1998, lo cual coincide con estudios realizados por Diaz *et al.* (2017), López *et al.* (2014) y Vuille *et al.* (2008).

Según SENAMHI (2022), entre los años 2005 y 2015, durante las dos primeras décadas del siglo XXI, se observó un equilibrio en el retroceso glaciar. Esto

corresponde con una menor presencia de eventos de El Niño moderados (2002-2003, 2009-2010) y fuertes (2015-2016).

#### 4.1.2. Validación del modelo de regresión lineal simple

La presente validación se realizó con pruebas como análisis de errores residuales, prueba de normalidad y homogeneidad de varianza, todos ellos ayudan a garantizar que los supuestos de la regresión lineal se cumplan y que los resultados del modelo sean confiables.

##### 4.1.5.1. Análisis de los errores residuales

Para validar regresión lineal, mediante el cálculo de los errores residuales, que son las diferencias entre los valores observados y los valores predichos por el modelo de regresión lineal. Según la propiedad la esperanza de errores es igual a cero ( $E(e_i)=0$ ), según la suma de errores residuales es  $9.853229e-16$ , la cual es una cifra muy cercana a cero e indican desviación casi nula de la línea de regresión, además el valor positivo significa que la estimación fue menor que el valor real (Tabla 12).

En fin, los residuos son muy pequeños y se distribuyen aleatoriamente alrededor de cero, indica que el modelo de regresión lineal simple se ajusta bien a los datos.

Tabla 12

*Lista de errores residuales de valores observados y predichos*

1	2	3	4	5	6
-	-1.1115188	-0.25675188	-0.17198496	-0.00721805	-0.37245113
0.51628571					
7	8	9	10	11	12
-	-1.46291729	0.49184962	1.16661654	2.61138346	0.76615038
0.54768421					
13	14	15	16	17	18
1.06091729	1.36568421	2.57045113	0.96521805	-2.22001504	-1.75524812
19	20				
-1.9404812	-0.63571429				

En la siguiente parte se realizó un histograma de errores, donde la curva debe asemejarse a una distribución normal o conocido como la campana de Gauss, en

la Figura 22a simula más o menos una distribución normal que indica buen ajuste del modelo de regresión lineal.

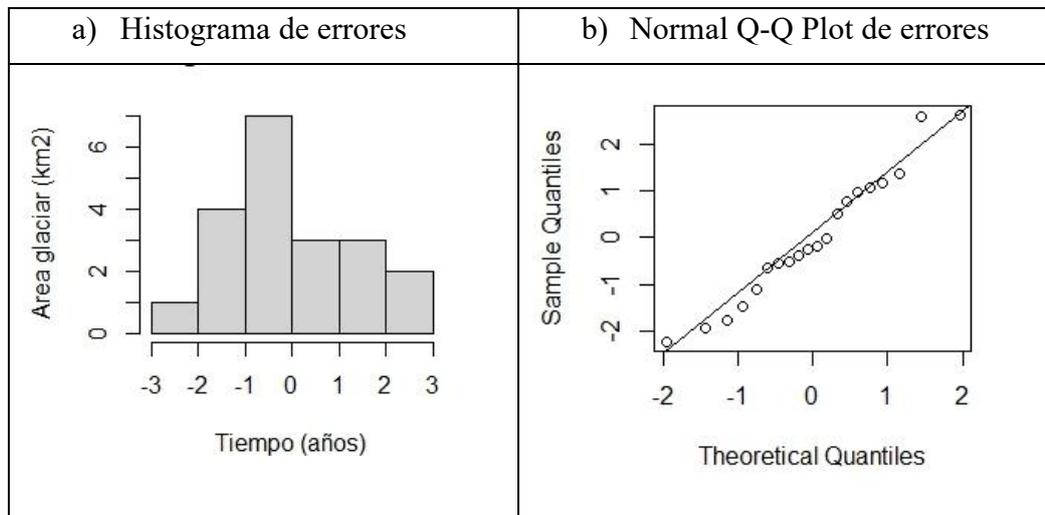


Figura 22. Histograma y Q-Q Plot de errores

En cuanto a la linealidad de los errores también es cercano a cero ( $4.929596e-17$ ) la cual indica buen ajuste y la normalidad de errores, como se observa en la Figura 22b, Normal Q-Q Plot.

#### 4.1.5.2. Prueba de verificación de normalidad

La prueba de verificación de normalidad en regresión lineal se utiliza para evaluar si los errores residuales en un modelo de regresión lineal siguen una distribución normal, donde se busca un valor P mayor que el nivel de significancia establecido para concluir que los errores residuales siguen una distribución normal. Si el valor p es menor que el nivel de significancia, se concluye que los errores no siguen una distribución normal y se deben considerar enfoques alternativos.

Tabla 13

#### *Prueba de normalidad*

Prueba	Data residual	P-valor
Shapiro-Wilk	W = 0.9652	0.6526
Kolmogorov - smirnov	D = 0.1021	0.8452
Jarque - Bera	JB=0.5706	0.7518
Anderson - Darling	A=0.2278	0.7842

En todas las pruebas de normalidad de la Tabla 13, el P valor es mayor al alfa ( $\alpha = 0.05$ ) que significa que los errores se distribuyen en forma normal, la cual es bueno.

#### 4.1.5.3. Prueba la homogeneidad de varianza

La prueba siguiente se realizó para evaluar si los errores residuales en un modelo de regresión lineal tienen una varianza constante en todas las combinaciones de los valores de las variables predictoras. Esto es importante porque la regresión lineal asume que los errores tienen una varianza constante, también conocida como homocedasticidad.

Tabla 14

##### *Homogeneidad de varianza*

Chi cuadrado	Grados de libertad	P valor
3.233125	1	0.072163

De acuerdo a la Tabla 14, el P valor es 0.072 ( $P > 0.05$ ) donde se acepta la hipótesis nula ( $H_0$ ), porque los errores residuales tienen una varianza constante, Es decir, no hay heterocedasticidad y proporciona mayor confianza en los resultados del modelo de regresión lineal. Por otro lado, si los residuos presentan patrones sistemáticos o grandes desviaciones, puede indicar que el modelo no se ajusta adecuadamente a los datos y que pueden existir otros factores que no están siendo considerados en el modelo.

#### 4.1.3. Cambios morfológicos

Los cambios morfológicos observados en la superficie glaciar del nevado de Ananea principalmente se deben al cambio climático, calentamiento global que está sufriendo el planeta tierra, en 1985 la superficie glaciar era de 48.87 km<sup>2</sup> y en el año 2022 la superficie glaciar corresponde a 18.36 km<sup>2</sup> (Figura 24). Adicionalmente en los pies del glaciar Ananea se observó la actividad antropogénica como actividad minera de las minas Rinconada, Corporación Minera Ananea SAC, Empresa Minera. Titan SRL, y Unidad Minera Untuca de la empresa CORI PUNO SAC, que todos ellos tienen una influencia puntual. Por otra parte, se pudo detallar la aparición de fracturas en el glaciar, incluso hay áreas entre los picos y los flancos lado Este que ya no tienen

recubrimiento glaciar, esto se observa en la Figura 23, así mismo muestran las fotografías *in situ* de los años 1985 a 2022.

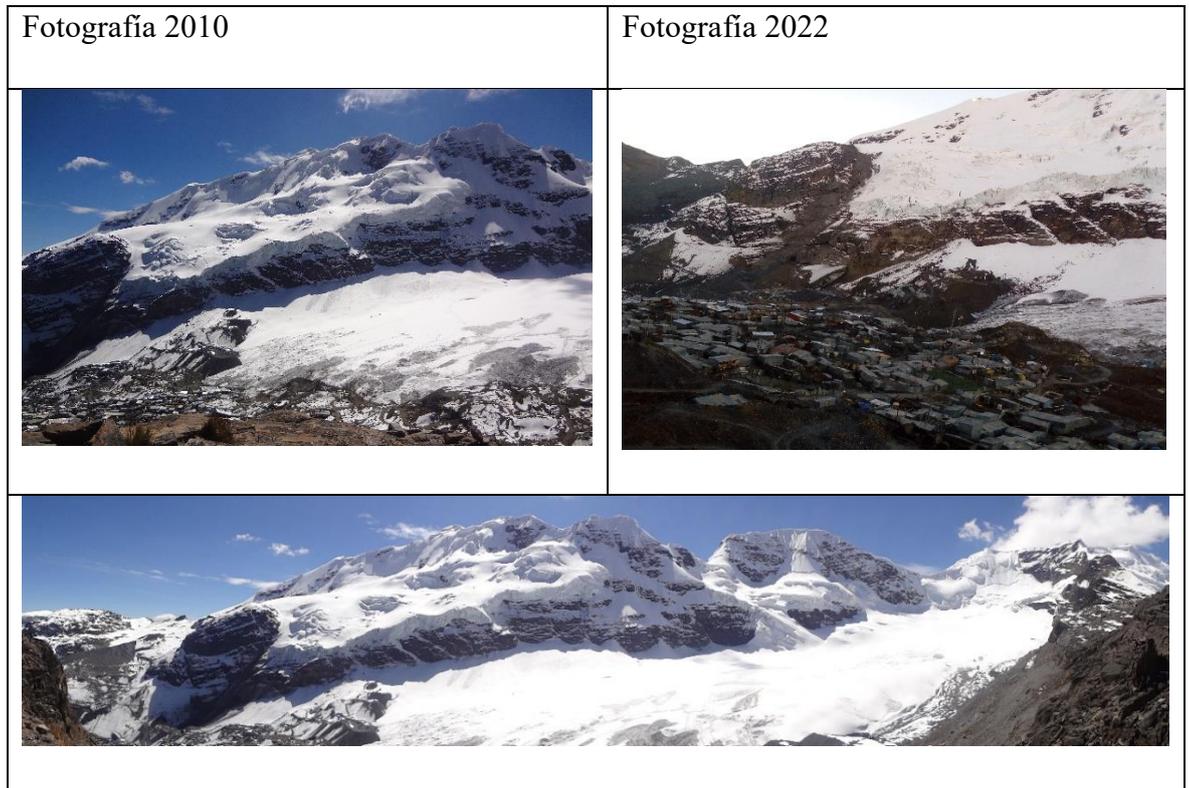


Figura 23. Glaciar Ananea flanco lado Oeste – Este

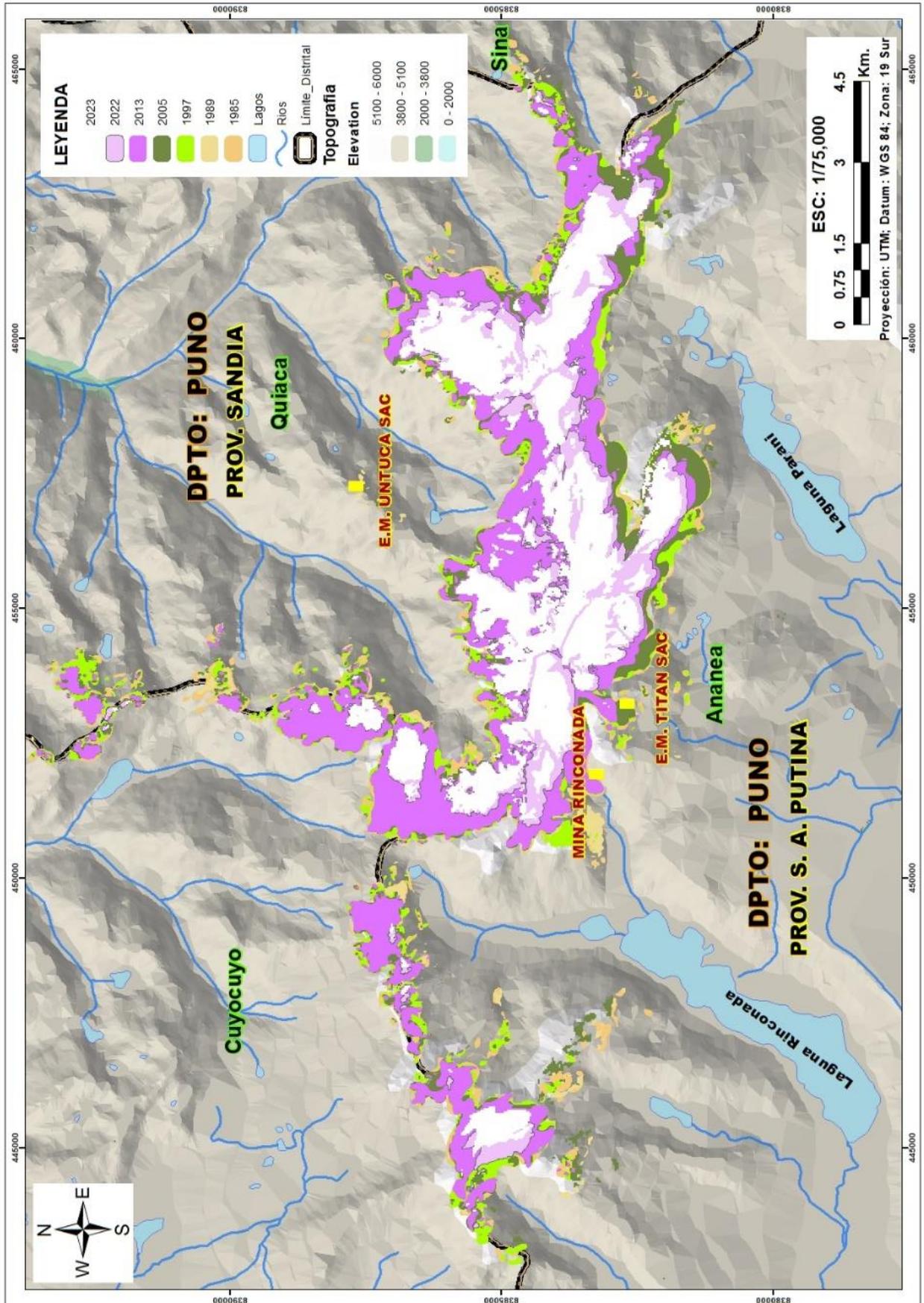


Figura 24. Mapa de cambios multitemporales del glaciar Ananea, 2022.

## 4.2. Comportamiento histórico de las series de precipitación y temperatura

En este objetivo se determinó la influencia de los parámetros como precipitación, temperatura mínima y máxima en los cambios multitemporales de la cobertura glaciar de Ananea, en el periodo de 1985 a 2022.

### 4.2.1. Dinámica de la precipitación sobre el glaciar Ananea

Para el análisis de la precipitación anual acumulada (mm/año) se utilizó la información de la estación meteorológica Ananea durante 37 años en el periodo (1985 – 2022), donde la precipitación anual (mm/año) en el área de investigación tuvo un descenso del 50% en la época del fenómeno El Niño (1998 de intensidad alta), mientras que en la costa pacífica tuvo una precipitación acumulada de 3000 mm durante septiembre y mayo (SENAMHI, 2011), lo cual indica intensas lluvias en las costas del Perú y sequía en regiones de mayor altitud como en la sierra Sur Oriental.

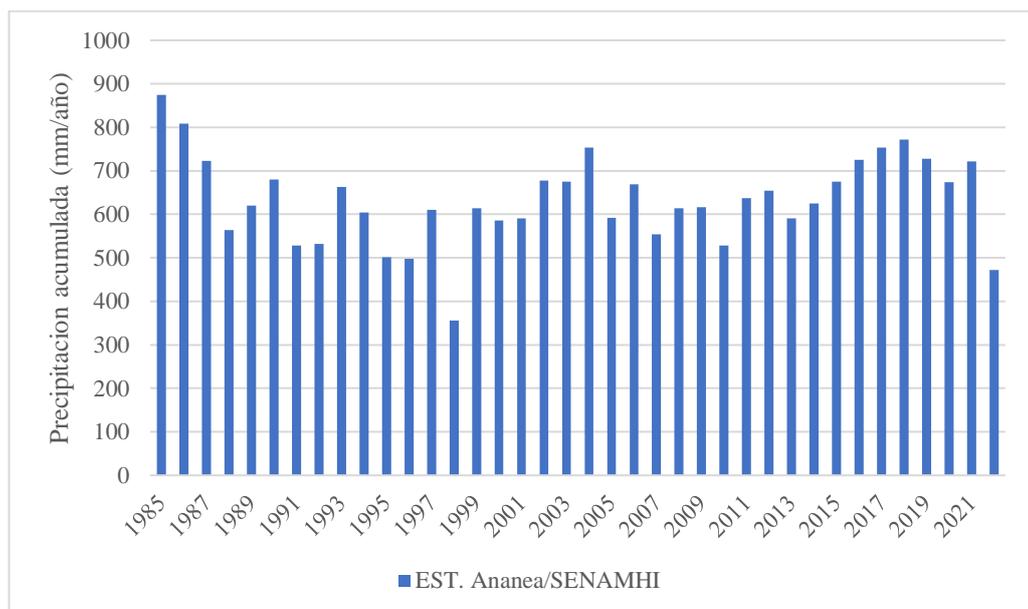


Figura 25. Precipitación acumulada (mm/año)

En el área de investigación también aconteció los eventos más intensos del fenómeno El Niño en el Perú que ocurrió en 1997-1998 con 355 mm de precipitación acumulada anual, y fue por consecuencia del calentamiento anómalo de las aguas del océano Pacífico y fuertes lluvias e inundaciones en gran parte del país y otro evento de intensidad moderada es el fenómeno de la Niña en el Perú (2022) tuvo precipitación acumulada anual de 472 mm/año (Figura 25).

Se realizó correlación de Pearson que implica una relación estadística entre las variables de precipitación y área de glaciar con respecto a la variable tiempo (Tabla 15),

Tabla 15

Matriz de correlación de Pearson del área de glaciar Ananea y precipitación (1985-2022)

Variables	Área (km <sup>2</sup> )	Precipitación	Año
Área (km <sup>2</sup> )	1	-0.087	-0.99
Precipitación	0.087	1	0.068
Año	-0.99	0.068	1

La prueba estadística de correlación lineal, que sirva para analizar la relación entre dos variables (Gujarati y Porter, 2009). En la matriz de correlación de Pearson de la Tabla 15, el coeficiente de correlación (r) entre precipitación y área de glaciar es 0.087. considerando la escala de variación de la correlación de Hernández *et al.* (2006) que indica que no existe correlación entre las variables mencionadas, y se interpreta que la precipitación no influye en absoluto en la variación del área glaciar del nevado Ananea.

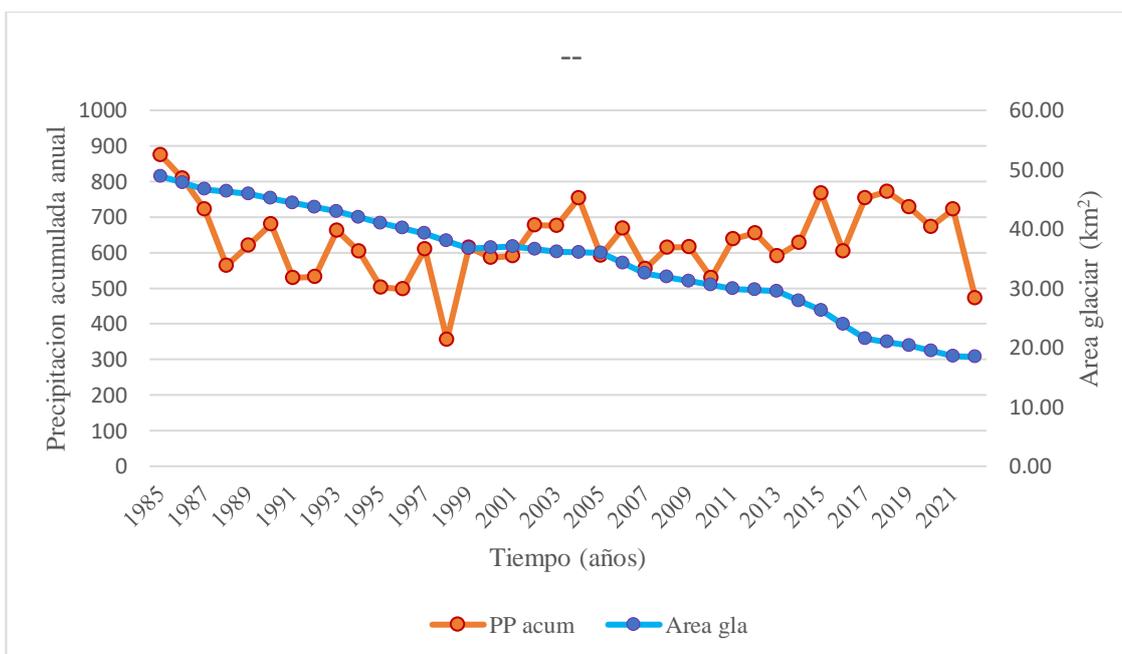


Figura 26. Influencia de la precipitación en la superficie glaciar, Ananea – 2022.

Con respecto a la influencia del fenómeno El Niño en la dinámica de la precipitación pluvial durante el periodo (1985 - 2022) tiene una tendencia estadísticamente significativa ( $\alpha < 0.05$ ), llegando al punto más elevado del fenómeno El Niño considerada de alta intensidad (SENAMHI, 2014), donde genera el punto de ruptura de la línea de tendencia y forma dos periodos de tiempo (Díaz *et al.*, 2017). Por consiguiente, el periodo 2 se da partir de los años con baja y moderada intensidad del fenómeno El Niño (2000 – 2022) y se realizó la correlación lineal entre las variables área glaciar y precipitación donde se obtiene  $r = - 0.22$ , según la clasificación de correlación de Hernández et al, (2006), se considera correlación negativa débil. Por lo tanto, se confirma que la influencia de la precipitación en la variación de la cobertura glaciar es débil, se podría decir que no existe influencia de la precipitación en el retroceso de la cobertura glaciar de Ananea.

#### **4.2.2. Dinámica de la temperatura máxima sobre el glaciar Ananea**

Se realizó el análisis estadístico de la variable temperatura máxima en el periodo (1985 -2022), para evaluar la relación entre dos variables cuantitativas mediante la regresión lineal para ajustar a una línea de tendencia (Gujarati y Porter, 2009). Así mismo, el propósito es determinar la influencia de la temperatura en la variación de la cobertura glaciar, obtener la tasa de cambio, la prueba estadística de coeficiente determinación ( $R^2$ ), correlación de Pearson y modelo de regresión lineal simple.

En la Figura 27 se traza la línea de tendencia entre los variables mencionadas, dividiendo en dos periodos de temperatura máxima, por motivos de la intensa actividad del fenómeno de El Niño ocurridos en el periodo 1997 y 1998, tal como lo plantea Díaz *et al.* (2017), en la investigación sobre el Análisis multitemporal entre 1975 y 2015 sobre cambios de la cobertura glaciar en los nevados Allin Capac y Chichi Capac.

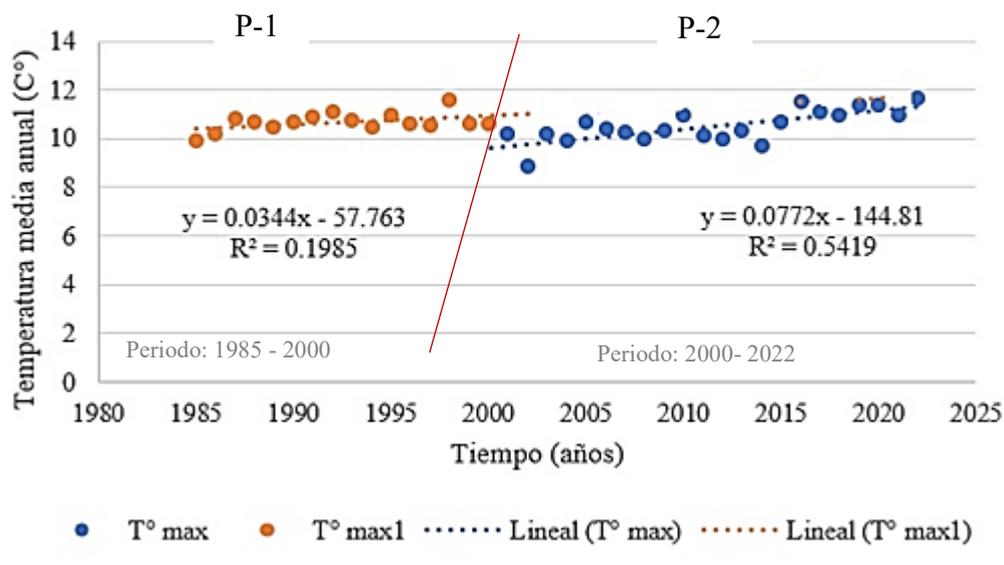


Figura 27. Variación multitemporal de la temperatura máxima, Ananea – 2022.

Según la Figura 27, el periodo 1 (P-1) tiene un coeficiente de determinación ( $R^2$ ) igual a 19.85% y el periodo 2 (P-2) es superior con 54.19%, por ende, explica la variabilidad de la variable respuesta, así como define Kutner *et al.* (1989) que el coeficiente de determinación ( $R^2$ ) es una medida estadística que representa la proporción de la variabilidad total de la variable dependiente (Y) que es explicada por el modelo de regresión lineal, donde el valor de ( $R^2$ ) puede variar entre 0 y 1, en el cual 0 significa que el modelo no explica nada de la variabilidad de la variable dependiente, y 1 significa que el modelo explica toda la variabilidad. Por lo tanto, el periodo 1 es explicado por los años con mayor presencia de eventos El Niño (periodo 1980 a 1999), donde este fenómeno muestra una tendencia estadísticamente significativa ( $\alpha < 0.05$ ) (Diaz *et al.*, 2017). El periodo 2 (baja a moderada actividad del fenómeno El Niño) tiene una mejor calidad de la bondad de ajuste para evaluar el nivel de significancia de la variable temperatura.

Se efectuó correlación de Pearson que implica una relación estadística entre las variables de temperatura y área de glaciar con respecto a la variable tiempo (año), considerando el periodo 2000 a 2022 (P-2) por que tiene un coeficiente de determinación ( $R^2$ ) igual 0.5419 que indica mayor bondad de ajuste al modelo.

Tabla 16

*Matriz de correlación de Pearson del área de glaciación Ananea y temperatura máxima (2000-2022)*

Variables	Área (km <sup>2</sup> )	Temperatura máx.	Año
Área (km <sup>2</sup> )	1	0.73	-0.98
Temperatura máx.	0.73	1	0.68
Año	-0.98	0.68	1

En la Tabla 16, se aplicó la prueba estadística de correlación lineal de Pearson, para obtener la relación entre dos variables (Gujarati y Porter, 2009). Donde el grado de correlación entre temperatura máxima y área de glaciación es positiva considerable de relación directa ( $r = 0.73$ ) según la escala de variación de la correlación de Hernández et al, (2006), y se interpreta que la temperatura máxima tiene una influencia fuerte en la variación del área glaciación del nevado Ananea. Así mismo según la Figura 27 el coeficiente de determinación ( $R^2$ ) es 54 % que, valida el modelo de regresión lineal, sin embargo, el 46 % está explicado por otros factores como los episodios El Niño, actividad minera local y otros, dicho esto se estima la tasa de cambio de 0.08 °C/año (Figura 27), considerando el análisis de varianza de regresión los datos mostraron una tendencia significativa con  $P$ valor < 0.05 (Tabla 17). Así mismo en la Figura 28 se muestra la influencia de la temperatura máxima (°C) en la variación de la cobertura glaciación.

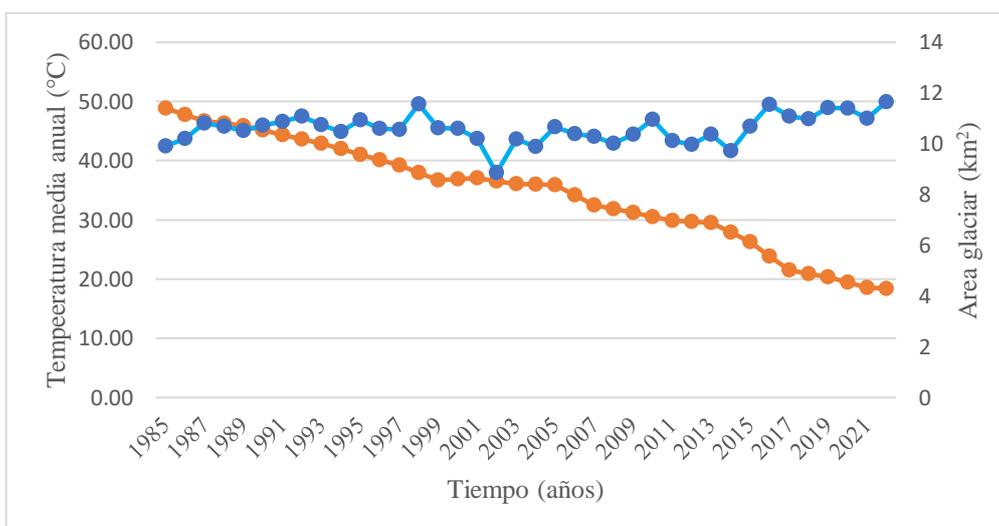


Figura 28. Influencia de la temperatura en el área glaciación, Ananea 1985 – 2022.

Se determina la influencia de la temperatura máxima sobre la variación de la cobertura glaciaria de Ananea, por consiguiente, se realizó análisis de varianza de la regresión lineal y nivel de significancia del modelo planteado

Tabla 17

*El análisis de varianza de la regresión, periodo (2001 - 2022)*

Estadísticas de la regresión	
Coefficiente de correlación	0.736
Coefficiente de determinación R <sup>2</sup>	0.542
R <sup>2</sup> ajustado	0.519
Error típico	0.472
Observaciones	22

En la Tabla 17, el coeficiente de determinación es 54.2 % y la desviación estándar es 0.47, donde se interpreta que la temperatura de la muestra se desvía en promedio 0.47 °C respecto a media (10.53 °C) y el P valor es igual a 0.000094 que indica nivel de significancia alta.

Tabla 18

*Modelo de regresión lineal de la temperatura, Ananea 2001 – 2022.*

	Estimación	Error Std.	Tvalor	Pvalor	Nivel signif.
Intercepto (β <sub>0</sub> )	-144.81	31.937	-4.531	0.000204	***
Tiempo	0.0772	0.0159	4.860	9.48e-05	***

$$Y = 0.08X - 144.81 \quad \text{Ec. (6)}$$

Donde: Y : variable dependiente, temperatura.

X: Variable independiente, tiempo de predicción.

Según la Tabla 18, el intercepto (β<sub>0</sub>) y la variable independiente tiempo es altamente significativo, por lo cual según la ecuación de regresión la temperatura aumenta 0.08 cada año (°C/año).

### 4.2.3. Dinámica de la temperatura mínima sobre el glaciar Ananea

Se realizó el análisis estadístico de la variable temperatura mínima en el periodo (1985 -2022), con el propósito de ver la relación entre dos variables cuantitativas mediante la regresión lineal para ajustar a una línea de tendencia (Gujarati y Porter, 2009), primero se realizó el análisis de R cuadrado ( $R^2$ ) en el periodo (1985 a 2022), ver gráfico 29.

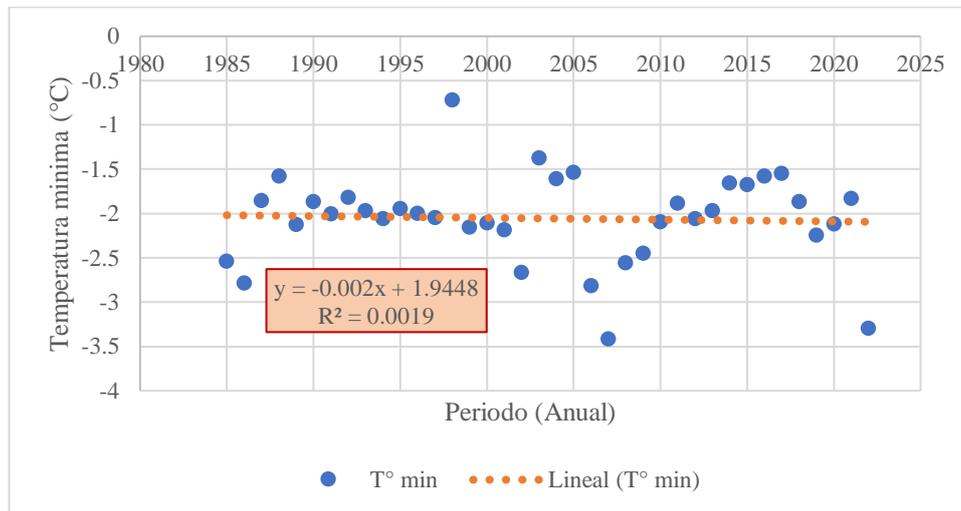


Figura 29. Dinámica temporal de la temperatura mínima, periodo 1985 a 2022

En la Figura 29, se observa la dispersión de puntos y la línea de tendencia de la temperatura mínima, donde en el periodo 1985 a 2022 el R cuadrado ( $R^2$ ) es 0.0019 que según la definición de Kutner *et al.*, (1989), el presente modelo no explica la variabilidad de la variable respuesta, donde la bondad de ajuste es casi 0 y con respecto al modelo no tiene validez.

Así mismo, considerando los periodos de mayor intensidad del fenómeno El Niño y la influencia en este parámetro es estadísticamente significativo, tal como indica Díaz *et al.*, (2017), donde los datos de temperatura del aire durante los años con mayor presencia de eventos El Niño (periodo 1980 a 1999), muestran una tendencia estadísticamente significativa ( $\alpha < 0.05$ ). la cual genera irregularidades en el ciclo metrológico y forjando la línea de tendencia (Figura 29), donde se realizó el análisis temporal de la temperatura mínima en el periodo 2000 a 2022 obteniendo el siguiente resultado:

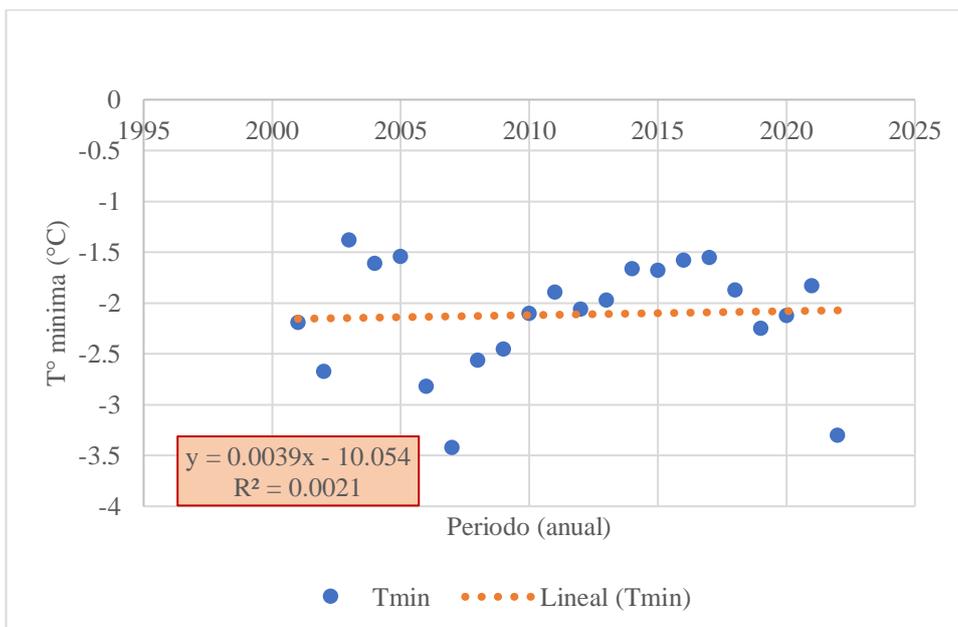


Figura 30. Dinámica temporal de la temperatura mínima, periodo 2000 a 2022

En la Figura 30, se observa la dispersión de puntos y la línea de tendencia de la temperatura mínima en el periodo 2000 a 2022, donde el R cuadrado ( $R^2$ ) es 0.0021 que sigue siendo un valor malísimo porque no valida al modelo y no explica la variabilidad de la variable dependiente (temperatura mínima). los valores mayores 70% tienen mayor probabilidad de validar el modelo (Kutner *et al.*, (1989).

De igual forma, se realizó el análisis de correlación de Pearson para determinar la relación lineal entre dos variables (Gujarati y Porter, 2009) obteniendo el siguiente resultado:

Tabla 19

Matriz de correlación de Pearson del área de glaciación Ananea y temperatura mínima (2001-2022)

Variables	Área (km <sup>2</sup> )	Temperatura min.	Año
Área (km <sup>2</sup> )	1	-0.024	-0.98
Temperatura min.	-0.024	1	0.046
Año	-0.98	0.046	1

Según la Tabla 19, considerando la clasificación de correlación de Hernández *et al.*, (2006), existe correlación negativa muy débil entre la temperatura mínima y la cobertura glaciaria del nevado de Ananea, que muestra la influencia casi nula de la temperatura mínima sobre la variación del glaciar Ananea.

Otra variable importante a analizar es la actividad minera en la desglaciación del nevado de Ananea. En el análisis estadístico de la variable actividad minera, solo se consideró la actividad minera formal, por la inexistencia de información de la gran cantidad de minas informales en el área de investigación. Esta actividad minera se ubica en las faldas del nevado de Ananea, en el extremo Oriente se encuentra la mina Cori Puno S.A.C y en el lado Occidente se ubica la mina Corporación Minera Ananea S.A. se efectuó la relación de la producción minera acumulada anual de las dos unidades mineras mencionadas con el periodo (2001 a 2022), obteniendo el siguiente resultado:

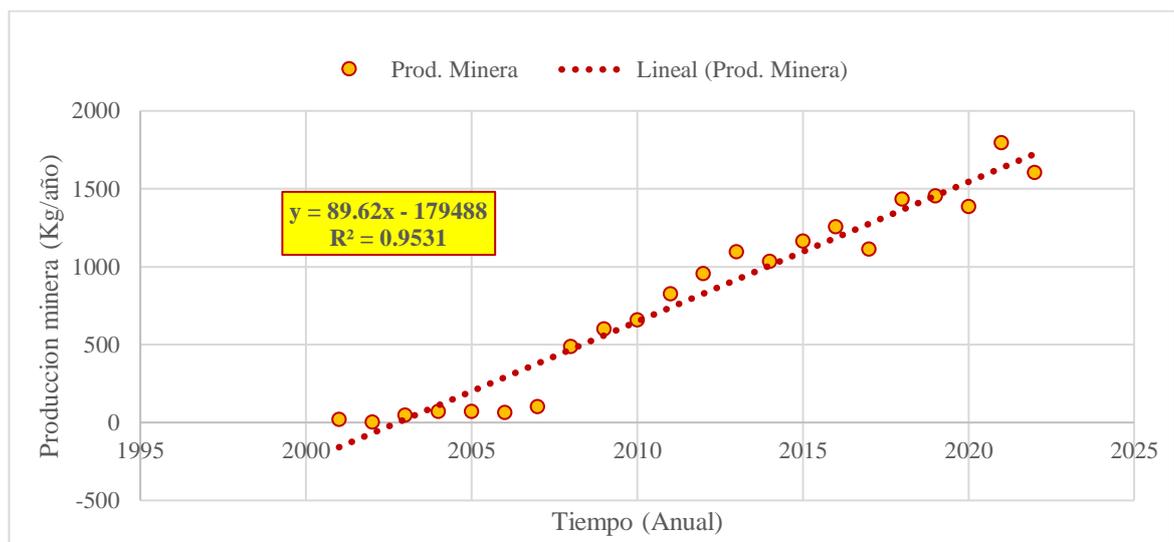


Figura 31. Variación de la producción minera en el periodo (2001 a 2022)

Fuente: MINEN, 2022.

Según MINEM (2022), la producción minera acumulada anual (kg/año) tiene una línea de tendencia positiva, en el año 2001 tuvieron una producción de 18 kilogramos de concentrado de oro con crecimiento positivo para los años siguientes, en este sentido para el año 2022 alcanzaron a producir un promedio de 1700 kg de concentrado de oro; por lo tanto, estos niveles de crecimiento en la producción son los efectos del incremento considerado en temas logísticos, tecnología así como los equipos mineros, mayor quema de combustible fósil, mayor capacidad de producción de las plantas

metalúrgicas, la cual todo esto estarían generando influencia en la variación de la cobertura glaciaria del nevado de Ananea. Según la Figura 31, tiene un coeficiente de determinación ( $R^2$ ) igual 95.31% la cual es muy bueno y valida el modelo de regresión lineal. Sin embargo, por el ciclo de vida de las minas, las reservas mineras no renovables, el cierre de mina en un futuro próximo se tendría que ajustar el modelo. De acuerdo a lo mencionado fue indispensable realizar la correlación de Pearson que se detalla a continuación:

Tabla 20

*Matriz de correlación de Pearson del área de glaciaria Ananea y producción minera (2001-2022)*

<b>Variab</b>	<b>Área (km<sup>2</sup>)</b>	<b>Prod. minera</b>	<b>Año</b>
<b>Área (km<sup>2</sup>)</b>	1	-0.95	-0.98
<b>Prod. minera</b>	-0.95	1	0.98
<b>Año</b>	-0.98	0.98	1

Según la Tabla 20, la correlación entre las variables producción minera y área glaciaria es negativa muy fuerte (-0.95) y con respecto al tiempo (anual) es positiva perfecta (0.98). por lo tanto, se tiene tres variables con correlación muy alta y para generar un modelo de regresión lineal múltiple se tendría que excluir una de variables por presencia de multicolinealidad.

En resumen, la actividad minera influye en la desglaciación del nevado de Ananea puntualmente, por el tiempo de explotación que perdura la mina, además se considera los pasivos ambientales que genera, modificación de la superficie de terreno, perturbación en la dirección del viento etc.

#### **4.3. Estimación de los futuros escenarios sobre el comportamiento glaciario**

De acuerdo con el Informe del Panel Intergubernamental sobre el Cambio Climático (IPCC, 2014), llevaron a cabo un análisis estadístico y emplearon un modelo de regresión lineal basado en datos meteorológicos históricos. Esta investigación reconoció la relevancia de esta aproximación en términos de la predicción del clima y la consideración de los patrones futuros, especialmente en un contexto de creciente preocupación por el

medio ambiente y el cambio climático. Por lo tanto, este estudio en particular se centró en proyectar datos hacia posibles escenarios futuros a través de un modelo de regresión lineal múltiple.

#### 4.3.1. Estadística descriptiva

Tabla 21

*Estadística descriptiva del área del glaciar Ananea y variables independientes, Ananea – 2022.*

	N	Media	Desviación estándar	Min	Max	Rango	Curtosis
T° Mínima (°C)	23	2011.00	6.78	2000	2022	22	-1.36
T° Máxima (°C)	23	-2.11	0.55	-3.42	-1.38	2.04	-0.08
Precipitación (mm/año)	23	10.54	0.67	8.85	11.65	2.8	-0.16
Área Glaciar (Km <sup>2</sup> )	23	646.05	79.23	472.1	771.4	299.3	-0.76
Prod. Minera (Kg/año)	23	28.92	6.51	18.41	37.04	18.63	-1.41
Ep. El Niño	23	749.56	603.84	2.89	1793.81	1790.92	-1.55

#### 4.3.2. Análisis de correlación de variables

Se realizó la correlación por método de Pearson para obtener la significancia de la relación de las variables y el coeficiente de correlación. Donde se efectuó la matriz de correlación de 7 \* 7 factores (Tabla 22). Los variables independientes son: tiempo (A), temperatura máxima (TMA), temperatura mínima (TMI), precipitación (PP), episodio El Niño (NI) y actividad minera (MI) en función de la variable dependiente, que es el área de la cobertura glaciar Ananea (AGLA).

Tabla 22

Matriz de correlación de Pearson de las variables área glaciar, temperatura, precipitación y actividad minera, Ananea – 2022.

Variables	Tiempo	T° mínima	T° máxima	Precipitación	Área glaciar	Act. mina	Ep. El Niño
<b>Tiempo</b>	1	0.046	0.74	0.14	-0.98	0.98	-0.35
<b>T° mínima</b>	0.046	1	0.046	0.51	-0.024	0.13	- 0.047
<b>T° máxima</b>	0.74	0.046	1	-0.071	-0.76	0.67	-0.08
<b>Precipitación</b>	0.14	0.51	-0.071	1	-0.18	0.16	-0.17
<b>Área glaciar</b>	-0.98	-0.024	-0.76	-0.18	1	-0.95	0.35
<b>Act. mina</b>	0.98	0.13	0.67	0.16	-0.95	1	-0.36
<b>Ep. EL Niño</b>	-0.35	-0.047	-0.08	-0.17	0.35	-0.36	1
<b>Resumen</b>							
<b>Años</b>							
<b>T° mínima</b>	0.046						
<b>T° máxima</b>	0.74***	0.046					
<b>Precipitación</b>	0.14	0.51*	-0.071				
<b>Área glaciar</b>	- 0.98*****	-0.024	- 0.76*****	-0.18			
<b>Act. mina</b>	0.98***	0.13	0.67*	0.16	-0.95**		
<b>Ep. El Niño</b>	-0.35	-0.047	-0.08	-0.17	0.35	-0.36	

Según la categorización (Hernández *et al.*, 2006), la variable área del glaciar con respecto a las variables: tiempo (años) y actividad minera (MI), tienen una correlación negativa muy alta (-0.98 y -0.95) y el que le sigue es la variable temperatura máxima (TMA) con un valor de -0.74 de correlación, las demás variables tienen una correlación baja con respecto a la variable área del glaciar. Por otro lado, es importante resaltar que existe una correlación positiva muy alta entre los variables independientes tiempo y actividad minera que exige analizar más a detalle por la existencia de la multicolinealidad.

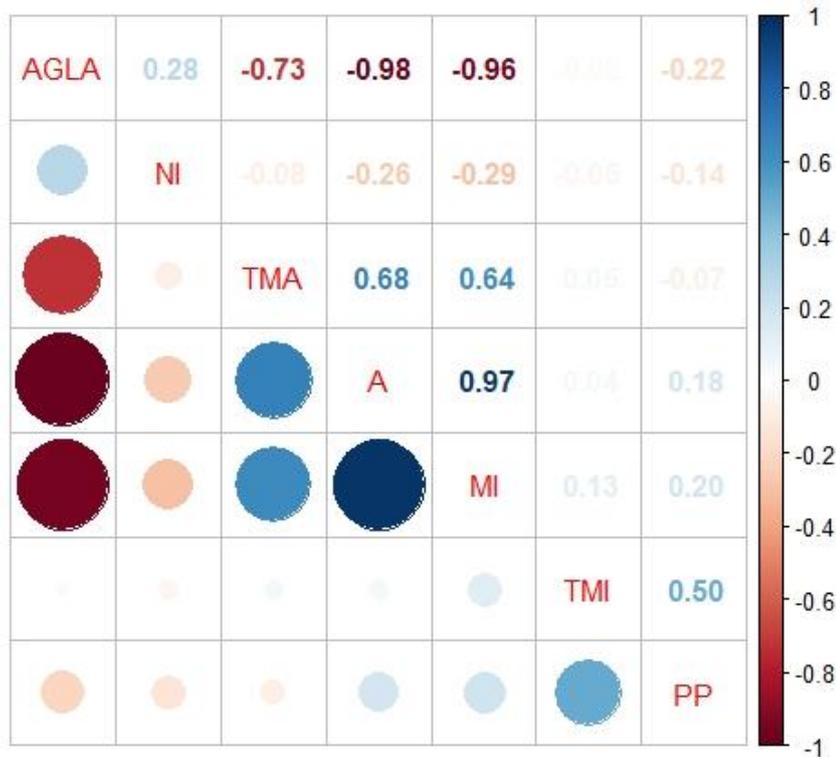


Figura 32. Correlación entre múltiples variables, Ananea – 2022.

### 4.3.3. Modelo de regresión lineal múltiple

Un modelo de regresión lineal múltiple es una técnica estadística que busca establecer una relación lineal entre una variable dependiente y dos o más variables independientes (Montgomery *et al.*, 2012). Para estimar el modelo de regresión lineal múltiple se aplicó el método de mínimos cuadrados para el cálculo de los coeficientes de regresión lineal ( $\beta_0$ ). Las siguientes variables independientes son: tiempo (A), temperatura máxima (TMA), temperatura mínima (TMI), precipitación (PP) y actividad minera (MI) en función de la variable dependiente, área de la cobertura glaciaria (AGLA). Cabe mencionar que este procedimiento se realizó analíticamente mediante el uso de paquetes estadísticos como Rstudio y por la existencia de multicolinealidad entre tiempo (A) y actividad minera (MI) se retiró este último del modelo inicial porque la multicolinealidad puede provocar algunas complicaciones en el análisis y la interpretación del modelo. así como indica Belsley *et al.*, (1980).

Planteamiento el modelo inicial:

$$AGLA \sim A + TMI + TMA + PP$$

Tabla 23

*Modelo inicial de regresión lineal múltiple, Ananea – 2022.*

	Estimación	Desviación Std.	Tvalor	Pvalor	Nivel significancia
(Intercepto)	1714.00	93.77	18.278	4.53e-13	***
Tiempo (años)	-0.826	0.049	- 16.888	1.75e-12	***
T° máxima (°C)	-1.488	0.493	-3.019	0.00737	**
T° mínima (°C)	-0.910	0.489	1.860	0.07930	
Precipitación	-0.907	0.004	-2.538	0.02060	*
Error estándar residual	1.065				
R <sup>2</sup> ajustado	0.9732				
P valor	1.14e-14				

**Código de significación: 0 ‘\*\*\*’ 0.001 ‘\*\*’ 0.01 ‘\*’ 0.05 ‘.’ 0.1 ‘ ’ 1**

El error estándar residual es 1.065 que indica la dispersión promedio de los residuos alrededor de la línea de regresión. El R<sup>2</sup> ajustado del modelo es 0.9732 que significa que el 97.32% de la variabilidad de la variable dependiente puede explicarse por las variables independientes incluidas en el modelo y por último el valor P es 1.14e-14, lo que indica que es extremadamente pequeño y sugiere que las variables independientes incluidas en el modelo son altamente significativas para predecir la variable dependiente.

En general, esta interpretación sugiere que el modelo de regresión lineal tiene muy buen ajuste a los datos y que las variables independientes incluidas en el modelo son altamente significativas para explicar la variabilidad en la variable dependiente (AGLA).

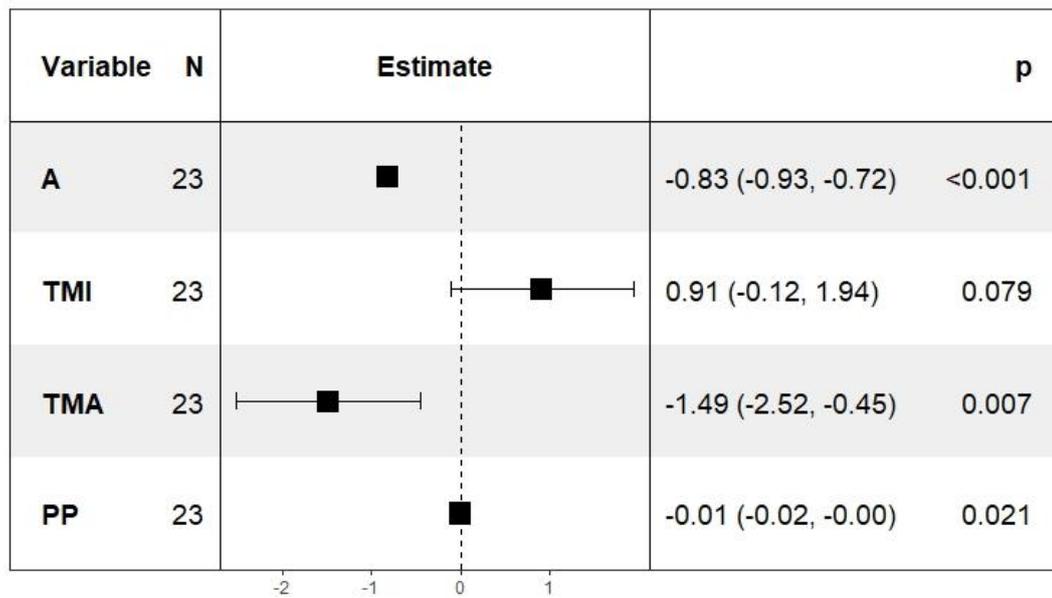


Figura 33. Diagrama de cajas y bigotes sobre la significancia de las variables, 2022.

Desplegando los variables independientes se observa que la variable temperatura mínima (TMI) no es significativo ( $TMI > 0.05$ ) y la variable precipitación (PP) es medianamente significativo ( $\alpha = 0.02$ ), pero se observa traslapando la línea divisoria que indica cierta incertidumbre sobre su aporte al modelo, la cual es necesario realizar algunas pruebas estadísticas (Figura 33).

#### 4.3.4. Verificación de multicolinealidad

Para la verificación de multicolinealidad se realiza solo con las variables independientes (variables predictoras) excluyendo la variable Área de glaciación (AGLA) que es la variable respuesta, por lo tanto, en la Tabla 24 no se observa correlación alta la cual significa que no hay multicolinealidad, sin embargo, es importante realizar la prueba de factor de Inflación de la Varianza (VIF).

Tabla 24

*Matriz de correlación de variables independientes*

	TMI	TMA	PP	A
TMI	1	0.04608	0.5007963	0.042613
TMA	0.04608	1	-0.074271	0.67955
PP	0.5007963	-0.074271	1	0.1827959
A	0.042613	0.67955	0.1827959	1

Según O'Brien (1979), el factor de Inflación de Varianza (VIF) es una medida estadística utilizada para detectar la presencia de multicolinealidad en un modelo de regresión lineal, la multicolinealidad se refiere a la alta correlación entre dos o más variables independientes en un modelo, lo que puede afectar negativamente la interpretación de los resultados.

El VIF tiene un rango mínimo de 1, que indica que no hay multicolinealidad (es decir, no hay correlación entre las variables predictoras), cuanto mayor es el VIF, mayor es la multicolinealidad. Un VIF superior a 5 generalmente se considera preocupante y sugiere la presencia de una alta correlación entre las variables predictoras (Belsley *et al.*, 1980).

Tabla 25

*Factor de inflación de varianza (VIF)*

	A	TMI	TMA	PP
VIF	2.1363875	1.3916657	2.0890342	1.5540703
Calificación	False	False	False	False

En la Tabla 25, el VIF de todos los variables analizados tienen calificación falsa (VIF < 5), que significa que no hay multicolinealidad en el modelo.

#### 4.3.5. Estimación del modelo final

Se efectuó la estimación del modelo final mediante el proceso de selección de STEPWISE que fue planteado por Draper y Smith (1998), que es una técnica utilizada

en regresión múltiple para seleccionar de manera automática las variables independientes más relevantes que deben incluirse en el modelo. Para este proceso de selección se realizó en base a ciertos criterios estadísticos como la verificación de análisis de varianza (ANOVA), el valor P, el coeficiente de determinación ( $R^2$ ) ajustado y el VIF contraste, donde las variables temperatura mínima (TMI) y precipitación (PP) no fueron seleccionados por ser considerados no significativos.

Modelo final = Lm (AGLA~ A+TMA, data = data1)

Tabla 26

*Análisis de varianza del modelo final, Ananea – 2022.*

	<b>Grados de libertad</b>	<b>Suma de cuadrados</b>	<b>Promedio de cuadrados</b>	<b>F valor</b>	<b>Pr(&gt;F)</b>
Tiempo (años)	1	897.40206	897.40206	637.96635	1.20E-16
T° máxima (°C)	1	5.9656301	5.9656301	4.2409878	0.0527171
Residuales	20	28.13321	1.4066605		

En la Tabla 26, las variables seleccionadas son significativos, sin embargo, se debe realizar el análisis del VIF.

Tabla 27

*Factor de inflación de varianza del modelo final*

<b>Factor</b>	<b>Tiempo</b>	<b>T° máxima</b>
VIF	1.858	1.858

En la Tabla 27, las variables seleccionadas tienen el VIF = 1.858 que indica la ausencia de multicolinealidad, la cual es un valor bueno ( $VIF < 5$ ) y da confianza a los resultados.

Después de realizar algunos análisis previos, se procede a plantear los parámetros de los coeficientes de regresión lineal múltiple ( $\beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \epsilon_i$ ), formando el modelo final.

Tabla 28

*Estimación del modelo final, Ananea 2022*

	<b>Estimación</b>	<b>Error Std.</b>	<b>Tvalor</b>	<b>Pvalor</b>	<b>Nivel signif.</b>
Intercepto ( $\beta_0$ )	1790.85623	98.5710	18.168	6.70e-14	***
Tiempo (años)	-0.87056	0.0508	- 17.131	2.03e-13	***
T° máxima (°C)	-1.06657	0.5179	-2.059	0.052	*
Error estándar residual	1.186				
R <sup>2</sup> ajustado	0.9668				
P valor	6.315e-16				

El error estándar residual de 1.065 indica la dispersión promedio de los residuos alrededor de la línea de regresión. El coeficiente de determinación ( $R^2$ ) ajustado del modelo final es 0.9668 que significa que el 96.68% es explicado por la variable independientes tiempo y temperatura máxima sobre la variación de la cobertura del glaciar Ananea. y por último el valor P del modelo es 6.315e-16, lo que sugiere que las variables independientes incluidas en el modelo son altamente significativas para predecir la variable dependiente. En general, esta interpretación sugiere que el modelo final de la regresión lineal múltiple tiene un ajuste muy bueno a los datos y que las variables independientes incluidas en el modelo son altamente significativas para explicar la variabilidad en la variable dependiente (área de glaciar).

Tabla 29

*Modelo final de regresión lineal múltiple, Ananea - 2022*

<b>Regresión lineal múltiple</b>	<b>Área glaciar (km<sup>2</sup>) = 1790.86 – 0.87(Tiempo) – 1.07 (T° máxima)</b>
----------------------------------	--

De acuerdo al modelo final (Tabla 29) se puede decir que por cada año se pierde 0.87 km<sup>2</sup> de cobertura glaciar y por cada menos un grado de temperatura (-1 °C) se pierde 1.07 km<sup>2</sup> de cobertura glaciar del nevado de Ananea. Por lo tanto, según el modelo de regresión lineal múltiple el glaciar Ananea se extinguirá en el año 2056, que es

congruente con el estudio realizado por Molano *et al.*, (2022), aunque dicha estimación fue mediante el modelo de regresión lineal simple donde indica la extinción de la Sierra Nevada del Cocuy será en el año 2048.

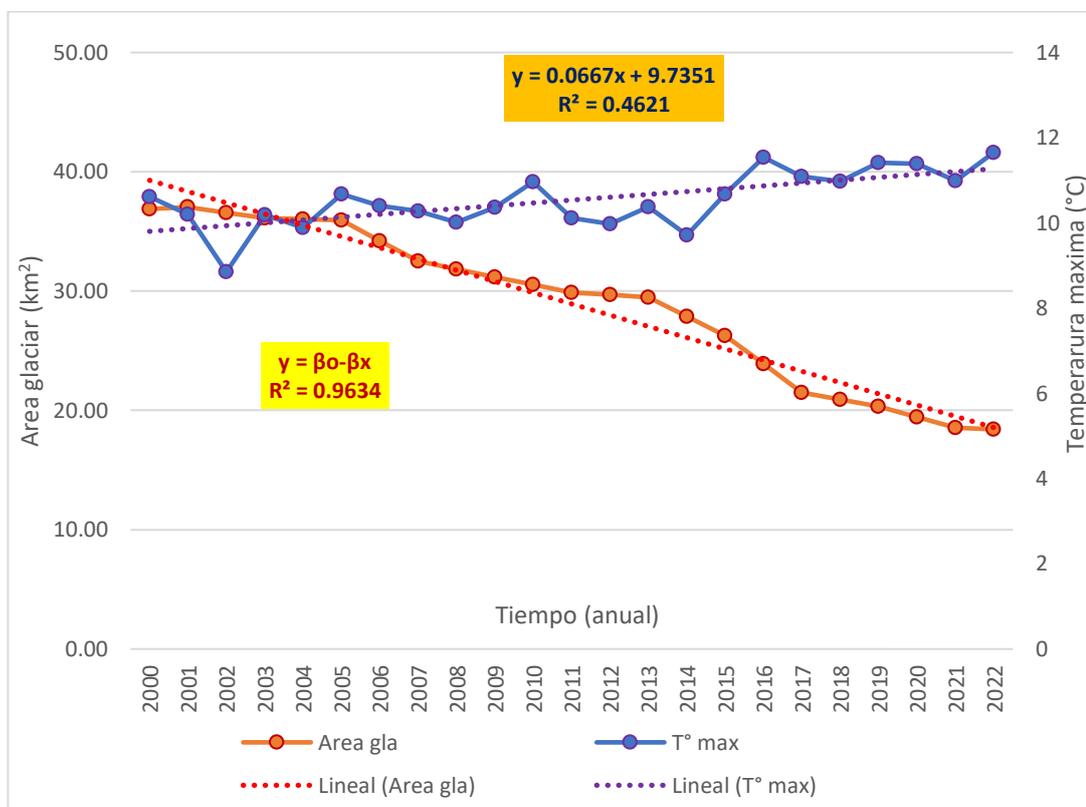


Figura 34. Dinámica temporal de la cobertura glaciar y T° máxima, Ananea – 2022.

En la Figura 34, se muestra el resultado del modelo final estimado y la relación proporcionalmente inversa entre los parámetros de área de cobertura glaciar y la temperatura máxima en el periodo (2000 a 2022).

#### 4.3.6. Validación del modelo

La validación del modelo se realizó efectuando el análisis de errores residuales, la prueba de normalidad, la homogeneidad de varianzas e independencia de datos.

##### 4.3.6.1. Análisis de los errores residuales

Para validar la regresión lineal múltiple, primero se efectuó el cálculo de los errores residuales, que son las diferencias entre los valores observados y los valores predichos por el modelo de regresión lineal. Según la propiedad la esperanza de errores es igual a cero ( $E_{(e_i)}=0$ ), según la suma de errores residuales

es  $-2.38698e-15$ , la cual es una cifra muy cercana a cero e indican desviación casi nula de la línea de regresión, además el valor positivo significa que la estimación fue menor que el valor real. En fin, los residuos son muy pequeños y se distribuyen aleatoriamente alrededor de cero, indica que el modelo de regresión se ajusta bien a los datos.

Tabla 30

*Lista de errores residuales de valores observados y predichos*

1	2	3	4	5	6
-1.5573124	-0.9440435	-1.9833477	-0.1435866	0.3270047	1.9494882
7	8	9	10	11	12
0.8020765	-0.1753502	-0.2527620	0.3410978	1.2015993	0.5262443
13	14	15	16	17	18
1.0474863	2.1340087	0.7006358	0.9957671	0.3935761	-1.6158177
19	20	21	22	23	
-1.4432445	-0.6733937	-0.7141637	-1.1702292	0.2542664	

En la siguiente parte se realizó un histograma de errores, donde la curva debe asemejarse a una distribución normal o conocido como la campana de Gauss, en la Figura 35 simula más o menos una distribución normal que indica buen ajuste del modelo de regresión lineal.

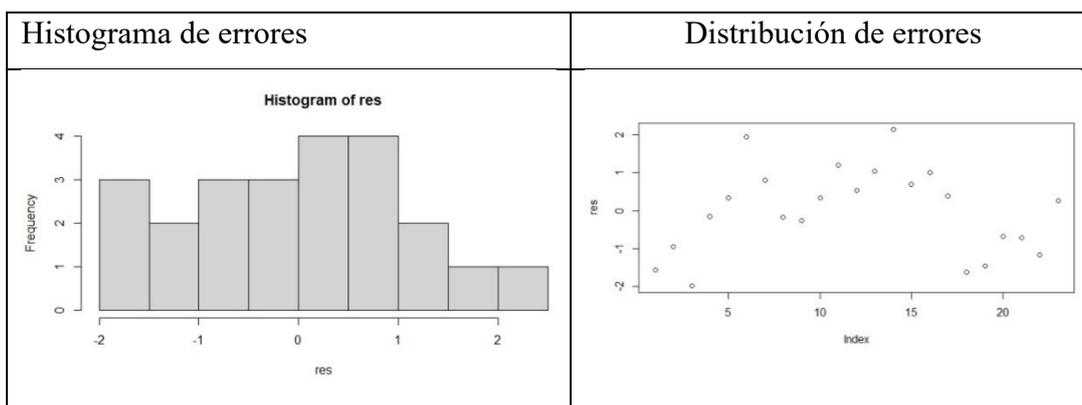


Figura 35. Histograma y distribución de errores

En cuanto a la linealidad de los errores también es cercano a cero ( $-1.038371e-16$ ) la cual indica buen ajuste, y la distribución de errores no genera patrones la cual es bueno (Figura 35), así mismo se tiene la linealidad de la variable área glaciar que se ajusta bien a la línea de tendencia (Figura 36).

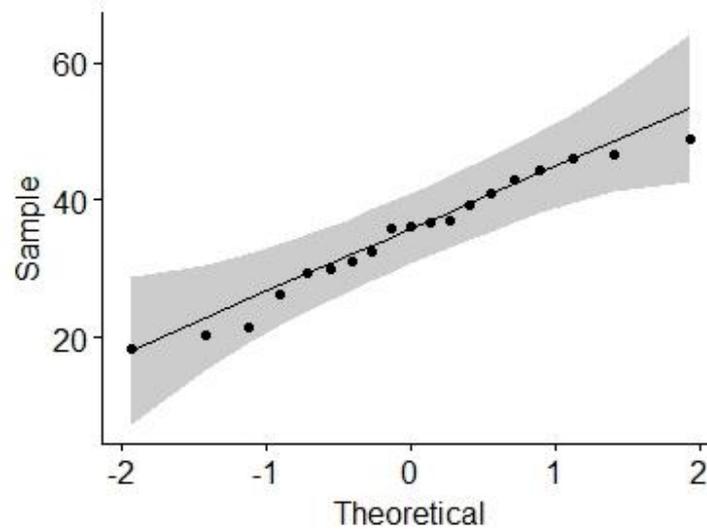


Figura 36. Linealidad de la cobertura glaciár

#### 4.3.6.2. Prueba de verificación de normalidad

La prueba de verificación de normalidad en regresión lineal se utiliza para evaluar si los errores residuales en un modelo de regresión lineal siguen una distribución normal, donde se busca un Valor P mayor que el nivel de significancia establecido para concluir que los errores residuales siguen una distribución normal. Si el Valor P es menor que el nivel de significancia, se concluye que los errores no siguen una distribución normal y se deben considerar enfoques alternativos.

Tabla 31.

##### *Prueba de normalidad*

Prueba	Data residual	P-valor
Shapiro-Wilk	W = 0.973	0.7662
Kolmogorov - Smirnov	D = 0.1107	0.6577
Jarque - Bera	JB= 0.6053	0.7388
Anderson - Darling	A= 0.2186	0.8169

En la prueba de normalidad de datos (Tabla 31), el P valor es mayor al alfa ( $\alpha = 0.05$ ) la cual significa que los errores se distribuyen en forma normal.

#### 4.3.6.3. Prueba la homogeneidad de varianza

La prueba homogeneidad de varianza se realizó para evaluar si los errores residuales en un modelo de regresión lineal tienen una varianza constante en todas las combinaciones de los valores de las variables predictoras. Esto es importante porque la regresión lineal múltiple asume que los errores tienen una varianza constante, también conocida como homocedasticidad.

Tabla 32

*Homogeneidad de varianza*

Chi cuadrado	Grados de libertad	P valor
0.3432328	1	0.55797

Según la Tabla 32, el Valor  $P > 0.05$  ( $P_{\text{valor}} = 0.558$ ) donde se acepta la hipótesis nula ( $H_0$ ), porque los errores residuales tienen una varianza constante. Es decir, no hay heterocedasticidad y proporciona mayor confianza en los resultados del modelo de regresión lineal. Aplicando el test de Breusch-Pagan con valor  $P = 0.6848$  que reafirma que no hay suficiente evidencia para afirmar que exista heterocedasticidad en los residuos del modelo de regresión.

Tabla 33

*Test de Breusch-Pagan (BP)*

BP	Grados de libertad	P valor
0.75722	2	0.6848

Para la parte de independencia de los errores en el modelo de regresión, se usó el test de Durbin-Watson que es una prueba utilizada en la validación de modelos de regresión lineal para evaluar la presencia de autocorrelación en los residuos del modelo. La autocorrelación se refiere a la correlación entre los residuos de un modelo de regresión en diferentes puntos de tiempo. El objetivo del test de Durbin-Watson es detectar esta autocorrelación en los residuos y proporcionar una indicación de la posible violación del supuesto de independencia de los errores en el modelo de regresión.

Tabla 34

*Test de Durbin-Watson (DW)*

<b>Autocorrelación DW</b>	<b>Estadístico</b>	<b>P valor</b>
0.5580422	0.7954125	0.00

De acuerdo al Test Durbin Watson (Tabla 34) existe ausencia de autocorrelación en los residuos. En otras palabras, se concluye que no existe autocorrelación en los residuos del modelo de regresión.

## DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS

En la presente investigación sobre los cambios de la cobertura glaciaria del nevado Ananea en el periodo (1985 a 2022), muestra una pérdida del 62.32% en los últimos 37 años con respecto a su área inicial de 48.87 km<sup>2</sup> en el año 1985, en efecto se estima una disminución promedio del 16.84% por década y una tasa promedio de cambio anual 4.95%. realizó la correlación y regresión lineal con resultado altamente significativo ( $R^2 = 98\%$ ). Que coincide con la investigación de Díaz *et al.*, (2017), sobre los estudios de los nevados Allin Capac y Chichi Cápac periodo entre 1975 y 2015 con una pérdida total de 35.6 km<sup>2</sup> de superficie glaciaria, esta reducción equivale al 67% de la cobertura inicial. Así mismo, coinciden los estudios de Silverio (2018), estima la pérdida el 62% de su cobertura glaciaria, pasando de 123 km<sup>2</sup> en 1955 a 47 km en 2010, sobre el estudio del nevado Coropuna. Sin embargo, el trabajo de Cuadros (2014) no coincide porque estima una pérdida del 24.41% de la cobertura inicial en el periodo (1985 a 2010), aunque para este periodo realizando la proyección de datos alcanzaría un promedio de 30% de pérdida de la cobertura glaciaria. Del mismo modo no coinciden los trabajos de Molano *et al.*, (2022) y Ramos (2018), el primero obtuvo una pérdida del 37.92% de su cobertura en los últimos 34 años y el segundo asevero una disminución del 19.4% de la cobertura glaciaria del nevado Coropuna, periodo (1975 a 2015). Estos últimos obtienen la disminución de la superficie glaciaria muy baja, probablemente les falto considerar otros factores de impacto ambiental.

Con respecto al modelo de regresión lineal simple ( $Y = 1642 - 0.80X$ ) planteado en el presente trabajo, se contrasta con el trabajo realizado por Barzyckaa *et al.*, (2020) con correlación de ( $r = 0.94$ ,  $R^2 = 0,94$ ) para Firmasar, planteando el modelo de regresión lineal ( $Y = 10,304X + 15,693$ ), donde el área Firmasar debe disminuir aprox. 6 km<sup>2</sup> (es decir, más del 50% de su superficie. Del mismo modo Huancani (2021), corrobora el modelo planteando la regresión de área (ha) por años ( $Y = 6,536X + 13307,726$ ) con coeficiente de determinación baja ( $R^2=0,391$ ). Cabe señalar que estos modelos cumplen con la función de proyectar la variable respuesta hacia el futuro.

## CONCLUSIONES

El análisis multitemporal sobre cambios de la cobertura glaciar de Ananea en el periodo (1985 a 2022), muestra una pérdida considerable del 62.32% en los últimos 37 años con respecto a su área inicial de 48.87 km<sup>2</sup> en el año 1985, mientras que para el año 2022 la superficie ha disminuido a 18.26 km<sup>2</sup>, en efecto se estima una disminución promedio del 16.84% por década y una tasa promedio de cambio anual 4.95%. Del mismo modo se realizó la correlación y regresión lineal entre las variables tiempo y área glaciar con resultado altamente significativo.

La influencia del comportamiento histórico de las variables meteorológicas (periodo 1985 a 2022), como: precipitación, temperatura máxima y mínima sobre los cambios de la cobertura glaciar de Ananea es 0.22 y 0.73 y -0.024 respectivamente, por consiguiente, se valoró más la influencia de la temperatura máxima, por lo que se formó un modelo de regresión lineal simple con coeficiente de determinación del 54 % que valida el modelo; sin embargo, es importante considerar que el 46 % explica la influencia de otros factores como los episodios El Niño, actividad minera local y otros, dicho esto se estima la tasa de cambio de la temperatura máxima del 0.08 °C/año.

Los futuros escenarios sobre la cobertura glaciar son estimados por el modelo de regresión lineal múltiple que incorporó diversas variables independientes: el período (A), la temperatura máxima (TMA), la temperatura mínima (TMI), y la precipitación (PP), en relación a la variable dependiente, que es la cobertura glaciar Ananea (AGLA). Posteriormente, se determinó que las únicas variables consideradas significativas (P-valor < 0.05) son el período (A) y la temperatura máxima (TMA), mientras que las demás variables se excluyeron del modelo al considerarse no significativas y no contributivas al mismo. Pues bien, el modelo final planteado ( $\beta_0 + \beta_1X_1 + \beta_2X_2 + \epsilon_i$ ) fue validado por el análisis de errores residuales, la prueba de normalidad, la homogeneidad de varianza y la independencia de datos que respaldan al modelo final; que, en efecto, estima la decadencia de la cobertura glaciar de Ananea para el año 2056.



## RECOMENDACIONES

Se recomienda evaluar los cambios de la cobertura glaciar en todos los nevados de la región de Puno y determinar sus principales causas de desglaciación. Para lo cual, se necesitará la instalación de una red de estaciones meteorológicas especializadas con el propósito de monitorear el Nevado Ananea y otros nevados en la región. En este estudio se trabajó con datos de la estación más cercana que es la estación Ananea, ubicado a 15 km de distancia y se tiene otra estación a una distancia mucho mayor como la estación Cojata y Cuyocuyo. Sin embargo, se obtuvo los índices climáticos de los satélites que se dedican a monitorear el clima en todo el mundo. Por lo tanto, se recomienda implementar el monitoreo individual de los glaciares con el satélite PERUSAT-1, asimismo identificar puntos de interés para fines de estudios de percepción remota y sistemas de información geográfica.

Se recomienda determinar el grado de influencia de la actividad minera que está contribuyendo a la desglaciación de los nevados y las medidas de mitigación que podrían plantearse. Además, se recomienda realizar un estudio minucioso de la calidad del agua, suelo y aire; así como el estudio de impacto ambiental de las zonas periféricas al nevado de Ananea.

## BIBLIOGRAFÍA

- Ariza, A. (2013). Productos LDCM (Landsat Data Continuity Mission), Landsat 8. Instituto Geográfico Agustín Codazzi. Bogotá, Colombia. 9-10.
- ANA (Autoridad Nacional del Agua), 2014. Inventario nacional de glaciares y lagunas. Recuperado de: <http://www.ana.gob.pe/media/981508/glaciares>.
- Avila, E., Díaz, H., Guzmán, J. y Otálora, J. (2018). Revista de Topografía Azimut techniques. 1, 37-45.
- Barzyckaa B., Grabiecta G., Błaszczyka M., Ignatiukb D., Laskaa M., Hagenc J. y Jania J., (2020). Changes of glacier facies on Hornsund glaciers (Svalbard) during the decade 2007–2017. *Remote Sensing of Environment* 251.
- Belsley, D., Kuh, E., y Welsch, R. (1980). "Regression Diagnostics: Identifying Influential Data and Sources of Collinearity." New York.
- Box, G., Jenkins, G., Reinsel, G., y Ljung, G. (2015). Time series analysis: forecasting and control.
- Brian, M. y Barker, J. (1987). Quick Atmospheric Correction (QUAC).
- Campbell, J. y Wynne, R. (2014). Introduction to remote sensing (5th ed.). Guilford Press.
- CAN (Climate Action Network), 2014. Glaciares Andinos: La necesidad de una agenda transversal. Climate Action Network, pp. 27.
- Castillo, P. (2017). Factores ambientales de temperatura y precipitación que inciden en la dinámica de la montaña glaciar Pastoruri. S.l.: s.n.
- Chiew, F. y Siriwardena, L. (2005). *TREND – User Guide*. Catchment Modellingtoolkit. CRC for Catchment Hydrology. 2-21.
- Cuadros, B. (2014). Evolución de la cobertura glaciar del nevado Ananea entre 1985-2010. *Revista Científica Investigación Andina*, 14(2), 57-67. Recuperado de: <http://repositorio.uancv.edu.pe/handle/UANCV/2682>
- Das, S. y Sharma, M. (2021). *Glacier surface velocities in the Jankar Chhu Watershed*,

- western Himalaya, India: Study using Landsat time series data (1992–2020). Remote Sensing Applications: Society and Environment*, 24(August), 100615. Recuperado de: <https://doi.org/10.1016/j.rsase.2021.100615>
- Díaz, R., Sanchez,S., Lujano, E., y Lujano, A. (2017). Análisis multi-temporal entre 1975 y 2015 sobre cambios de la cobertura glaciar en los nevados Allin Capac y Chichi Capac, Perú. *Revista de Investigaciones Altoandinas - Journal of High Andean Research*, 19(3), 265–274. Recuperado de: <https://doi.org/10.18271/ria.2017.291>
- Draper, N. y Smith, H. (1998). "Applied Regression Analysis." New York: John Wiley & Sons
- Drenkhan, F., Guardamino, L., Huggel, C., & Frey, H. (2018). Current and future glacier and lake assessment in the deglaciating Vilcanota-Urubamba basin, Peruvian Andes. *Global and Planetary Change*, 169, 105-118. Recuperado de: <https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2018.07.005>
- Gallegos, E., Brito, C., Serrano, D., & Galárraga, R. (2018). Análisis De La Variación Temporal Y Espacial De La Cobertura Glaciar Del Nevado Cayambe, Ecuador, Mediante Fotografías Aéreas E Imágenes Landsat. *GeoFocus Revista Internacional de Ciencia y Tecnología de la Información Geográfica*, 22, 97-113. Recuperado de: <https://doi.org/10.21138/GF.577>
- GGWS (Golden Gate Weather Services). 2017. *El Niño and La Niña Years and Intensities Based on Oceanic Niño Index (ONI)*. Consultado el 10 de abril 2017. Recuperado de: <http://ggweather.com/enso/oni.htm>.
- Ghasemi, A., & Zahediasl, S. (2012). *Normality tests for statistical analysis: a guide for non-statisticians*. International journal of endocrinology and metabolism.
- Giri, C., Pengra, B., & Long, J. (2017). “Landsat and Its Valuable Role in Satellite Imagery and Mapping”.
- Gómez, Zamora, & Cabrel, (2012). Evaluación de la cobertura glaciar utilizando técnicas de teledetección espacial en la subcuenca del río Quellcayhuanca.

- Gonzales, F. (2011). Estudio multitemporal del nevado Ampay en el contexto del cambio climático: 1986 – 2011.
- Gujarati, D., & Porter, D. (2009). *Basic econometrics*. McGraw-Hill.
- Haeberli, W., Hoelzle, M., Paul, F., & Zemp, M. (2007). Integrated monitoring of mountain glaciers as key indicators of global climate change: the European Alps. *Annals of glaciology*, 46, 150-160.
- Hall, D., Riggs, G. & Salomonson, V. (1995). Development of methods for mapping global snow cover using Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS) data. *Remote Sensing of Environment*, 54(2), 127-140.
- Hansen, J., Ruedy, R., Sato, M., & Lo, K. (2010). Global surface temperature change. *Reviews of Geophysics*, 48(4), RG4004.
- Hernández, R., Fernández, C., & Baptista, L., (2006). Metodología de la investigación: Roberto Hernández Sampieri, Carlos Fernández Collado y Pilar Baptista Lucio (4a. ed.). (McGraw-Hill (ed.)). Recuperado de: <https://doi.org/http://revistas.udistrital.edu.co/ojs/index.php/azimut>
- Huancani, C. (2021). Efectos del cambio climático en la desglaciación del nevado ampay – Apurímac, periodo 2000 – 2019, *tesis de doctorado en ciencia, tecnología y medio ambiente*, Universidad Nacional Del Altiplano – Puno.
- INAIGEM, (2018). Inventario Nacional de Glaciares las Cordilleras Glaciares del Perú, Instituto Nacional de Investigación en Glaciares y Ecosistemas de Montaña.
- INOUE, J., (2018). La evolución de la cobertura glaciar en la subcuenca Blanco del río 793 Santa y su influencia en la disponibilidad hídrica en el periodo 1987-2016, tesis de grado, Universidad Nacional federico Villareal.
- INRENA-UGRH, (2007). Informe comportamiento y estado actual de Pastoruri (INRENA-UGRH (ed.)).
- IPCC. (2013). *Climate change 2013: the physical science basis*. Contribution of working group I to the fifth assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. IPCC.

- IPCC. (2014). *Climate change 2014: synthesis report*. Contribution of working groups I, II and III to the fifth assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. IPCC.
- IPCC. (2019). *Informe especial sobre cambio climático y tierra*. Panel Intergubernamental sobre el Cambio Climático.
- James, B. y Campbell, (2015). "Introduction to Remote Sensing" Fourth Edition.
- Jensen, J. (2016). *Remote sensing of the environment: An earth resource perspective* (2nd ed.). Pearson Education.
- Jiménez, C. (2014). Informe Técnico: Elaboración de un Boletín con Información Hidroclimática de los mares de México. 1-27.
- John, A. y Xiuping, J. (2013). "Remote Sensing Digital Image Analysis".
- Kaser, G. (1999). *Global and Planetary Change*. A review of modern fluctuations of tropical glaciers, 22(1-4), 93-103.
- Kotchenova, S., Vermote, E., Matarrese, R., & Klemm, F. (2006). Validation of a vector version of the 6S radiative transfer code for atmospheric correction of satellite data. Part II: Homogeneous Lambertian and anisotropic surfaces. *Applied optics*, 45(26), 6686-6693.
- Kutner, M., Neter, J., Wasserman, W. (1989). *Applied Linear Statistical Models* (4th Edition).
- Lillesand, T., Kiefer, R., & Chipman, J. (2015). *Remote sensing and image interpretation* (7th ed.). Capítulo 8.
- Lizarzaburu, J., Diehl, L., & Deza, J. (2012). El retroceso glaciar en la alta montaña de los Andes Peruanos. Caso: Santuario Nacional de Ampay. Recuperado de: <http://revistas.uap.edu.pe/ojs/index.php/CYD/article/download/1115/1093>
- López, M., Fontaneda, S., Bazo, J., Revuelto, J., Azorin, M., Valero, G. y Alejo, J. (2014). Recent glacier retreat and climate trends in Cordillera Huaytapallana, Peru. *Global and Planetary Change*, 112, 111. Recuperado de: <https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2013.10.010>

- López-Moreno, J., Valero-Garcés, B., Mark, B., Condom, T., Revuelto, J., Azorín-Molina, C., Bazo, J., Frugone, M., Vicente-Serrano, S. M., & Alejo-Cochachin, J. (2017). *Hydrological and depositional processes associated with recent glacier recession in Yanamarey catchment, Cordillera Blanca (Peru)*. *Science of The Total Environment*, 579, 272–282. Recuperado de: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.11.107>
- Lu, D., y Weng, Q. (2007). A survey of image classification methods and techniques for improving classification performance. *International Journal of Remote Sensing*, 28(5), 823-870.
- Markham, B., y Helder, D. (2005). *Science Data Users Handbook – USGS, Landsat 7*. Recuperado de <https://landsat.usgs.gov/landsat-7-science-data-users-handbook>
- Martínez, J. (2005). Percepción Remota "Fundamentos de Teledetección Espacial". *Comisión Nacional del Agua*. México. P. 7-62.
- Marzeion, B., Jarosch, A. H., & Gregory, J. M. (2014). Feedbacks and mechanisms affecting the global sensitivity of glaciers to climate change. *The Cryosphere*, 8(1), 59–71. Recuperado de: <https://doi.org/10.5194/tc-8-59-2014>
- Medina, G. y Mejía, A., (2014). Análisis multitemporal y multifractal de la deglaciación de la Cordillera Parón en los Andes de Perú. *Ecología Aplicada*, 13(1), 3542. Recuperado de: <http://www.scielo.org.pe/scielo.php?pid=S1726>
- MINAM, (2018). Cambio climático y glaciares en el Perú. Recuperado de: <https://www.minam.gob.pe/wp-content/uploads/2018/10/Cambio-Climatico-y-Glaciares-en-el-Peru.pdf>
- MINEM, (2022). Declaración anual consolidada (DAC), producción minera – estadística minera. Recuperado de: <https://www.gob.pe/institucion/minem/informes-publicaciones/produccion-minera>
- Molano, S., Cardenas, D., Gómez, H., Alvarado, D., Galindo, A., Sanabria, J., & Gómez-Neita, J. (2022). Evaluación del retroceso glaciar de la Sierra Nevada del Cocuy, Colombia a partir de la clasificación de imágenes multisensor. *Boletín de Geología*. 44(1). Recuperado de <https://doi.org/10.18273/revbol.v44n1-2022002>

- Monterroso, M., Londoño, J., & Samsonov, S. (2018). Determination of glacier retreat at nevado del ruiz, santa isabel and tolima volcanoes, colombia through optical image and din-SAR. *DYNA (Colombia)*, 85(206), 329-337. Recuperado de: <https://doi.org/10.15446/dyna.v85n206.66570>
- Montgomery, D., Peck, E., & Vining, G. (2012). "Introducción al Análisis de Regresión Lineal Múltiple." Editorial Limusa.
- Nüsser, M., y Schmidt, S. (2021). Glacier changes on the Nanga Parbat 1856–2020: A multi-source retrospective analysis. *Science of The Total Environment*. Recuperado de: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.147321>
- O'Brien, P. (1979). Diagnosing Multicollinearity in Regression Analysis. University of California, Los Angeles (UCLA). *Tesis doctoral*.
- Pielke, R. (2008). Mesoscale meteorological modeling (2nd ed.). Academic Press.
- Ramos, R. (2018). Evolución de la cobertura glaciaria del nevado Coropuna y su relación con el entorno climático. S.l.: *Universidad Agraria La Molina*. Recuperado de: <http://repositorio.lamolina.edu.pe/handle/UNALM/3321>.
- Richards, J. y Jia, X. (2006). Remote sensing digital image analysis: An introduction (4th ed.). Springer.
- San Martín, C., Ponce, J., Montes, A., Díaz, B., Gorza, C., y Coronato, A. (2021). Proglacial landform assemblage in a rapidly retreating cirque glacier due to temperature increase since 1970, Fuegian Andes, Argentina. *Geomorphology*, 390, 107861. Recuperado de: <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2021.107861>
- Sánchez, H. y Meza R, (1984). Metodología y diseños en la investigación científica.
- Santillana, G. (2015). Evaluación de los glaciares tropicales, lagunas y bofedales en un contexto de cambio climático. Autoridad Nacional del Agua. Perú. 2 p.
- SENAMHI, (2011). Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología. Escenarios de cambio climático en el Perú al 2050.
- SENAMHI, (2014). El Fenómeno El Niño en el Perú. Lima, Perú. 33 p.
- SENAMHI, (2022). Datos hidrometeorológicos – históricos, estación Ananea.



Recuperado de: <https://www.senamhi.gob.pe/site/descarga-datos/>

- Serra, E., Valla, P., Gribenski, N., Carcaillet, J., & Deline, P. (2022). Post-LGM glacial and geomorphic evolution of the Dora Baltea valley (western Italian Alps). *Quaternary Science Reviews*, 282, 107446. Recuperado de: <https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2022.107446>
- Silverio, W. (2018). Impacto del Cambio Climático en el Nevado Coropuna (Cordillera Ampato, Arequipa, Perú) y en el recurso hídrico. *Revista de Glaciares y Ecosistemas de Montaña*, no. 4.
- Tarazona, Y. (2012). Aplicación de la Teledetección para el análisis Multitemporal del retroceso glaciar en el Nevado Pastoruri. 2012. S.l.: s.n.
- Trenberth, K., & Stepaniak, D. (2001). Indices of El Niño evolution. *Journal of climate*, 14(8), 1697-1701.
- Vuille, M., Francou, B., Wagnon, P., Juen, I., Kaser, G., Mark, B., & Bradley, R. (2008). Climate Change and Tropical Andean Glaciers: Past, present and future *Earth Science Reviews*.

**ANEXOS**

**Anexo 1.** Operacionalización de variables

**ANÁLISIS MULTITEMPORAL DE LA COBERTURA GLACIAR DEL NEVADO ANANEA (PUNO, PERÚ) Y SU INFLUENCIA CLIMÁTICA, PERIODO 1985 – 2022**

**DEPENDIENTE**

VARIABLE	DEFINICIÓN CONCEPTUAL	DEFINICIÓN OPERACIONAL	DIMENSIONES	INDICADORES	UNID. MEDIDA
El área de la cobertura glaciaria (AGLA)	El retroceso glaciario es un fenómeno en el cual la parte delantera o borde de un glaciar se desplaza de su ubicación original como resultado de la reducción en el volumen de hielo presente (Haeberli et al., 2007).	Area de cobertura glaciaria: Medición del área cubierta por glaciares en cada año utilizando imágenes satelitales Landsat y Earth.	Área de la cobertura glaciaria.	Medición del área cubierta por glaciares.	Kilómetros cuadrados (km <sup>2</sup> )

**INDEPENDIENTE**

Periodo anual comprendido desde 1985 hasta 2022., temperatura máxima (TMA), temperatura mínima (TMI), precipitación	El periodo anual (1985 a 2022), durante este periodo, se experimentaron diversos eventos y cambios climáticos, incluyendo el calentamiento global, episodios El Niño y crecimiento de la actividad minera. Temperatura máxima y mínima: Es el valor más alto o bajo alcanzado por la temperatura en un determinado periodo. Precipitación: Es la cantidad de agua (en forma de lluvia, nieve,	Periodo anual: Años completos desde 1985 hasta 2022, Temperatura máxima y mínima: Registro de la temperatura más alta y más baja alcanzada en cada año. Precipitación: Medición de la cantidad de agua (lluvia, nieve, etc.) caída en cada año utilizando registros pluviométricos. Episodio El Niño: Registro de la ocurrencia de episodios del Niño en cada año. Actividad minera:	Periodo anual comprendido desde 1985 hasta 2022  Temperatura máxima  Temperatura mínima	Años completos desde 1985 hasta 2022  Registro de la temperatura más alta alcanzada  Registro de la temperatura más baja alcanzada	Anual  Grados Celsius (°C)  Grados Celsius (°C)
---	---	--	---	--	---

<p>(PP), episodios El Niño (NI) y actividad minera (MIN).</p>	<p>granizo, etc.) que cae sobre una determinada área en un periodo de tiempo. Episodios El Niño: Es un evento climático que ocurre en el océano Pacífico tropical y se caracteriza por el calentamiento inusual de las aguas superficiales del océano, lo que puede tener impactos significativos en los patrones climáticos globales. Actividad minera: Se refiere a las operaciones y procesos relacionados con la extracción de minerales.</p>	<p>Registro de la cantidad de actividades mineras realizadas (número de minas, extracción de minerales, producción minera y etc.) en cada año.</p>	<p>Precipitación Episodios del Niño Actividad minera</p>	<p>Medición de la cantidad de agua caída Registro de la ocurrencia de episodios EL Niño</p>	<p>Milímetros (mm) 0: sin Niño, 1: bajo, 2: moderado, 3: alto. Kg/año</p>
---	---	--	--	---	---





**Anexo 4. Panel fotográfico**

**Vista desde el Oriente, mina Cori Puno SAC**




**Condición climática en las faldas del nevado Ananea**



**Panorama de la desglaciación del nevado Ananea**



**Expedición de las faldas del nevado Ananea**





Universidad Nacional  
del Altiplano Puno



Vicerrectorado  
de Investigación



Repositorio  
Institucional

### DECLARACIÓN JURADA DE AUTENTICIDAD DE TESIS

Por el presente documento, Yo MILER SHOWIL CANAZA CORTIZ,  
identificado con DNI 73310725 en mi condición de egresado de:

Escuela Profesional,  Programa de Segunda Especialidad,  Programa de Maestría o Doctorado  
ECOLOGÍA, MENCIÓN EN EVALUACION DEL IMPACTO AMBIENTAL,

informo que he elaborado el/la  Tesis o  Trabajo de Investigación denominada:

"Análisis Multitemporal de la cobertura glaciar del Nevado Ananea  
(Puno, Perú) y su influencia climática, Período 1985-2022"

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.

En caso de incumplimiento de esta declaración, me someto a las disposiciones legales vigentes y a las sanciones correspondientes de igual forma me someto a las sanciones establecidas en las Directivas y otras normas internas, así como las que me alcancen del Código Civil y Normas Legales conexas por el incumplimiento del presente compromiso

Puno 26 de diciembre del 2023

  
FIRMA (obligatoria)



Huella



Universidad Nacional  
del Altiplano Puno



Vicerrectorado  
de Investigación



Repositorio  
Institucional

### AUTORIZACIÓN PARA EL DEPÓSITO DE TESIS O TRABAJO DE INVESTIGACIÓN EN EL REPOSITORIO INSTITUCIONAL

Por el presente documento, Yo MILER SHOWIL CANAZA ORTIZ,  
identificado con DNI 73310725 en mi condición de egresado de:

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

ECOLOGIA, MENCIÓN EN EVALUACION DEL IMPACTO AMBIENTAL

informo que he elaborado el/la  Tesis o  Trabajo de Investigación denominada:

"Análisis Multitemporal de la Cobertura Glaciar del Nevado Anaroca  
(Puno, Perú) y su influencia climática, Período 1985-2022"

para la obtención de  Grado,  Título Profesional o  Segunda Especialidad.

Por medio del presente documento, afirmo y garantizo ser el legítimo, único y exclusivo titular de todos los derechos de propiedad intelectual sobre los documentos arriba mencionados, las obras, los contenidos, los productos y/o las creaciones en general (en adelante, los "Contenidos") que serán incluidos en el repositorio institucional de la Universidad Nacional del Altiplano de Puno.

También, doy seguridad de que los contenidos entregados se encuentran libres de toda contraseña, restricción o medida tecnológica de protección, con la finalidad de permitir que se puedan leer, descargar, reproducir, distribuir, imprimir, buscar y enlazar los textos completos, sin limitación alguna.

Autorizo a la Universidad Nacional del Altiplano de Puno a publicar los Contenidos en el Repositorio Institucional y, en consecuencia, en el Repositorio Nacional Digital de Ciencia, Tecnología e Innovación de Acceso Abierto, sobre la base de lo establecido en la Ley N° 30035, sus normas reglamentarias, modificatorias, sustitutorias y conexas, y de acuerdo con las políticas de acceso abierto que la Universidad aplique en relación con sus Repositorios Institucionales. Autorizo expresamente toda consulta y uso de los Contenidos, por parte de cualquier persona, por el tiempo de duración de los derechos patrimoniales de autor y derechos conexos, a título gratuito y a nivel mundial.

En consecuencia, la Universidad tendrá la posibilidad de divulgar y difundir los Contenidos, de manera total o parcial, sin limitación alguna y sin derecho a pago de contraprestación, remuneración ni regalía alguna a favor mío; en los medios, canales y plataformas que la Universidad y/o el Estado de la República del Perú determinen, a nivel mundial, sin restricción geográfica alguna y de manera indefinida, pudiendo crear y/o extraer los metadatos sobre los Contenidos, e incluir los Contenidos en los índices y buscadores que estimen necesarios para promover su difusión.

Autorizo que los Contenidos sean puestos a disposición del público a través de la siguiente licencia:

Creative Commons Reconocimiento-NoComercial-CompartirIgual 4.0 Internacional. Para ver una copia de esta licencia, visita: <https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/>

En señal de conformidad, suscribo el presente documento.

Puno 26 de diciembre del 20 23

  
FIRMA (obligatoria)



Huella