

UNIVERSIDAD PRIVADA SAN CARLOS

FACULTAD DE INGENIERÍAS

ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA AMBIENTAL



TESIS

**RETROCESO DE LA COBERTURA GLACIAR DEL NEVADO QUELCCAYA DE
LA CORDILLERA VILCANOTA CAUSADO POR LA INFLUENCIA DE LOS
ELEMENTOS CLIMÁTICOS, PERÍODO 2010 - 2022.**

PRESENTADA POR:

CILNIO VLADIMIRO ABIMAE L UQUE GONZALES

PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE:

INGENIERO AMBIENTAL

PUNO – PERÚ

2024



Repositorio Institucional ALCIRA by [Universidad Privada San Carlos](https://www.upsc.edu.pe/) is licensed under a [Creative Commons Reconocimiento-NoComercial 4.0 Internacional License](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/)



5.26%

SIMILARITY OVERALL

SCANNED ON: 28 NOV 2024, 2:27 PM

Similarity report

Your text is highlighted according to the matched content in the results above.

● IDENTICAL
0.36%

● CHANGED TEXT
4.89%

Report #23927345

CILNIO VLADIMIRO ABIMAE LUQUE GONZALES // RETROCESO DE LA COBERTURA GLACIAR DEL NEVADO QUELCCAYA DE LA CORDILLERA VILCANOTA CAUSADO POR LA INFLUENCIA DE LOS ELEMENTOS CLIMÁTICOS, PERÍODO 2010 - 2022. RESUMEN El análisis del retroceso de la cobertura glaciar del nevado Quelccaya en la cordillera Vilcanota, tuvo como objetivo evaluar el retroceso de la cobertura glaciar del nevado Quelccaya de la cordillera Vilcanota causado por la influencia de los elementos climáticos, período 2010 y 2022. En la metodología se recopiló imágenes satelitales Landsat-8 de Google Earth Engine, posterior se calculó el Índice Diferencial Normalizado de Nieve (NDSI) en el software R, los datos climáticos se obtuvieron de TerraClim, que incluían temperaturas máximas, mínimas y precipitaciones, y se aplicaron métodos estadísticos como la prueba de Spearman para examinar las correlaciones entre estas variables y el área glaciar. En los resultados revelaron un significativo retroceso de la cobertura glaciar, en 2010, la superficie del glaciar alcanzaba los 40.4631 km², pero para 2022 disminuyó a 38.5641 km² y su proyección al 2050 disminuirá al 26.96 km², la validación del modelo proyectado revela un (RMSE) y un (MAE) promedio de 0.00421167 lo que sugiere un alto grado de precisión. Las temperaturas tuvieron un incremento de +0.54 °C en la temperatura máxima y de +0.79 °C en la mínima y la precipitaciones tuvo una disminución de -58 mm. También refleja que

UNIVERSIDAD PRIVADA SAN CARLOS
FACULTAD DE INGENIERÍAS
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA AMBIENTAL

TESIS

**RETROCESO DE LA COBERTURA GLACIAR DEL NEVADO QUELCCAYA DE
LA CORDILLERA VILCANOTA CAUSADO POR LA INFLUENCIA DE LOS
ELEMENTOS CLIMÁTICOS, PERÍODO 2010 - 2022.**

PRESENTADA POR:

CILNIO VLADIMIRO ABIMAE L UQUE GONZALES

PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE:

INGENIERO AMBIENTAL

APROBADA POR EL SIGUIENTE JURADO:

PRESIDENTE

:



Dr. RONNY ALEXANDER GUTIERREZ CASTILLO

PRIMER MIEMBRO

:



Dr. ESTEBAN ISIDRO LEON APAZA

SEGUNDO MIEMBRO

:



M.Sc. FREDY APARICIO CASTILLO SUAQUITA

ASESOR DE TESIS

:



Mg. JULIO WILFREDO CANO OJEDA

Área: Ingeniería, Tecnología.

Sub Área: Ingeniería Ambiental.

Líneas de Investigación: Sensores Remotos.

Puno, 03 de diciembre del 2024

DEDICATORIA

A Dios, que es la fuente inagotable de amor, fortaleza y sabiduría en mi vida. Te agradezco por guiar mis pasos y por iluminar mi camino en cada decisión que he tomado. Tu presencia me ha brindado la paz y la confianza necesarias para enfrentar los desafíos, y sin tu apoyo, este trabajo no habría sido posible. Este logro refleja tu infinita gracia y la fe que me has inspirado.

A mi familia, que ha sido mi apoyo fundamental en cada etapa de este viaje. Agradezco su amor incondicional, su constante aliento y su confianza en mí, incluso en mis momentos de duda. Su respaldo ha sido esencial para alcanzar mis metas, y cada sacrificio que han realizado ha dejado una huella imborrable en mi corazón.

A mis amigos, que han sido una fuente de inspiración y compañía a lo largo de este recorrido. Cada uno de ustedes ha contribuido con risas, motivación y momentos inolvidables que han hecho que este proceso sea más llevadero. Su amistad es un regalo invaluable que me ha impulsado a seguir adelante y dar lo mejor de mí.

AGRADECIMIENTOS

- Quisiera expresar mi más profundo agradecimiento a la Universidad Privada San Carlos de Puno, por haberme brindado la oportunidad de desarrollarme académicamente y por proporcionarme los recursos necesarios para llevar a cabo esta investigación.
- También extendo mi gratitud a la Escuela Profesional de Ingeniería Ambiental por su constante apoyo y por haberme ofrecido un entorno académico enriquecedor. La dedicación de los profesores y su disposición para compartir su experiencia han sido cruciales en mi formación tanto académica como profesional.
- De manera especial, quiero agradecer al M.Sc. Julio Wilfredo Cano Ojeda, mi asesor, por su guía, paciencia y por las valiosas aportaciones que brindó durante el desarrollo de este trabajo. Su vasta experiencia y conocimientos fueron esenciales para el éxito de este proyecto, y su constante apoyo fue una fuente de motivación para superar los retos que se presentaron.
- Finalmente, mi agradecimiento también va a los miembros del jurado, quienes dedicaron su tiempo a revisar esta investigación. Sus comentarios y recomendaciones han sido de gran ayuda para mejorar este trabajo, y su compromiso con la excelencia académica es algo que valoro profundamente.

ÍNDICE GENERAL

	Pág.
DEDICATORIA	1
AGRADECIMIENTOS	2
ÍNDICE GENERAL	3
ÍNDICE DE TABLAS	6
ÍNDICE DE FIGURAS	7
INDICE DE ANEXOS	8
RESUMEN	9
ABSTRACT	10
INTRODUCCIÓN	11

CAPÍTULO I

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA, ANTECEDENTES Y OBJETIVOS DE LA INVESTIGACIÓN

1.1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	14
1.1.1 Problema General	15
1.1.2 Problemas específicos	15
1.2. ANTECEDENTES	15
1.2.1. Antecedentes internacionales	15
1.2.2. Antecedentes nacionales	16
1.2.3. Antecedentes locales	19
1.3. OBJETIVOS DE LA INVESTIGACIÓN	20
1.3.1. Objetivo general	20
1.3.2. Objetivos específicos	20

CAPÍTULO II

MARCO TEÓRICO, CONCEPTUAL E HIPÓTESIS DE LA INVESTIGACIÓN

2.1. MARCO TEÓRICO	22
2.1.1. Desglaciación	22
2.1.2. Observación Remota	23
2.1.3. Resolución Espacial	24
2.1.4. El Espectro Electromagnético	25
2.1.5. Imágenes Satelitales	26
2.1.6. Cambio Climático y los glaciares	28
2.2. MARCO CONCEPTUAL	29
2.3. MARCO TEÓRICO NORMATIVO	30
2.4. HIPÓTESIS DE LA INVESTIGACIÓN	31
2.4.1. Hipótesis general	31
2.4.2. Hipótesis específicas	32
CAPÍTULO III	
METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN	
3.1. ZONA DE ESTUDIO	33
3.2. POBLACIÓN Y MUESTRA	34
3.2.1. Población	34
3.2.2. Muestra	34
3.3 MÉTODOS Y MATERIALES	34
3.3.1 Métodos	34
3.3.2 Materiales	35
3.4 METODOLOGÍA	35
3.5. IDENTIFICACIÓN DE VARIABLES	38
3.6. MÉTODO O DISEÑO ESTADÍSTICO	39

CAPÍTULO IV

EXPOSICION Y ANALISIS DE LOS RESULTADOS

4.1. EXPOSICIÓN Y ANÁLISIS DE LA ESTIMACIÓN DEL ÁREA DEL RETROCESO DE LA COBERTURA GLACIAR DEL NEVADO QUELCCAYA ENTRE EL 2010 - 2022.	40
4.2. EXPOSICION Y ANALISIS DE LA DETERMINACIÓN LA INFLUENCIA DE LA TEMPERATURA EN EL RETROCESO DE LA COBERTURA GLACIAR DEL NEVADO QUELCCAYA ENTRE EL 2010 - 2022.	49
4.3. EXPOSICION Y ANALISIS DE LA DETERMINACIÓN LA INFLUENCIA DE LA PRECIPITACIÓN EN EL RETROCESO DE LA COBERTURA GLACIAR DEL NEVADO QUELCCAYA ENTRE EL 2010 - 2022.	55
4.4. PROCESO DE LA PRUEBA DE HIPÓTESIS	58
4.4.1. Prueba de hipótesis para el objetivo específico 01.	58
4.4.2. Prueba de hipótesis para el objetivo específico 02	59
4.4.3. Prueba de hipótesis para el objetivo específico 03	60
CONCLUSIONES	64
RECOMENDACIONES	66
BIBLIOGRAFÍA	68
ANEXOS	73

ÍNDICE DE TABLAS

	Pág.
Tabla 01: Ubicación geopolítica del nevado Quelccaya.	34
Tabla 02: Operacionalidad de Variables.	38
Tabla 03: Estimación del retroceso glaciar del Nevado Quelccaya durante el 2010 y 2022.	41
Tabla 04: Estadística descriptiva del retroceso glaciar del Nevado Quelccaya.	45
Tabla 05: Prueba de normalidad 'Shapiro-Wilk' del Nevado Quelccaya.	46
Tabla 06: Pronóstico de la cobertura glaciar de Quelccaya al 2050.	48
Tabla 07: Estadística descriptiva de las temperaturas máximas y mínimas.	53
Tabla 08: Prueba de normalidad 'Shapiro-Wilk' de las temperaturas.	54
Tabla 09: Estadística descriptiva de las precipitaciones.	57
Tabla 10: Prueba de normalidad 'Shapiro-Wilk' de las precipitaciones.	58
Tabla 11: Correlación de Spearman de la variable independiente y dependiente.	62

ÍNDICE DE FIGURAS

	Pág.
Figura 01: Desglaciación en los Andes peruanos (Soto, 2024).	23
Figura 02: Elemento de un programa de detección a distancia (Quiroga et al., 2020).	24
Figura 03: Espectro electromagnético (Nicolás, 2024).	25
Figura 04: Niveles digitales (ND) de una sección de un Nevado (Gamez, 2024)	27
Figura 05: Corrección atmosférica (Bravo et al., 2024).	28
Figura 06: Cambio Climático y los glaciares (Cueva et al., 2023).	29
Figura 07: Mapa de Ubicación del Nevado Quelccaya.	33
Figura 08: Fases del procedimientos de la investigación.	35
Figura 09: Estimación de la cobertura glaciar de Quelccaya entre el 2010 y 2022.	42
Figura 10: Estimación de la cobertura glaciar de Quelccaya entre el 2010 y 2022.	44
Figura 11: Estimación de la cobertura glaciar de Quelccaya entre el 2010 y 2022.	45
Figura 12: Prueba de normalidad 'Shapiro-Wilk' del Nevado Quelccaya.	47
Figura 13: Regresión del retroceso glaciar sobre periodos.	47
Figura 14: Temperaturas máximas y mínimas del nevado Quelccaya.	50
Figura 15: Imagen de temperaturas máximas del nevado Quelccaya.	51
Figura 16: Imagen de temperaturas mínimas del nevado Quelccaya.	52
Figura 17: Prueba de normalidad 'Shapiro-Wilk' de las temperaturas.	54
Figura 18: Precipitación acumulada del nevado Quelccaya.	55
Figura 19: Imágenes de las precipitaciones del nevado Quelccaya.	56
Figura 20: Prueba de normalidad 'Shapiro-Wilk' de las precipitaciones.	58
Figura 21: Correlograma de la variables en colores.	62
Figura 22: Correlograma de la variables en valores numéricos.	63
Figura 23: Regresión lineal de las variables.	63

INDICE DE ANEXOS

	Pág.
Anexo 01: Matriz de consistencia: Retroceso de la cobertura glaciar del nevado Quelccaya de la cordillera Vilcanota causado por la influencia de los elementos climáticos, período 2010 - 2022	74
Anexo 02: Descarga de imágenes satelitales Landsat 8, de la plataforma Google Earth Engine.	75
Anexo 03: Conexión a la plataforma Google Earth Engine mediante Python en Jupyter.	76
Anexo 04: Descarga de imágenes satelitales mediante Python en Jupyter.	77
Anexo 05: Procesamiento de las imágenes satelitales mediante R.	78
Anexo 06: Proceso de la prueba estadística en R.	83

RESUMEN

El análisis del retroceso de la cobertura glaciar del nevado Quelccaya en la cordillera Vilcanota, tuvo como objetivo evaluar el retroceso de la cobertura glaciar del nevado Quelccaya de la cordillera Vilcanota causado por la influencia de los elementos climáticos, período 2010 y 2022. En la metodología se recopiló imágenes satelitales LandSat-8 de Google Earth Engine, posterior se calculó el Índice Diferencial Normalizado de Nieve (NDSI) en el software R, los datos climáticos se obtuvieron de TerraClim, que incluían temperaturas máximas, mínimas y precipitaciones, y se aplicaron métodos estadísticos como la prueba de Spearman para examinar las correlaciones entre estas variables y el área glaciar. En los resultados revelaron un significativo retroceso de la cobertura glaciar, en 2010, la superficie del glaciar alcanzaba los 40.4631 km², pero para 2022 disminuyó a 38.5641 km² y su proyección al 2050 disminuirá al 26.96 km², la validación del modelo proyectado revela un (RMSE) y un (MAE) promedio de 0.00421167 lo que sugiere un alto grado de precisión. Las temperaturas tuvieron un incremento de +0.54 °C en la temperatura máxima y de +0.79 °C en la mínima y las precipitaciones tuvo una disminución de -58 mm. También refleja que (r^2) de -0.79, revela una relación inversamente significativa entre el tiempo y la superficie glaciar, Este hallazgo indica que, a medida que el tiempo avanza, el área del glaciar ha disminuido de manera considerable, el (r^2) es de -0.71 para las temperaturas. Estos hallazgos evidencian una relación inversamente significativa, lo que significa que a medida que las temperaturas han ido en aumento, el área del glaciar ha ido disminuyendo. En conclusión el aumento de las temperaturas ha tenido un impacto considerable en el deshielo, mientras que las fluctuaciones en las precipitaciones han interferido con la acumulación de nieve.

Palabras clave: Cambio climático, Cobertura glaciar, Nevado Quelccaya, Precipitaciones, Temperatura.

ABSTRACT

The analysis of the retreat of the glacier cover of the Quelccaya snow-capped mountain in the Vilcanota mountain range, aimed to evaluate the retreat of the glacier cover of the Quelccaya snow-capped mountain in the Vilcanota mountain range caused by the influence of climatic elements, period 2010 and 2022. In the methodology, LandSat-8 satellite images were collected from Google Earth Engine, then the Normalized Differential Snow Index (NDSI) was calculated in the R software, climatic data was obtained from TerraClim, which included maximum and minimum temperatures and precipitation, and statistical methods such as the Spearman test were applied to examine the correlations between these variables and the glacier area. The results revealed a significant decline in glacier cover. In 2010, the glacier surface reached 40.4631 km², but by 2022 it decreased to 38.5641 km² and its projection to 2050 will decrease to 26.96 km². The validation of the projected model reveals an average (RMSE) and (MAE) of 0.00421167, which suggests a high degree of accuracy. Temperatures had an increase of +0.54 °C in the maximum temperature and +0.79 °C in the minimum and precipitation had a decrease of -58 mm. It also reflects that (r^2) of -0.79, reveals an inversely significant relationship between time and glacier surface. This finding indicates that, as time progresses, the area of the glacier has decreased considerably, the (r^2) is -0.71 for temperatures. These findings show a significant inverse relationship, meaning that as temperatures have increased, the area of the glacier has decreased. In conclusion, rising temperatures have had a considerable impact on melting, while fluctuations in precipitation have interfered with snow accumulation.

Keywords: Climate change, Glacier cover, Quelccaya snow-capped Mountain, precipitation, Temperature.

INTRODUCCIÓN

El cambio climático ha ejercido una influencia significativa en los glaciares a nivel mundial, y los nevados de la Cordillera de los Andes no han quedado al margen de esta problemática. En particular, el nevado Quelccaya, situado en la Cordillera Vilcanota, ha experimentado un notable retroceso en su cobertura glaciar en las últimas décadas, atribuido a cambios en los elementos climáticos, como el aumento de las temperaturas y la reducción de las precipitaciones. Este fenómeno no solo impacta la disponibilidad de agua para las comunidades locales, sino que también conlleva riesgos ecológicos y económicos, ya que los glaciares desempeñan un papel crucial en la regulación del ciclo hidrológico de la región. Un análisis exhaustivo de estos cambios es esencial para comprender las tendencias actuales y prever los posibles impactos futuros.

El nevado Quelccaya ha evidenciado una alarmante reducción en su superficie glaciar en los últimos años. Las variaciones en los elementos climáticos, como las temperaturas extremas y los cambios en los patrones de precipitación, son las principales causas de este retroceso. Ante esta situación, surge la necesidad de evaluar y cuantificar la pérdida de cobertura glaciar del nevado Quelccaya durante el periodo 2010-2022, y determinar en qué medida los factores climáticos están incidiendo en este fenómeno. Este estudio busca responder a la siguiente pregunta: ¿Cuál es el retroceso de la cobertura glaciar del nevado Quelccaya de la cordillera Vilcanota causado por la influencia de los elementos climáticos, período 2010 - 2022?.

En los glaciares de los Nevados Japu Punta y Yayamari, Cusco, Esta investigación se enfoca en analizar la evolución del retroceso de los glaciares Japu Punta y Yayamari, ubicados en la Cordillera Vilcanota (departamento de Cusco), dentro del contexto del cambio climático. Los resultados revelan que las estaciones meteorológicas de Acomayo, Pomacanchis y Paruro muestran una tendencia significativa al aumento en las series de temperatura media, mientras que las estaciones de Ccatca y Sicuani no presentan dicha

tendencia. En cuanto a las series de precipitación, no se observa ningún patrón claro en ninguna de las estaciones meteorológicas. En el análisis de los glaciares de Japu Punta y Yayamari, se identificaron 11 glaciares y se calculó una disminución de 5.01 km² en la superficie glaciar, además de un incremento de 59 metros en la altitud de la línea de equilibrio en un período de 30 años (1992-2022), lo que refleja una tasa de desglaciación de 0.167 km² por año y 1.967 metros por año, respectivamente (Barrientos, 2023).

La hipótesis de esta investigación sostiene que el retroceso de la cobertura glaciar del nevado Quelccaya de la cordillera Vilcanota es 5 % por la influencia negativa de los elementos climáticos durante el período 2010 - 2022. Se espera que las variaciones climáticas, especialmente el incremento de la temperatura media anual, presenten una correlación significativa con la reducción de la masa glaciar.

Las variables se definen como Causa o variable independiente (VI): Influencia de los elementos climáticos. Efecto o variable dependiente (VD): Retroceso de la cobertura.

El presente estudio se organiza en cuatro capítulos:

Capítulo I: Introducción. Se presenta el planteamiento del problema, los antecedentes del estudio, la formulación de los objetivos que se investiga.

Capítulo II: Marco teórico. Este capítulo ofrece un marco conceptual que respalda el análisis del cambio climático y su impacto en los glaciares, además de incluir estudios previos sobre el retroceso glaciar en la Cordillera de los Andes.

Capítulo III: Metodología. Aquí se detalla el enfoque metodológico de la investigación, abarcando el análisis de imágenes satelitales y los datos climáticos recopilados, así como el tratamiento estadístico aplicado para evaluar la relación entre las variables.

Capítulo IV: Resultados y discusión. Se exponen los resultados del análisis de la cobertura glaciar del nevado Quelccaya durante el periodo 2010-2022 y su correlación

con los factores climáticos. También se discuten los hallazgos en relación con estudios anteriores y sus implicaciones para la región. Finalmente, Conclusiones y recomendaciones se resumen los hallazgos más significativos y se plantean recomendaciones para futuras investigaciones y políticas de mitigación ante el cambio climático.

CAPÍTULO I

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA, ANTECEDENTES Y OBJETIVOS DE LA INVESTIGACIÓN

1.1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

A escala mundial, el mayor reto al que nos enfrentamos es el cambio climático. Debido a él, las regiones nevadas del mundo han ido perdiendo cantidades significativas de cubierta glaciaria, esto se debe a que las temperaturas globales están aumentando debido a prácticas antropogénicas y procesos naturales insuficientes. Como resultado, entre otros factores, la desglaciación gradual de las montañas nevadas del mundo es un problema para el medio ambiente en su conjunto (González, 2021).

Muchos municipios costeros peruanos, entre ellos Lima, la capital del país, dependen cada vez más del agua procedente de los glaciares. El aumento de la demanda de recursos hídricos para el sector agrícola ha planteado numerosos problemas de gestión. No obstante, hay que observar el comportamiento de las minúsculas cuencas hidrográficas de las cordilleras y/o valles, ya que los glaciares son la principal fuente de abastecimiento (Gavilanes & Tipán, 2021).

Perú todavía contiene importantes zonas de glaciares que se están derritiendo y retrocediendo rápidamente como consecuencia de los efectos del cambio climático a escala regional y mundial debido a las grandes elevaciones de la cordillera de los Andes, que alcanza alturas de más de 6.000 metros sobre el nivel del mar (Abellán, 2021).

Los cambios de los factores abióticos afectan en el rápido proceso de deglaciación incluyen la reducción de la superficie glaciar, el retroceso de los frentes glaciares, la expansión y el desarrollo de nuevas lagunas y la presencia de glaciares colgantes (Morote, 2020).

La finalidad del estudio es comparar la regresión de la cobertura glaciar del nevado Quelccaya, que es una de las principales fuentes de agua de las cuencas; La determinación de la regresión glaciar indicará que los glaciares más afectados por la regresión glaciar son los que se encuentran en la cordillera del Vilcanota, en las regiones de Cusco y Puno, y en particular esos glaciares.

1.1.1 Problema General

¿Cuál es el retroceso de la cobertura glaciar del nevado Quelccaya de la cordillera Vilcanota causado por la influencia de los elementos climáticos, período 2010 - 2022?

1.1.2 Problemas específicos

- ¿Cuál es el área del retroceso de la cobertura glaciar del nevado Quelccaya entre el 2010 - 2022?
- ¿De qué manera la temperatura influye en el retroceso glaciar del nevado Quelccaya entre el 2010 - 2022?
- ¿De qué manera la precipitación influye en el retroceso glaciar del nevado Quelccaya entre el 2010 - 2022?

1.2. ANTECEDENTES

1.2.1. Antecedentes internacionales

- Hidalgo et al. (2024), el retroceso de los glaciares en toda la cordillera de los Andes, Ecuador, Este estudio busca analizar el retroceso del glaciar Carihuairazo y sus efectos sobre la comunidad cercana de Cunucyacu. Los resultados muestran que, para el año 2021, el glaciar ha perdido el 99% de su superficie registrada en 1956, quedando en 0.34 km². El modelo utilizado simula la variación de la extensión glaciar

durante 67 años, observándose una disminución constante a partir de 1978, con breves periodos de estabilización y recuperación. La temperatura se identifica como la principal variable que explica este retroceso. Sin embargo, el modelo no logra incorporar factores externos, como la erupción del volcán Tungurahua, que podría haber acelerado la pérdida glaciaria. El glaciar Carihuairazo está en camino a desaparecer, destacando las vulnerabilidades de las comunidades locales ante el cambio climático.

- Cabrera et al. (2023), en los Andes ecuatorianos, este estudio tuvo como objetivo cuantificar la pérdida de la cobertura glaciaria del nevado Cayambe, ubicado en la provincia de Pichincha, Ecuador, durante las últimas décadas (1990-2020) utilizando imágenes satelitales Landsat. Los resultados muestran que el nevado ha retrocedido un 30.09% en los últimos 30 años, principalmente debido al incremento de la temperatura desde 2012. Aunque las tendencias de las variables climáticas no son estadísticamente significativas, se observa un aumento en la temperatura y una disminución en la precipitación, lo que sugiere una relación con el retroceso glaciario del 4% al 7%. Aunque este porcentaje no es elevado, indica una conexión entre las variables. Se estima que para 2050 el glaciar abarcará una superficie de 6.1 km² y que desaparecerá para 2080. En conclusión, el nevado Cayambe continúa en un proceso de retroceso constante, lo que hace cada vez más visible el impacto del cambio climático.

1.2.2. Antecedentes nacionales

- Jiménez & Tecse (2021), en la cordillera Blanca, Perú, el propósito de esta investigación fue identificar los Sistemas de Teledetección Espacial empleados en la estimación del retroceso glaciario en la Cordillera de los Andes en Perú. Desde las primeras investigaciones en los años 60 hasta la actualidad, se han documentado retrocesos significativos en estas áreas. En particular, se destaca una pérdida del

39% de la cobertura glaciar en la Cordillera Blanca, que concentra la mayor cantidad de glaciares, y hasta un 99.4% en la Cordillera de Chila, lo que ha resultado en la formación de lagunas. Los glaciares a menor altitud son los más afectados debido a la elevación de la línea de equilibrio (ELA), lo que refleja un retroceso acelerado. Estos hallazgos abren nuevas oportunidades de investigación para fomentar el desarrollo sostenible en respuesta a los impactos climáticos.

- Barrientos (2023), en los glaciares de los Nevados Japu Punta y Yayamari, Cusco, Esta investigación se enfoca en analizar la evolución del retroceso de los glaciares Japu Punta y Yayamari, ubicados en la Cordillera Vilcanota (departamento de Cusco), dentro del contexto del cambio climático. Los resultados revelan que las estaciones meteorológicas de Acomayo, Pomacanchis y Paruro muestran una tendencia significativa al aumento en las series de temperatura media, mientras que las estaciones de Ccatca y Sicuani no presentan dicha tendencia. En cuanto a las series de precipitación, no se observa ningún patrón claro en ninguna de las estaciones meteorológicas. En el análisis de los glaciares de Japu Punta y Yayamari, se identificaron 11 glaciares y se calculó una disminución de 5.01 km² en la superficie glaciar, además de un incremento de 59 metros en la altitud de la línea de equilibrio en un período de 30 años (1992-2022), lo que refleja una tasa de desglaciación de 0.167 km² por año y 1.967 metros por año, respectivamente.
- Huacani (2019), en el nevado del Ampay, Perú, El propósito de este estudio es evaluar la disminución de la superficie glaciar del nevado Ampay, atribuido al cambio climático, utilizando imágenes satelitales Landsat desde 1980 hasta 2015. Los hallazgos del análisis revelan una correlación positiva moderada, con un valor de $r=0.417$, entre la reducción de la superficie glaciar y la variable del cambio climático, específicamente en relación con la temperatura media anual. En conclusión, se

determinó que el nevado Ampay, situado en la provincia de Abancay, región de Apurímac, ha experimentado una pérdida del 41.689% de su superficie glaciar.

- Toribio (2023), en el nevado Huaytapallana, Perú, el objetivo de este estudio fue evaluar el impacto espacio-temporal del retroceso glaciar entre los años 1990 y 2020. Los resultados indicaron que la superficie glaciar pasó de 27.73 km² en 1990 a 15.71 km² en 2020, lo que representa una reducción del 56.65% en 30 años. Se determinó una tasa de retroceso glaciar de 0.42 km² por año. Además, se analizó el ecosistema de bofedales, que aumentó de 0.89 km² en 1990 a 6.53 km² en 2020. El estudio concluye, basado en evidencia científica, que existe una correlación inversa significativa entre las variables, lo que sugiere que el retroceso del glaciar Huaytapallana influye considerablemente en la expansión de los bofedales en el Área de Conservación Regional Huaytapallana.
- Chávez et al. (2023), en la Cordillera Blanca, Ancash, El objetivo de esta tesis fue analizar el impacto del cambio climático en los glaciares de la vertiente occidental de la subcuenca de Ranrahirca (Cordillera Blanca), evaluando el desnivel entre la Altitud de la Línea de Equilibrio geomorfológica (ELAg) y la climática (ELAc) desde la Pequeña Edad de Hielo. Los resultados muestran que, entre la Pequeña Edad de Hielo y 1962 (112 años), se perdió aproximadamente 13 km² de área glaciar, con una tasa de retroceso de 0.12 km²/año. En el periodo 1962-2016 (54 años), la pérdida fue de unos 7 km², con una tasa de retroceso de 0.14 km²/año. Los glaciares se encuentran en desequilibrio con el clima actual (ELAc>ELAg), mientras que durante la Pequeña Edad de Hielo, los glaciares estaban en equilibrio con el paleoclima (ELAc=ELAg), estimándose una paleoprecipitación de 2337 mm y una temperatura aproximadamente 1.1°C inferior a la actual. Al simular cinco escenarios de calentamiento global para 2100, según el IPCC, se prevé que la desaparición de la zona de acumulación glaciar varía según el aumento de temperatura: en el Escenario

A (sin cambio), persistirán 5 lagunas glaciares; en el Escenario B (+1°C), 10 lagunas glaciares; en el Escenario C (+2°C), 22 lagunas glaciares; en el Escenario D (+3°C), 25 lagunas glaciares; y en el Escenario E (+4°C), 34 lagunas glaciares desaparecerían. En conclusión, el impacto del cambio climático entre 1962 y 2016 ha sido mayor que el registrado desde la Pequeña Edad de Hielo hasta 1962, y las proyecciones futuras de deglaciación indican que el retroceso será aún más pronunciado, generando escenarios de riesgo para las poblaciones cercanas al área de estudio.

1.2.3. Antecedentes locales

- Ccallata (2021), en Puno, evaluó la pérdida de la cobertura glaciar del nevado Salluyo de la cordillera de Apolobamba e impacto de factores meteorológicos entre 1985 y 2020, en los resultados indican una disminución de la cobertura de los glaciares. La superficie total cubierta por glaciares descendió de 3,55 km² en 1985 a 2,54 km² en 2020, un total de 1,01 km². La cobertura glaciar de Salluyo se ha reducido un 28,45% en los últimos 35 años. La temperatura y las precipitaciones son dos factores que influyen en el retroceso de los glaciares. Según el análisis de tendencias, se produjo un gran aumento tanto de las temperaturas máximas como de las mínimas entre 1985 y 1999. Sin embargo, no se observó ninguna tendencia significativa en ninguna de las dos temperaturas entre 2000 y 2020. Durante todo el periodo de estudio, se produjo un descenso significativo de las precipitaciones.
- Pacompia (2022), en el distrito de Macusani - Puno, estudió el Nivel de deshielo en el pico nevado Allincapac entre 2000 y 2020, en los resultados a mostrado que se ha producido una pérdida de 1653,92 ha de glaciares entre 2000 y 2020, produciéndose la mayor pérdida entre 2000 y 2005, con una extensión de 816,55 ha. Esta pérdida significativa se atribuye a la temperatura más alta registrada en 2002, que fue de 14,80°C. del 2005 a 2020, se registró una temperatura máxima de 15,00°C, lo que

provocó una reducción de 837,37 ha en la cobertura de los glaciares. El examen de cómo ha cambiado el clima a lo largo del tiempo es igualmente significativo. La temperatura máxima media tiende a aumentar 0,46°C, lo que se debe sobre todo al retroceso de los glaciares. En consecuencia, las temperaturas mínimas tienen tendencia a subir 0,23°C.

- Deza (2024), en el nevado Ananea de la cordillera Apolobamba, Esta investigación tuvo como propósito evaluar el retroceso de la cobertura glaciar debido a la influencia de los factores climáticos en el periodo 2015-2023. Los resultados muestran que, en 2015, el nevado Ananea tenía una cobertura glaciar de 25.11 km², la cual disminuyó a 16.43 km² en 2023, lo que representa una variación de -8.68 km² y una tasa de cambio del -34.56% en 9 años. El análisis estadístico de Pearson revela una correlación negativa significativa de $r = -0.91$ en relación con los años, así como correlaciones negativas importantes con la temperatura máxima y mínima, con valores de $r = -0.88$ y -0.8 respectivamente. Además, se identificó una correlación positiva notable de $r = 0.87$ con la precipitación acumulada. Los valores de significancia p (bilateral) resultaron significativos (<0.0001), lo cual es menor al nivel de significación de 0.05. En conclusión, la cobertura glaciar del nevado Ananea ha disminuido de manera estadísticamente significativa en los últimos 9 años, influenciada por el aumento de las temperaturas máximas y mínimas, así como por la reducción de precipitaciones.

1.3. OBJETIVOS DE LA INVESTIGACIÓN

1.3.1. Objetivo general

Evaluar el retroceso de la cobertura glaciar del nevado Quelccaya de la cordillera Vilcanota causado por la influencia de los elementos climáticos, período 2010 - 2022.

1.3.2. Objetivos específicos

- Estimar el área del retroceso de la cobertura glaciar del nevado Quelccaya entre el

2010 - 2022.

- Determinar la influencia de la temperatura en el retroceso de la cobertura glaciar del nevado Quelccaya entre el 2010 - 2022.
- Determinar la influencia de la precipitación en el retroceso de la cobertura glaciar del nevado Quelccaya entre el 2010 - 2022.

CAPÍTULO II

MARCO TEÓRICO, CONCEPTUAL E HIPÓTESIS DE LA INVESTIGACIÓN

2.1. MARCO TEÓRICO

2.1.1. Desglaciación

Podemos mencionar los siguientes factores como desencadenantes: el cambio climático, el efecto invernadero, el agotamiento de la capa de ozono, la actividad minera y otras razones desfavorables. Se conoce como deglaciación al aumento de la línea inferior de nieve que es permanente en las altas montañas, hasta que desaparece por completo. En la mayoría de los casos, esto ocurre como consecuencia del aumento de las temperaturas, por lo que el proceso se acelera (Bravo, 2023).

La principal causa del retroceso de los glaciares o deglaciación en los Andes peruanos es el cambio climático, ya que existe una tendencia al aumento de la temperatura, según el INAIGEM, que señala que las causas de la deglaciación son variadas. El aumento de la temperatura atmosférica es el principal factor, por lo que los eventos ENSO (El Niño Southern Oscillation) más frecuentes se producen cuando hay un aumento de la temperatura. La desglaciación es el proceso en el que un glaciar o una masa de hielo disminuye o se derrite considerablemente, principalmente debido al incremento de las temperaturas, este fenómeno puede ser natural en épocas de climas más cálidos, o ser resultado del calentamiento global, el cual está ampliamente vinculado a actividades humanas. La desglaciación tiene un impacto relevante en los ecosistemas, en la

elevación del nivel del mar, y en la disponibilidad de agua para las poblaciones que dependen de los glaciares como fuente de recursos hídricos (Soto, 2024).



Figura 01: Desglaciación en los Andes peruanos (Soto, 2024).

2.1.2. Observación Remota

Aunque no es el método óptimo debido a sus numerosas limitaciones, la observación a distancia, posible gracias a la teledetección, permite obtener información sin estar físicamente en la región o el entorno que se desea evaluar y/o investigar. Esta observación a distancia se denomina "ciencia de la tierra", ya que su objetivo principal es tomar fotografías con este fin o analizar las imágenes que se recogen (Villar, 2023).

Las imágenes de satélite, como las de LANDSAT, se utilizan para la observación a distancia. Estas imágenes tienen 8 bandas espectrales, que al combinarse producen una variedad de imágenes con diferentes colores que pueden utilizarse para trabajos de tipo interpolación. Como resultado, sus aplicaciones son variadas, incluyendo la vigilancia y/o el análisis térmico. Todo ello es posible gracias a que la resolución espacial de estas imágenes oscila entre 15, 30, 60 y 120 m (Torres, 2024).

La observación remota por satélites es una técnica que emplea sensores instalados en satélites para obtener datos sobre la superficie terrestre sin necesidad de contacto directo. Estos sensores pueden captar información en diversas bandas del espectro

electromagnético, como imágenes ópticas, infrarrojas o de radar, permitiendo así el seguimiento y análisis de fenómenos como el clima, los cambios en el uso del suelo, la producción agrícola, los desastres naturales, entre otros. Esta tecnología resulta clave para la investigación ambiental, la administración de recursos naturales y la planificación territorial (Quiroga et al., 2020).

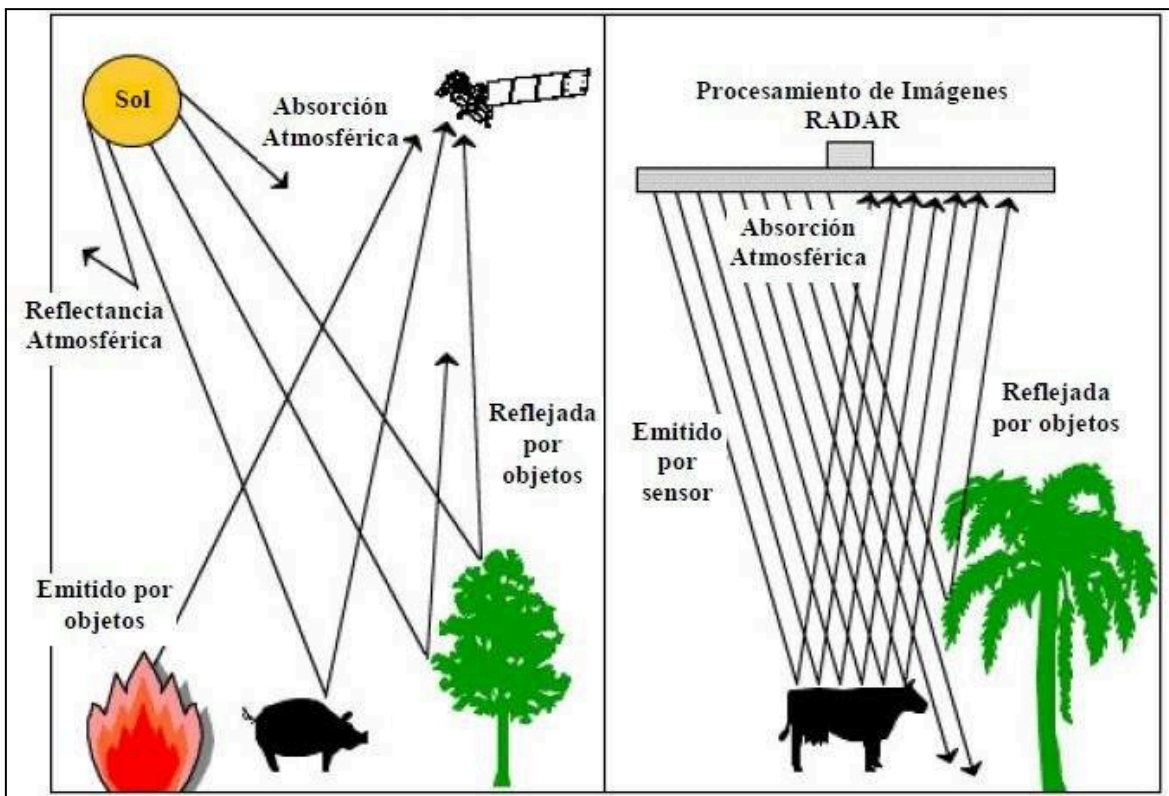


Figura 02: Elemento de un programa de detección a distancia (Quiroga et al., 2020).

2.1.3. Resolución Espacial

El tamaño más pequeño de un elemento que puede identificarse en una imagen se denomina "píxel en el suelo", y es esta dimensión la que se utiliza para definir la resolución espacial (Jumbo et al., 2024).

Escalar un proyecto espectral requiere de una resolución espacial, ya que confiere a la interpretación un alto grado de confianza. En consecuencia, a medida que aumenta el tamaño del píxel, disminuye la probabilidad de que un píxel tenga dos coberturas límite. La mayor dimensión de un píxel puede ser útil para reducir la variedad de categorías, la

resolución espacial hace referencia al nivel de precisión con el que un sensor o sistema de teledetección puede capturar detalles en una imagen, permitiendo distinguir elementos o características en la superficie terrestre. Generalmente, se mide en función del área mínima que el sensor puede detectar, ya sea en metros o kilómetros. Una mayor resolución espacial implica la capacidad de identificar objetos más pequeños, facilitando un análisis más preciso. Este concepto es clave en áreas como la cartografía, la monitorización ambiental y la planificación urbana, ya que afecta directamente la exactitud de los datos obtenidos (Guallazaca, 2023).

2.1.4. El Espectro Electromagnético

Según la longitud de onda emitida por cualquier energía con movimiento armónico y velocidad de la luz constante, el espectro electromagnético clasifica el sistema (Huayanay, 2024).

Además, cabe señalar que una imagen hiperespectral puede contener diversas bandas espectrales que contienen información. Por esta razón, se dice que la radiación electromagnética tiene propiedades muy básicas y se comporta de manera muy predecible de acuerdo con los fundamentos de la teoría ondulatoria (Nicolás, 2024).

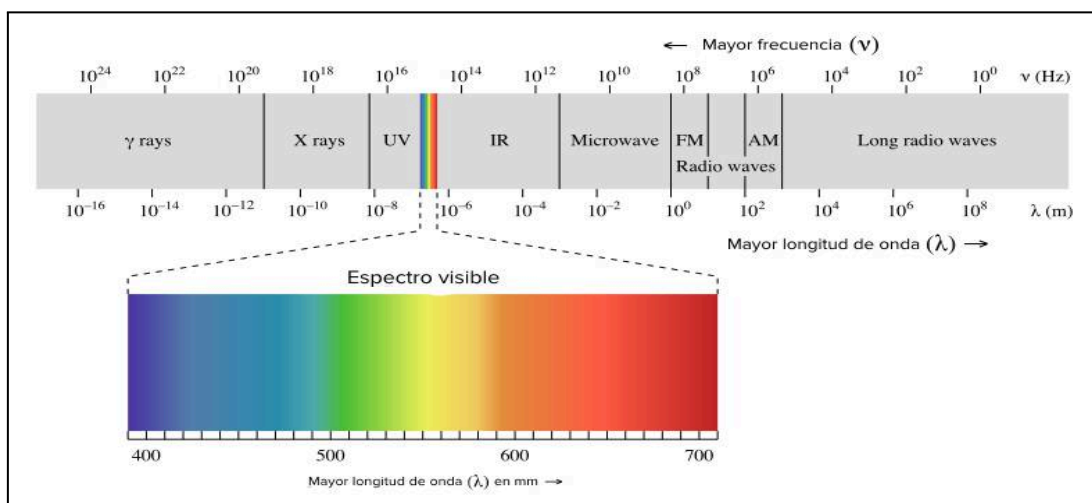


Figura 03: Espectro electromagnético (Nicolás, 2024).

2.1.5. Imágenes Satelitales

Pre procesamiento de imágenes satelitales

Es posible realizar toda una serie de investigaciones utilizando un conjunto de procedimientos y técnicas denominados preprocesamiento de imágenes de satélite. El preprocesamiento se realiza para garantizar que los resultados sean de mayor calidad cuando se utilicen para un fin determinado (Forero, 2024).

La calibración radiométrica de una imagen, los datos o la información del valor del píxel de la imagen y la información de reflectancia deben realizarse en niveles digitales (Gamez, 2024).

ND (Niveles digitales)

Con la ayuda de los niveles digitales, es posible analizar los errores en el proceso de nivelación digital e identificar el parámetro de observación mejor y más preciso en el momento de la explotación. Por ello, recomiendan parámetros técnicos de vanguardia y programas informáticos de observación que pueden utilizarse en la nivelación digital

Se presenta en una escala de grises, donde los tonos más claros como el blanco o próximos a este se aproximan a un valor igual o próximo al número 0 y los tonos más oscuros como el negro o próximos a este tienen un valor aproximado a 256. Los niveles digitales también se conocen como ND, y este nombre se debe a que tienen un valor numérico, que puede traducirse a un nivel de intensidad relacionado con la calidad de imagen obtenida con diferentes programas y/o plataformas web (Gamez, 2024).

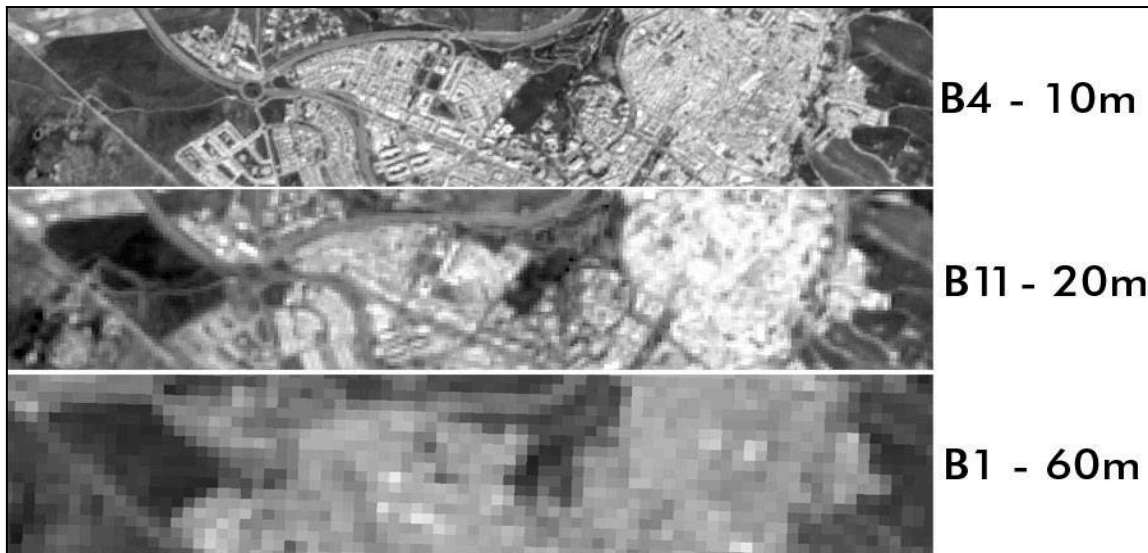


Figura 04: Niveles digitales (ND) de una sección de un Nevado (Gamez, 2024)

Correcciones geométricas o georreferenciación

Las anomalías observadas en una imagen se reparan mediante técnicas geométricas y radiométricas durante los procesos de corrección de imágenes.

Asimismo en su artículo Mendoza et al. (2024), explica que, dado que se utilizan coordenadas UTM para georreferenciar las imágenes, basta con rectificarlas para obtener una corrección geométrica más exhaustiva. Tras definir una escena posterior que corresponda a la zona de estudio, se aplica el modelo FLASH (análisis atmosférico rápido de línea de visión de hipercubos espectrales) para realizar una técnica de corrección atmosférica.

Correcciones atmosféricas

Indica que las relaciones duales, que son necesarias para enfocar las simulaciones de los modelos de radiación que tenemos para la atmósfera, se crean cuando se utilizan modelos sin fluctuaciones en la línea de tierra. Como resultado de la comparación funcional, esta conclusión, que se considera en términos absolutos y no relativos, puede cuantificar y llevar a cabo el proceso que interviene en el ajuste atmosférico (Escalante, 2024).

Diferentes elementos atmosféricos pueden alterar los cálculos o índices que el análisis requiere de la radiación electromagnética artificial o natural emitida por la luz solar o por cualquier sensor que se tenga. Estas alteraciones pueden ser la aparición de gases, vapor, nubosidad; estas alteraciones pueden causar distorsión en el sensor; estas alteraciones producen componentes que no son útiles para la investigación; todas estas alteraciones impiden que la radiación sea efectiva, las correcciones atmosféricas de imágenes satelitales son procedimientos diseñados para eliminar o reducir los efectos que la atmósfera puede tener en los datos capturados por los sensores de satélites. Durante la obtención de imágenes, factores como la humedad, la presencia de aerosoles y las variaciones en la iluminación solar pueden alterar los valores espectrales, afectando así la calidad y precisión de la información recolectada (Bravo et al., 2024).

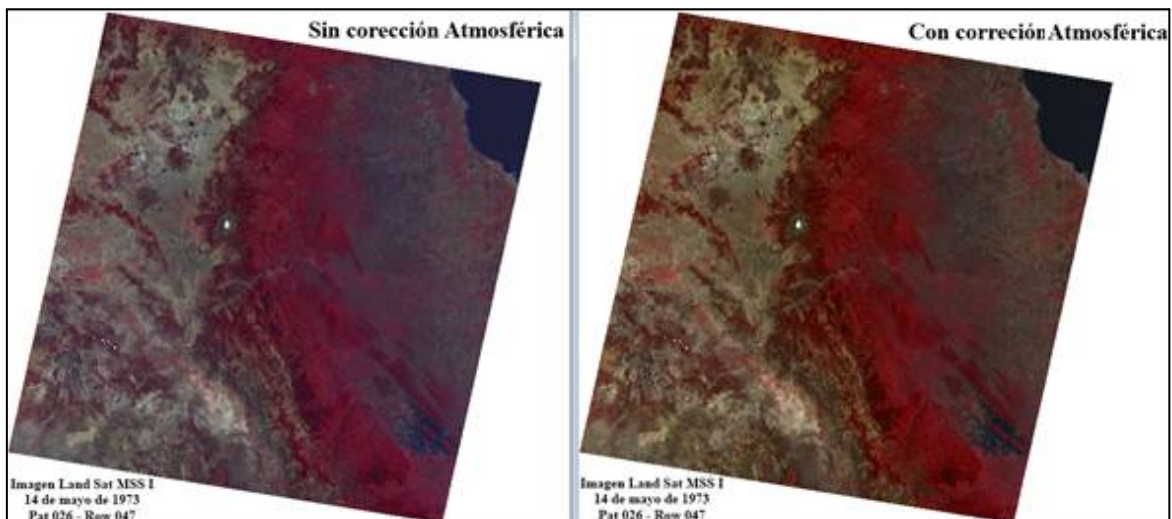


Figura 05: Corrección atmosférica (Bravo et al., 2024).

2.1.6. Cambio Climático y los glaciares

El consumo de hidrocarburos, gases y carbón, que es de donde procede la mayor parte del dióxido de carbono liberado a la atmósfera, así como la tala de árboles y los incendios forestales, son otras causas humanas del cambio climático. Como estos gases atrapan la energía solar y el calor, todos los factores mencionados contribuyen al "efecto

invernadero", que provoca el calentamiento global y reduce la cubierta de los glaciares (Percudani et al., 2023).

La desaparición de los glaciares, que son los mayores proveedores de agua dulce del mundo, sería desastrosa porque podría desencadenar la extinción de ecosistemas enteros que dependen de ellos para abastecerse de agua dulce (Cueva et al., 2023).

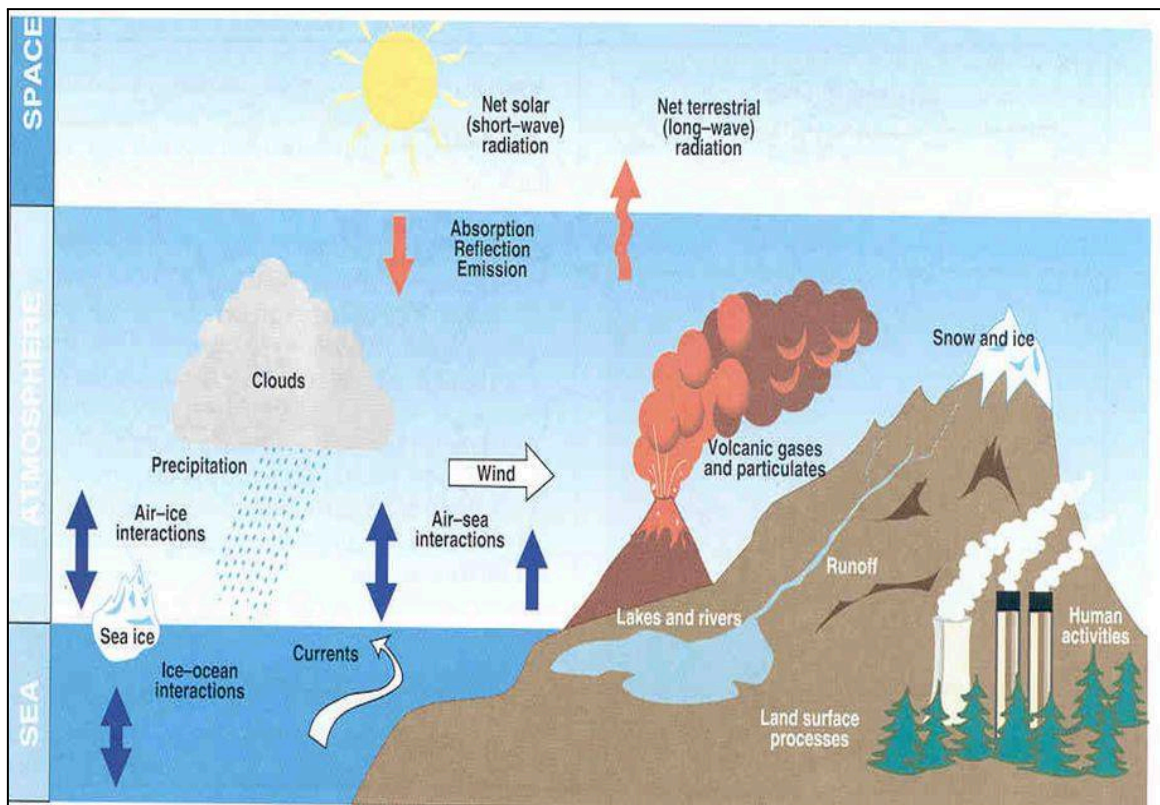


Figura 06: Cambio Climático y los glaciares (Cueva et al., 2023).

2.2. MARCO CONCEPTUAL

- **Glaciar:** Una cantidad significativa de hielo que se ha desarrollado en la superficie de la tierra como resultado de la acumulación y compactación de la nieve y que se ha desplazado hacia abajo por la fuerza de la gravedad (Villalobos, 2023).
- **Temperatura:** Es un número gradiente físico que describe la energía interna de un sistema termodinámico, más concretamente, la energía cinética media de las partículas constituyentes del sistema, que indica su movimiento. Como no tiene nada

que ver con la masa física del cuerpo, es una propiedad intrínseca (Chávez et al., 2023).

- **Precipitación:** Cuando la lluvia, el aguanieve o la nieve caen sobre la superficie terrestre, se trata en realidad de agua líquida o sólida que se ha formado en la atmósfera (Cueva et al., 2023).
- **Cambio climático:** Abarca cualquier alteración del clima provocada por la actividad humana o por fenómenos naturales cíclicos. También se incluye el aumento de la temperatura global (Deza, 2024).
- **Radiación solar:** Debido a la emisión de energía solar en forma de radiación electromagnética, se trata de un fenómeno físico (González, 2021).
- **Calentamiento global:** Se trata de un aumento de las temperaturas medias de los océanos y la atmósfera a lo largo del tiempo (Huacani, 2019).
- **R-Studio:** Este entorno de desarrollo integrado en el lenguaje de programación R se centra en el análisis estadístico y las instantáneas. Ofrece funciones de gestión del espacio de trabajo, una consola, gráficos y un editor de sintaxis para la ejecución sencilla de código (Gutiérrez et al., 2024)
- **QGIS:** Es un programa de software de suministro abierto para sistemas GNU/Linux, Unix, Mac OS y Microsoft Windows. Permite manejar formatos ráster y vectoriales como shp, además de bases de datos especiales (Gutierrez et al., 2024).

2.3. MARCO TEÓRICO NORMATIVO

La Ley 30286 creó el Instituto Nacional de Investigación de Glaciares y Ecosistemas de Montaña (INAIGEM) del Ministerio del Ambiente, una institución técnica especializada. goza de independencia administrativa, funcional, tecnológica, económica y financiera, así como carácter jurídico de derecho público, y se rige por las autoridades nacionales. Su objetivo es fomentar el uso humano sostenible de los glaciares y ecosistemas alpinos a

través del desarrollo y crecimiento de la investigación científica y tecnológica en estos campos.

El Reglamento de Organización y Funciones (ROF) del Instituto Nacional de Investigación de Glaciares y Ecosistemas de Montaña (INAIGEM) fue aprobado mediante Decreto Supremo N° 004-2016-MINAM, de fecha 8 de julio de 2016, de conformidad con los lineamientos del Decreto Supremo N° 043-2006-PCM, Lineamientos para la elaboración y aprobación del Reglamento de Organización y Funciones - ROF por las entidades de la Administración Pública.

Artículo 4.- Competencias y fines generales de la Entidad

Sin perjuicio de las competencias y obligaciones especiales otorgadas a otras instituciones del Estado, el INAIGEM es la máxima autoridad en materia de investigación científica sobre glaciares y ecosistemas de montaña. Su objetivo es avanzar y ampliar la investigación científica y tecnológica sobre glaciares y ecosistemas de montaña y apoyar la gestión sostenible de estos ecosistemas en beneficio de las poblaciones o pueblos que los habitan o dependen de ellos, entre otras consideraciones como el género y la edad.

a) De acuerdo con la legislación vigente, la Autoridad Nacional del Agua, y los gobiernos regionales y locales, elaboran y recomiendan la aprobación de la Política Nacional y el Plan Nacional para los Glaciares y Ecosistemas de Montaña.

b) Investigar y seguir el comportamiento y la evolución de los glaciares y los ecosistemas de montaña, así como el impacto de la presión del medio ambiente y otras causas, y desarrollar las medidas preventivas necesarias.

2.4. HIPÓTESIS DE LA INVESTIGACIÓN

2.4.1. Hipótesis general

El retroceso de la cobertura glaciar del nevado Quelccaya de la cordillera Vilcanota es 5 % por la influencia negativa de los elementos climáticos durante el período 2010 - 2022.

2.4.2. Hipótesis específicas

- La cobertura glaciar del nevado Quelccaya de la cordillera Vilcanota es de 1500 ha durante el periodo 2010 - 2022.
- La temperatura influye al aumento del calor en el retroceso glaciar del nevado Quelccaya entre el 2010 - 2022.
- La precipitación influye al disminuir las lluvias en el retroceso glaciar del nevado Quelccaya entre el 2010 - 2022.

CAPÍTULO III

METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN

3.1. ZONA DE ESTUDIO

Con una elevación de 5,877 metros sobre el nivel del mar y ubicándose precisamente en las provincias de Canchis en la región Cusco y en la provincia de Carabaya en la región Puno, el nevado Quelccaya es el más imponente de los nevados que se encuentran en la cordillera del Vilcanota, y en la Zona 19 Sur, con coordenadas Este: 347 312,17 metros, y Norte: 8 462,313 metros, se muestra en la Figura 07.

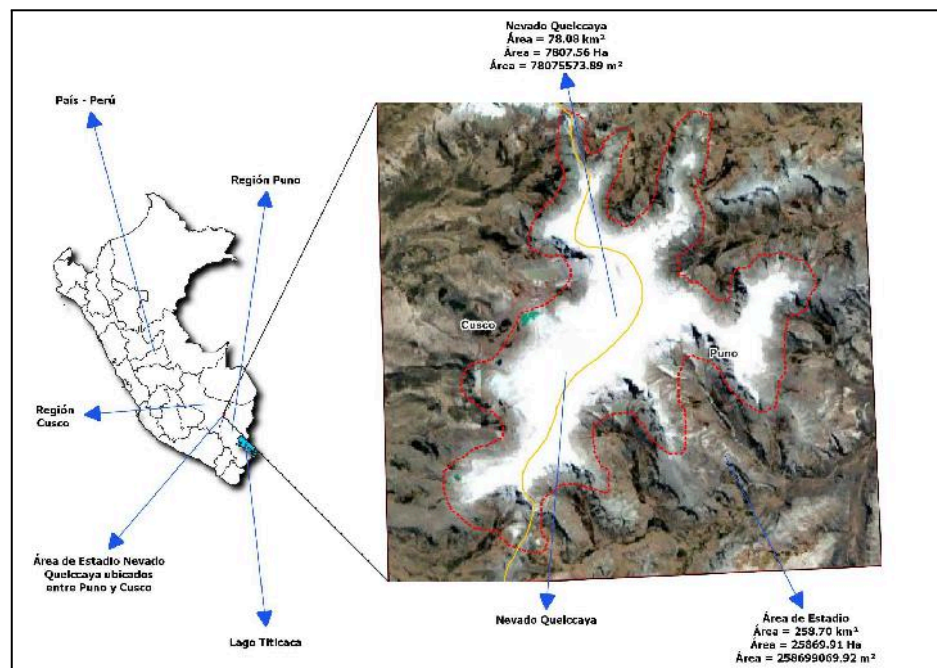


Figura 07: Mapa de Ubicación del Nevado Quelccaya.

- Ubicación Geopolítica

Tabla 01: Ubicación geopolítica del nevado Quelccaya.

Regiones		Provincias		Distritos	
→	Cusco	→	Canchis	→	Checacupe
→	Puno	→	Carabaya	→	Corani

3.2. POBLACIÓN Y MUESTRA

3.2.1. Población

La población está constituida por los glaciares de la cordillera Vilcanota, el cual se ubica en las regiones montañosas del Perú.

3.2.2. Muestra

La presente muestra es la superficie del nevado Quelccaya de los periodos de 2010 al 2022.

Muestreo

Probabilístico y no probabilístico son las dos formas de muestreo. La presente investigación se realizó mediante el muestreo intencional, que tiene la característica de elegir elementos a propósito, es un tipo de muestreo no probabilístico (Gamez, 2024).

Para la presente investigación se hizo en base al muestreo no probabilístico de tipo intencional, se seleccionó de forma directa el nevado Quelccaya de la cordillera Vilcanota.

3.3 MÉTODOS Y MATERIALES

3.3.1 Métodos

Tipo de investigación

Dado que la investigación tratará de cuantificar las zonas en las que la cubierta glaciar está retrocediendo debido a la influencia de factores climáticos, es coherente con el enfoque cuantitativo no experimental. Dado que se recopilaron datos estadísticos, es cuantitativo (Forero, 2024),

Diseño de Investigación.

El diseño descriptivo tiene la ventaja de que el investigador no manipula las variables.

3.3.2 Materiales

Equipos

- Computadora portátil, impresora, scanner.

Programas

- QGis (v3.26.17) y R-Studio (v4.3.1).

3.4 METODOLOGÍA

Método inductivo: Se refiere a la capacidad de razonamiento inductivo, que parte de indicios concretos y conduce a inferencias específicas. Para llegar a una generalización, se basa en la observación de hechos concretos (Jumbo et al., 2024).

Técnica de observación: Es el proceso de examinar atentamente una cosa para asimilar plenamente la naturaleza del todo, incluido su conjunto de datos, hechos y fenómenos (Mendoza et al., 2024).

Procedimientos:

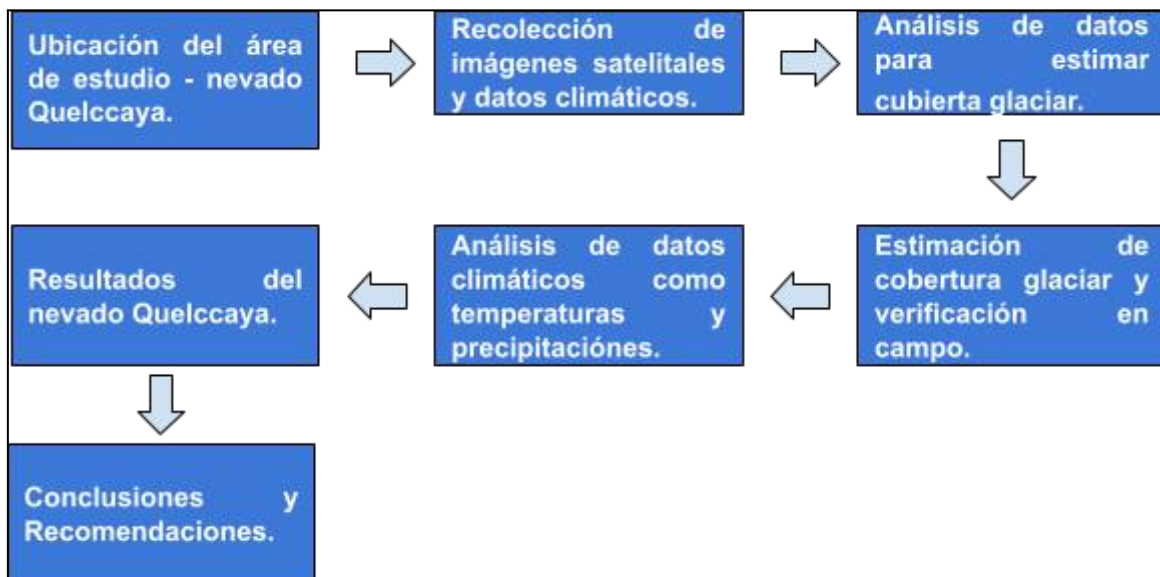


Figura 08: Fases del procedimientos de la investigación.

Metodología para el objetivo específico O1: Estimar el nivel de retroceso de la

cobertura glaciaria del nevado Quelccaya entre el 2010 - 2022. Se utilizaron imágenes satelitales Landsat 7, 8 y 9, que fueron obtenidas del USGS (United States Geological Survey) del área de estudio, para establecer los niveles de retroceso glaciario del nevado Quelccaya. Las imágenes satelitales facilitarán el acceso a los datos geoespaciales, los cuales fueron utilizados para determinar si existe un retroceso del nevado Quelccaya.

- **Definición del área (nevado Quelccaya).**

Sólo fue esencial una imagen satelital del USGS del cerro Quelccaya cubierto de nieve para definir la región de estudio. La coordenada UTM utilizada para mejorar la georreferenciación fue WGS84, y esto se logró utilizando el software Qgis, como se ilustra en la Figura 7.

- **Cálculo del Índice Diferencial Normalizado de Nieve (NDSI)**

En este estudio, la diferencia normalizada de dos bandas -el espectro visible y el infrarrojo cercano o infrarrojo de onda corta- se utilizó para calcular el NDSI (Índice de Diferencia Normalizada). Esta información se introdujo en la Calculadora Raster/Raster, donde los cálculos se realizaron utilizando las siguientes fórmulas.

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

Donde:

- $NDSI (Landsat 8) = (B3 - B6) / (B3 + B6)$
- $NDSI (Landsat 4 - 7) = (B2 - B5) / (B2 + B5)$

- **Cálculo del Índice Glaciar Diferencial Normalizado (NDGI)**

Las diferencias normalizadas del espectro visible y de las bandas del infrarrojo cercano o del infrarrojo de onda corta se introdujeron en la calculadora de raster para calcular el NDGI (Índice de Diferencia Normalizada) de esta investigación. A continuación, se utilizaron las siguientes fórmulas para completar el cálculo en este índice.

$$NDGI = \frac{(NIR-Green)}{(NIR+Green)}$$

Donde:

- NDGI (Landsat 8) = (B3 – B4) / (B3 + B4)
- NDGI (Landsat 4 – 7) = (B2 – B3) / (B2 + B3)
- **Extracción de cobertura de nieve periodo (2010-2022)**

Esta condición se establece en el USGS, razón por la cual no se realiza ningún procedimiento adicional para eliminar las perturbaciones atmosféricas en las imágenes extraídas del United States Geological Survey. Para esto se ingresa a Raster/Calculator raster, se establece que el proceso de extracción de píxeles mayores a (0.4 -1) μ m umbral se establece a partir del índice NDSI, siendo que este valor menciona la cubierta de nieve.

$$“NDSI” > (0,4 -1) \mu m.$$

- **Determinación de tasa de cambio anual**

Por otro lado, se aplicó la fórmula matemática más utilizada para calcular la tasa anual de cambio de cobertura de nieve, de tal manera que permita la comparación de resultados de diferentes periodos. La ecuación corresponde a la utilizada por la (FAO, 1996) y esta sería equivalente a la tasa de interés utilizada en los cálculos financieros.

$$Td = \left[\left(\frac{S_2}{S_1} \right)^{1/n} - 1 \right] * 100$$

Donde:

Td = Tasa de deforestación en porcentajes

S_2 = Área arboleda en el año final

S_1 = Área arboleda en el año inicial.

n = Número de años del periodo de análisis.

Metodología para el objetivo específico O2: Evaluar la influencia de la temperatura en el retroceso de la cobertura glaciario del nevado Quelccaya entre el 2010 - 2022. Los datos

necesarios se obtuvieron de la página TerraClimate, que es la más próxima a la región de estudio (el nevado de Quelccaya).

Dado que los datos obtenidos en la página TerraClimate mencionan que durante las fechas donde hay heladas, nubosidad y precipitaciones, se tomó en cuenta que estas fechas son las más adecuadas para la toma de datos como imágenes de satélite. Las fechas más adecuadas son entre los meses de agosto y octubre.

Metodología para el objetivo específico O3: Analizar el impacto potencial de las precipitaciones entre 2010 y 2022 sobre la cobertura glaciaria de Quelccaya. Los datos necesarios fueron recopilados de la página TerraClimate, se consideró la más próxima a la zona de estudio (el nevado del Quelccaya).

3.5. IDENTIFICACIÓN DE VARIABLES

Causa o variable independiente (VI): Influencia de los elementos climáticos.

Efecto o variable dependiente (VD): Retroceso de la cobertura.

Tabla 02: Operacionalidad de Variables.

Variables	Indicadores	Escala de Medición	Tipos de variables
(VI) Influencia de los elementos climáticos.	Temperaturas		
	Máximas	°C	Independiente
	Mínimas	°C	
	Mensual	°C	
	Anual	°C	
Precipitación			
(VD) Retroceso de la cobertura.	Mensual	mm	Dependiente
	Anual	mm	
	Áreas	km ²	
		Ha	
		%	

3.6. MÉTODO O DISEÑO ESTADÍSTICO

Para investigar la influencia de la temperatura en el retroceso glaciar del nevado Quelccaya durante el periodo de 2010 a 2022, se ha diseñado un enfoque estadístico que incluye una hipótesis nula (H_0) y una hipótesis alternativa (H_A). Antes de proceder con el análisis, es crucial evaluar si los datos cumplen con el supuesto de normalidad, ya que esto influirá en el tipo de prueba estadística a utilizar. Para ello, se pueden aplicar el test de Shapiro-Wilk o el test de Kolmogorov-Smirnov, con el fin de determinar si los datos de temperatura y el retroceso glaciar siguen una distribución normal (Cabrera, 2023).

Si se establece que los datos son normales, se podría utilizar métodos paramétricos, como el análisis de regresión lineal, para investigar la relación entre temperatura y retroceso glaciar. En cambio, si los datos no cumplen con la normalidad, se deberá recurrir a pruebas no paramétricas, como la correlación de Spearman, para evaluar la asociación entre las variables (Cabrera, 2023).

Una vez efectuados los análisis estadísticos, se calculará el valor p. En caso de que el valor p sea menor o igual a 0.05 (α), se procederá a rechazar la hipótesis nula, lo que indicaría que hay suficiente evidencia para aceptar la hipótesis alternativa, sugiriendo que la temperatura tiene un efecto significativo en el retroceso glaciar. Si, por otro lado, el valor p es mayor a 0.05, no se podrá rechazar la hipótesis nula, lo que implica que no hay pruebas suficientes para afirmar que la temperatura influye en el retroceso del glaciar Quelccaya en el periodo analizado. Este planteamiento estadístico establece un marco claro para la toma de decisiones en función de los resultados obtenidos.

CAPÍTULO IV

EXPOSICION Y ANALISIS DE LOS RESULTADOS

4.1. EXPOSICIÓN Y ANÁLISIS DE LA ESTIMACIÓN DEL ÁREA DEL RETROCESO DE LA COBERTURA GLACIAR DEL NEVADO QUELCCAYA ENTRE EL 2010 - 2022.

La estimación del retroceso de la cobertura glaciar del Nevado Quelccaya entre los años 2010 y 2022 mostró una notable disminución. Durante ese tiempo, la superficie del glaciar se redujo de manera significativa, reflejando un proceso de retroceso acelerado. En el año 2010, la extensión del glaciar era mayor en comparación con el 2022, cuando se evidenció una notable reducción.

Tabla 03: Estimación del retroceso glaciar del Nevado Quelccaya durante el 2010 y 2022.

Periodos	Área en (km ²)	Área en (Ha)	Tasa de retroceso glaciar en (km ²)	Tasa de retroceso glaciar en (%)	Porcentaje (%)
2010	40.4631	4046.31	0	0	8%
2011	43.9488	4394.88	3.4857	8.6145	8%
2012	47.7504	4775.04	3.8016	8.6500	9%
2013	40.8375	4083.75	-6.9129	-14.4771	8%
2014	42.3909	4239.09	1.5534	3.8038	8%
2015	43.1631	4316.31	0.7722	1.8216	8%
2016	40.0455	4004.55	-3.1176	-7.2228	7%
2017	39.7359	3973.59	-0.3096	-0.7731	7%
2018	40.1535	4015.35	0.4176	1.0509	7%
2019	39.5658	3956.58	-0.5877	-1.4636	7%
2020	38.9286	3892.86	-0.6372	-1.6104	7%
2021	40.3614	4036.14	1.4328	3.6805	8%
2022	38.5641	3856.41	-1.7973	-4.4530	7%
TOTAL	535.9086	53590.86	-1.899	-2.3786	100%

En la tabla 03, se muestran las diferencias en la velocidad de retroceso, siendo más lenta al inicio del periodo y acelerándose progresivamente en los últimos años, lo que indica un aumento en la tasa de deshielo. Este fenómeno estuvo vinculado al incremento de las

temperaturas en la región, junto con otros factores climáticos que contribuyeron a la pérdida de la masa glaciar. Entre 2010 y 2022, el nevado Quelccaya mostró una reducción en su superficie glaciar, disminuyendo del 8% en 2010 al 7% en 2022, lo que equivale a una pérdida del 1%. Este retroceso evidencia la continua disminución de los glaciares, influenciada por factores como el cambio climático, y señala posibles consecuencias importantes para los ecosistemas y las fuentes de agua en la zona durante el periodo estudiado.

DISCUSIÓN DE RESULTADOS

Por otro lado concuerdan con **(Hidalgo et al., 2024)** donde estimó el retroceso de los glaciares en toda la cordillera de los Andes, Ecuador, Este estudio busca analizar el retroceso del glaciar Carihuairazo y sus efectos sobre la comunidad cercana de Cunucyacu. Los resultados muestran que, para el año 2021, el glaciar ha perdido el 99% de su superficie registrada en 1956, quedando en 0.34 km². El modelo utilizado simula la variación de la extensión glaciar durante 67 años, observándose una disminución constante a partir de 1978.

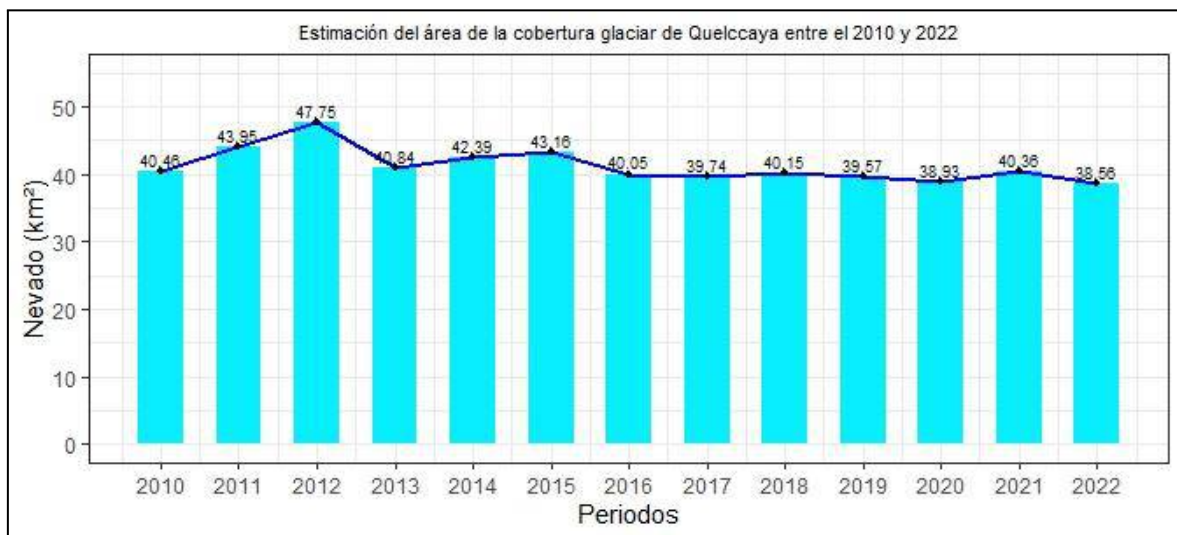


Figura 09: Estimación de la cobertura glaciar de Quelccaya entre el 2010 y 2022.

En la figura 09; entre 2010 y 2022, el nevado Quelccaya sufrió una notable reducción en su cobertura glaciar. En 2010, la superficie del glaciar alcanzaba los 40.4631 km², pero

para 2022 disminuyó a 38.5641 km². Esto supone una pérdida de -1.899 km² en 12 años, lo que refleja una reducción continua de la masa glaciar, vinculada a los impactos del cambio climático. El retroceso del glaciar Quelccaya, el más extenso de los glaciares tropicales a nivel mundial, genera especial preocupación debido a su impacto en el equilibrio del agua en la región. Este glaciar desempeña un papel fundamental en el control de los flujos de agua dulce, que abastecen a ríos y lagunas esenciales para el agua potable de las poblaciones cercanas, así como para la agricultura y la producción de energía hidroeléctrica. La disminución de su tamaño también afecta a la biodiversidad y a los ecosistemas cercanos, donde las especies adaptadas a climas fríos podrían estar en riesgo debido a la pérdida de su hábitat.

DISCUSIÓN DE RESULTADOS

Por otro lado concuerda con **(Barrientos, 2023)** estudió los glaciares de los Nevados Japu Punta y Yayamari, Cusco. en el análisis de los glaciares de Japu Punta y Yayamari, se identificaron 11 glaciares y se calculó una disminución de 5.01 km² en la superficie glaciar, además de un incremento de 59 metros en la altitud de la línea de equilibrio en un período de 30 años (1992-2022), lo que refleja una tasa de desglaciación de 0.167 km² por año y 1.967 metros por año, respectivamente.

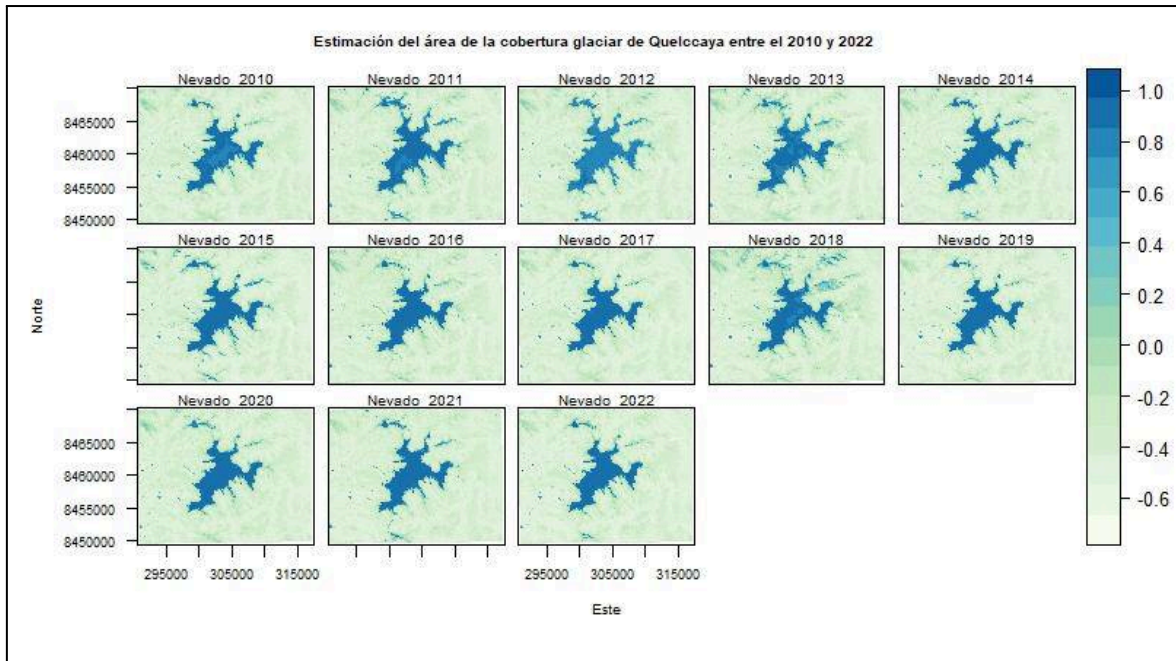


Figura 10: Estimación de la cobertura glaciar de Quelccaya entre el 2010 y 2022.

En la figura 10; entre 2010 y 2022, se evaluó el retroceso del glaciar en el nevado Quelccaya empleando un umbral de más o > 0.8 para definir las zonas cubiertas por nieve. Las áreas con valores por debajo de este umbral corresponden a otras coberturas, como suelo desnudo o vegetación. A lo largo de este periodo, se observó una reducción significativa en la superficie glaciar, lo que muestra una clara tendencia de retroceso atribuida al cambio climático. Este fenómeno tiene consecuencias relevantes para los ecosistemas locales y los recursos hídricos de la región. El rápido retroceso del glaciar Quelccaya es una evidencia clara de cómo el cambio climático está afectando a los glaciares tropicales, los cuales son especialmente frágiles debido a su ubicación cercana al ecuador y su alta sensibilidad a variaciones mínimas en la temperatura. Si esta tendencia persiste, se prevé que en las próximas décadas la pérdida de masa glaciar aumentará, lo que podría tener graves repercusiones en la disponibilidad de agua y el equilibrio ecológico de la zona.

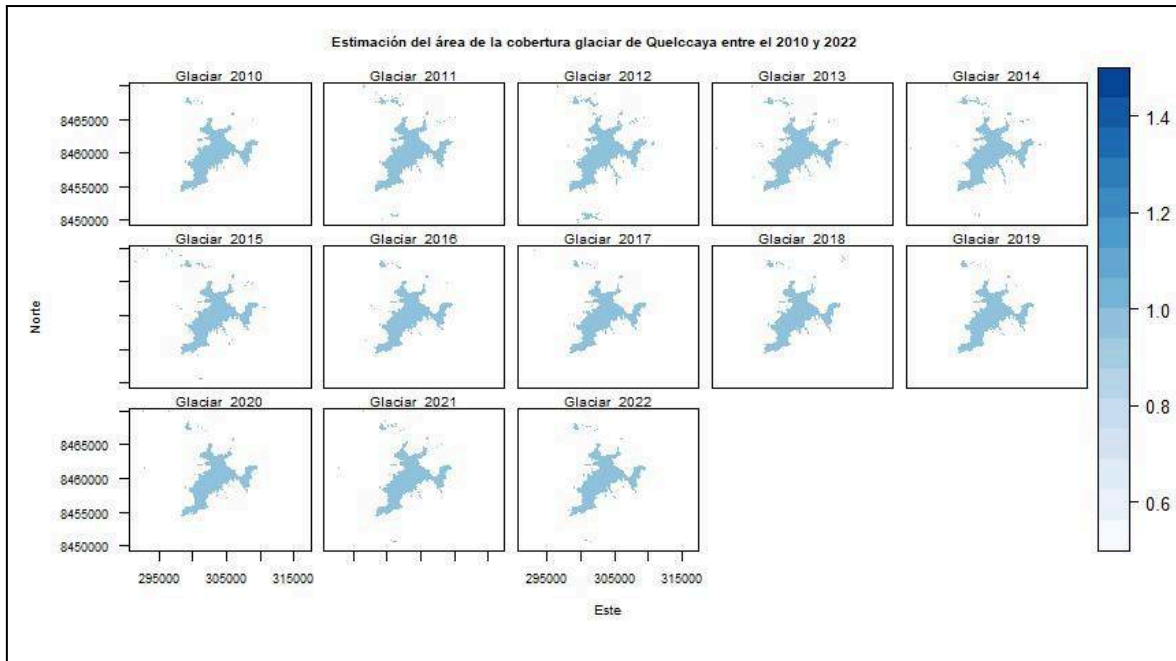


Figura 11: Estimación de la cobertura glaciar de Quelccaya entre el 2010 y 2022.

En la figura 11; entre 2010 y 2022, se registró un marcado retroceso en el glaciar del nevado Quelccaya. Durante estos años, la extensión de la masa de hielo se redujo considerablemente, lo que señala una pérdida sostenida del glaciar. Este fenómeno está vinculado, en gran parte, a factores relacionados con el cambio climático, que impactan tanto la estabilidad de los ecosistemas de montaña como los recursos hídricos derivados del deshielo.

Tabla 04: Estadística descriptiva del retroceso glaciar del Nevado Quelccaya.

Var.	Media	Mediana	Desviación estándar	Mínimo	Máximo	Coef. de asimetría	Curtosis
Glaciar	41.22	40.36	2.52	38.5641	47.7504	1.61	2.79

Nivel de confianza(95.0%)

En la tabla 04; se muestra la estadística descriptiva de la estimación del área del retroceso glaciar del nevado Quelccaya entre 2010 y 2022, a partir de 13 periodos

observados, muestra una media de 41.22 km², que representa el promedio de la cobertura glaciar durante este periodo. La mediana, de 40.36 km², señala el punto medio de los datos, mientras que una desviación estándar de 2.52 km² indica una dispersión moderada en torno a la media. La cobertura mínima registrada fue de 38.56 km² y la máxima de 47.75 km², lo que indica variaciones en la reducción glaciar. El coeficiente de asimetría, con un valor positivo 1.61, indica una distribución sesgada hacia a la derecha con valores más altos, por otro lado hay concentraciones de valores en el extremo izquierdo con valores más bajos, esto significa que, aunque en la mayoría de los años el retroceso glaciar fue más moderado, hubo ciertos periodos donde la reducción fue más significativa, mientras que la curtosis de 2.79 sugiere que los datos tienden a concentrarse en torno a la media más que en una distribución normal. Con un nivel de confianza del 95%, estos resultados ofrecen una visión clara de la magnitud y variabilidad del retroceso glaciar.

Tabla 05: Prueba de normalidad ‘Shapiro-Wilk’ del Nevado Quelccaya.

Variable	Statistic	<i>p-values</i>
Glaciar	0.840	0.0215
Nivel de confianza(95.0%)		

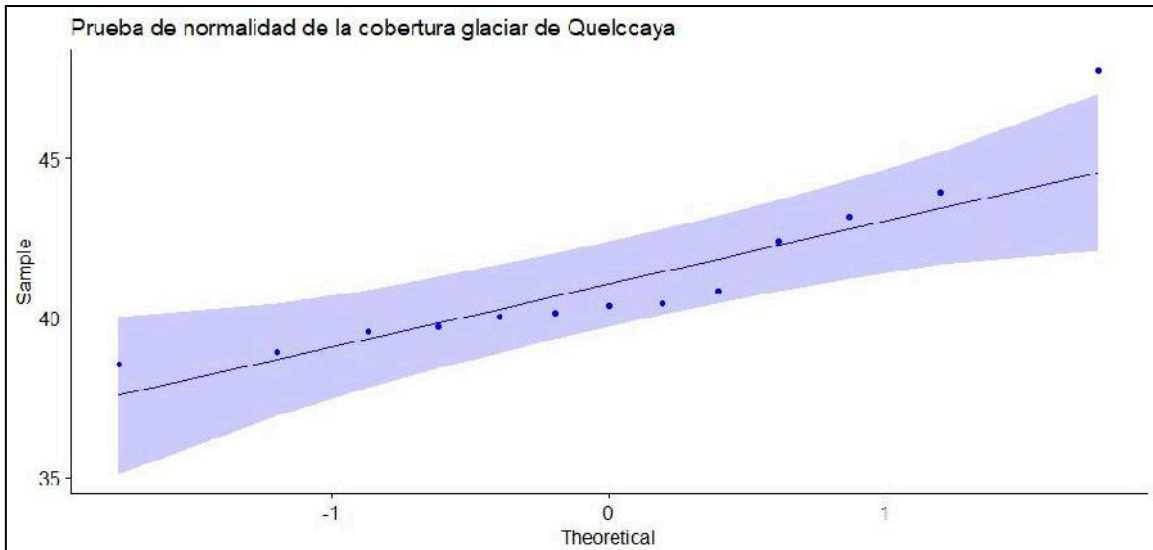


Figura 12: Prueba de normalidad ‘Shapiro-Wilk’ del Nevado Quelccaya.

En la tabla 05 y en la figura 12; se muestra la prueba de normalidad ‘Shapiro-Wilk’ aplicada a los datos del Nevado Quelccaya resultó en un *p-valor* de 0.0215, lo cual es ‘<’ o inferior al nivel de significancia de 0.05, indicando que los datos no siguen una distribución normal. Por lo tanto, se concluye que no son paramétricos. La prueba estadística más adecuada para la evaluación es el coeficiente de correlación de Spearman, ya que es una prueba no paramétrica.

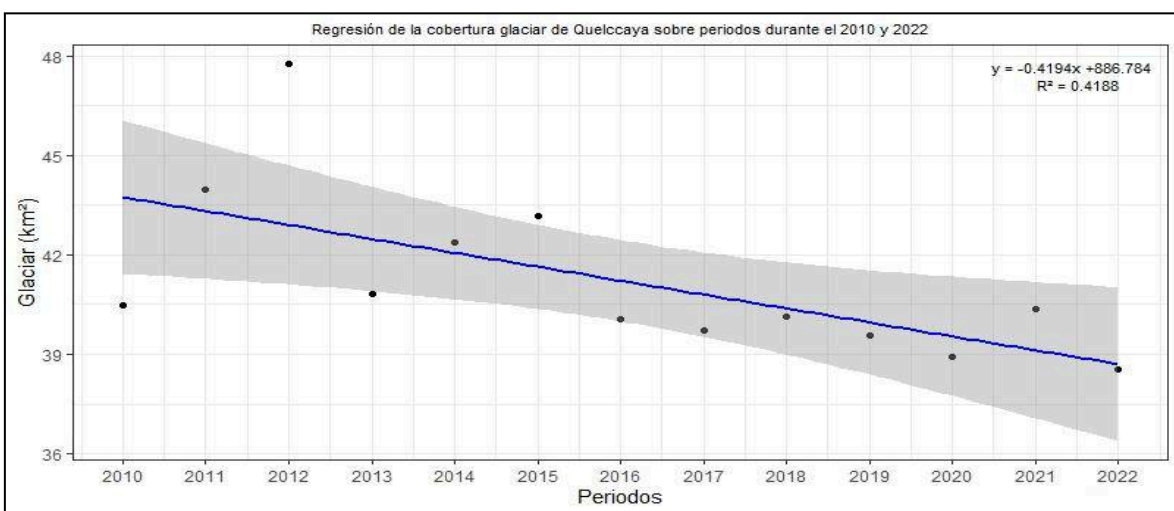


Figura 13: Regresión del retroceso glaciar sobre periodos.

En la figura 13; se muestra la regresión sobre el retroceso del glaciar Quelccaya en función de los periodos ha revelado un valor de $R^2 = 0.4188$, lo que significa que

alrededor del 41.88% de la variabilidad del retroceso glaciar sobre el tiempo. La correlación negativa observada indica que, con el paso del tiempo, el retroceso del glaciar tiende a incrementarse, lo que refleja una tendencia continua de deshielo.

Asimismo, la correlación negativa observada en el análisis sugiere que, a medida que avanza el tiempo, el retroceso del glaciar aumenta, lo que indica una tendencia continua de deshielo. Esto implica que el glaciar está sufriendo una pérdida constante de masa.

Tabla 06: Pronóstico de la cobertura glaciar de Quelccaya al 2050.

Períodos futuros	Área del glaciar en (km²) proyectados	Métricas para evaluar la precisión del modelo de predicción estadística.	
		Raíz del Error Cuadrático Medio (RMSE)	Error Absoluto Medio (MAE)
2030	35.35	0.001792	0.001792
2040	31.15	0.007545	0.007545
2050	26.96	0.003298	0.003298
Total	93.46	0.00421167	0.00421167

En la tabla 06; se muestra el pronóstico del retroceso del glaciar de Quelccaya, realizado a través de un modelo de regresión, indica que su superficie alcanzará 35.35 km² en 2030, y se reducirá a 31.15 km² en 2040, y a 26.96 km² en 2050. Este escenario refleja una alarmante tendencia de deshielo continuo en los próximos años. La validación del modelo revela un Error Cuadrático Medio (RMSE) y un Error Absoluto Medio (MAE) promedio de 0.00421167, lo que sugiere un alto grado de precisión en las proyecciones. Este pequeño margen de error indica que las estimaciones se ajustan adecuadamente a

los datos observados, lo que respalda la capacidad del modelo para reflejar la dinámica del retroceso glaciar. Estos hallazgos subrayan la importancia de un monitoreo constante del glaciar Quelccaya, considerando el efecto del cambio climático en su volumen de hielo.

Estas proyecciones indican un preocupante deterioro de la masa de hielo del glaciar en las próximas décadas, evidenciando la seriedad del cambio climático y su efecto en los glaciares tropicales. Este deshielo plantea no sólo un riesgo en relación con la disponibilidad de agua para las comunidades locales, sino que también pone de manifiesto la imperante necesidad de supervisar y abordar las causas que están detrás de esta tendencia.

4.2. EXPOSICION Y ANALISIS DE LA DETERMINACIÓN LA INFLUENCIA DE LA TEMPERATURA EN EL RETROCESO DE LA COBERTURA GLACIAR DEL NEVADO QUELCCAYA ENTRE EL 2010 - 2022.

El estudio multitemporal sobre la reducción de la cobertura glaciar del nevado Quelccaya entre 2010 y 2022 evidencia una relación notable con el incremento de la temperatura media anual en la zona. Durante este intervalo, la superficie glaciar mostró una disminución constante, con una aceleración en los años más cálidos. Los datos climáticos reflejan un aumento paulatino tanto en las temperaturas máximas como mínimas, lo que favoreció el proceso de deshielo, afectando principalmente las zonas de menor altitud. Además, las imágenes satelitales Landsat y los registros térmicos sugieren que las fases de mayor retroceso glaciar coincidieron con periodos de anomalías térmicas, lo que apoya la idea de que el calentamiento global ha sido un factor determinante en la reducción de la cobertura glaciar del nevado Quelccaya.



Figura 14: Temperaturas máximas y mínimas del nevado Quelccaya.

En la figura 14; se muestra que entre 2010 y 2022, las temperaturas máximas y mínimas del nevado Quelccaya han experimentado un cambio significativo. En 2010, la temperatura máxima fue de 8.79 °C, mientras que la mínima se registró en -8.18 °C. Para 2022, ambos valores mostraron un aumento, alcanzando una temperatura máxima de 9.30 °C y una mínima de -7.38 °C. Esto representa un incremento de +0.54 °C en la temperatura máxima y de +0.79 °C en la mínima. Estos aumentos sugieren un claro patrón de calentamiento en la zona, lo que podría tener importantes repercusiones en la dinámica del glaciar y en los ecosistemas aledaños, así como en las comunidades que dependen de los recursos hídricos que este glaciar proporciona. Por otro lado concuerda con (Chávez et al.,2023), en la Cordillera Blanca, Ancash, El objetivo de esta tesis fue analizar el impacto del cambio climático en los glaciares de la vertiente occidental de la subcuenca de Ranrahirca. En su resultado del Escenario A (sin cambio), persistirían 5 lagunas glaciares; en el Escenario B (+1°C), 10 lagunas glaciares; en el Escenario C (+2°C), 22 lagunas glaciares; en el Escenario D (+3°C), 25 lagunas glaciares; y en el Escenario E (+4°C), 34 lagunas glaciares desaparecerían.

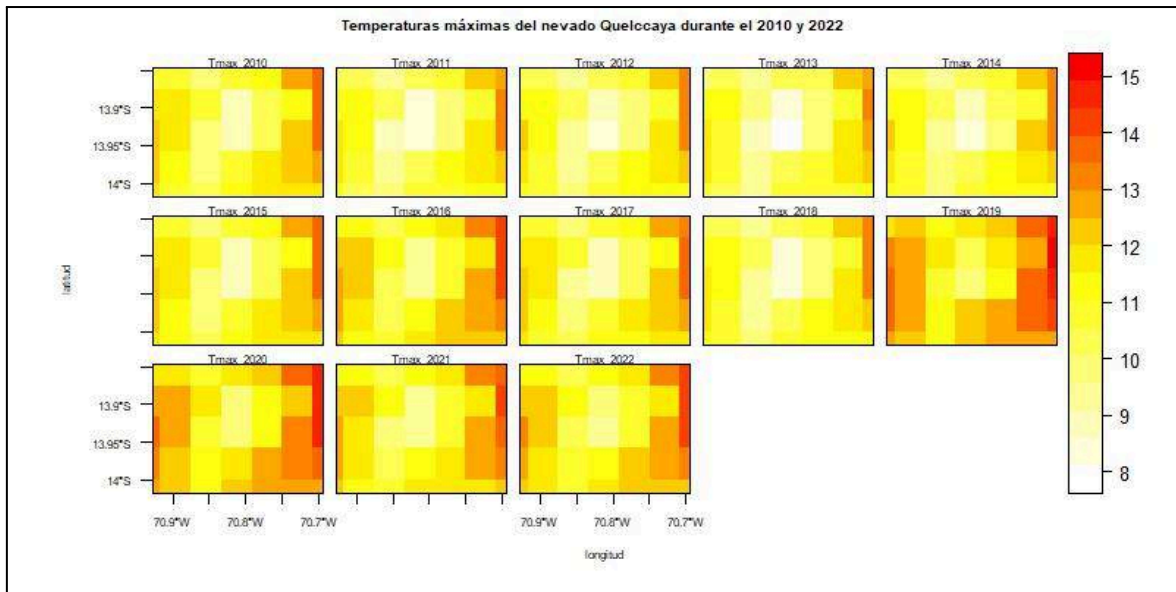


Figura 15: Imagen de temperaturas máximas del nevado Quelccaya.

En la figura 15; se muestra la imagen que ilustra las temperaturas máximas del nevado Quelccaya durante el 2010 y 2022 se registraron temperaturas superiores a 14 °C. Este dato sugiere un notable calentamiento en la zona, ya que temperaturas que superan este umbral pueden tener repercusiones significativas en la masa de hielo del glaciar. Las elevadas temperaturas observadas en estos años reflejan un cambio climático en curso que podría comprometer la estabilidad del glaciar, acelerando su retroceso y afectando tanto a los ecosistemas locales como a la disponibilidad de agua para las comunidades aledañas. Este patrón pone de manifiesto la urgencia de un monitoreo constante y de la implementación de estrategias para abordar los efectos del calentamiento en esta región tan sensible.

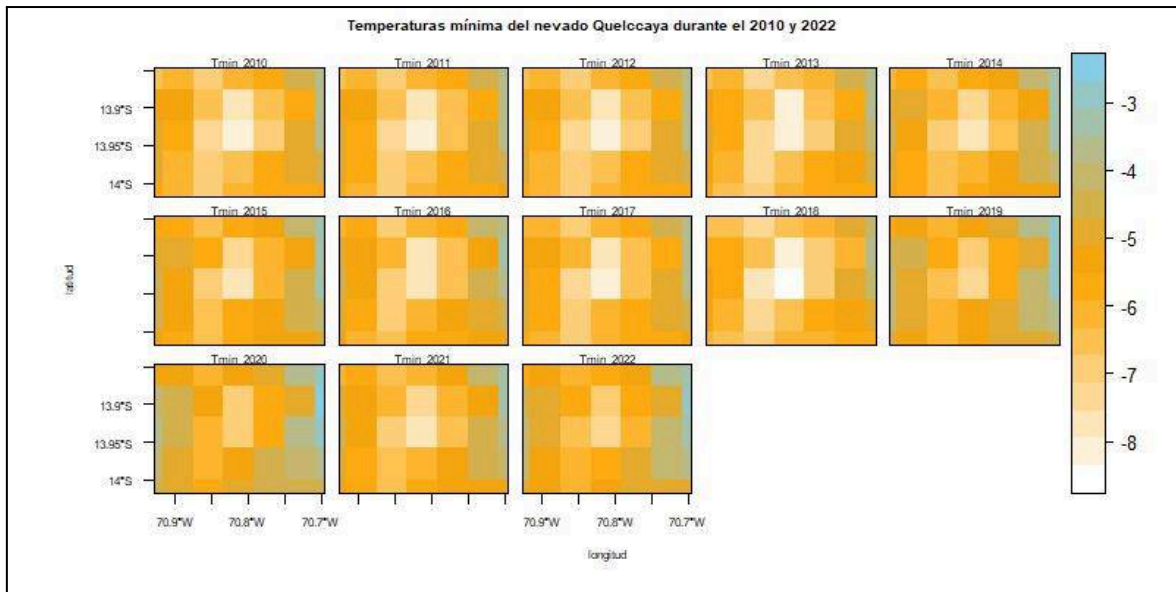


Figura 16: Imagen de temperaturas mínimas del nevado Quelccaya.

En la figura 16; Imagen que muestra las temperaturas mínimas del nevado Quelccaya revela que en 2010 y 2022 se registraron valores por debajo de $-8\text{ }^{\circ}\text{C}$. Este hecho destaca la continuidad de condiciones frías en la región, a pesar del incremento de las temperaturas máximas observadas en esos años. Las temperaturas mínimas en este rango sugieren un entorno que, aunque está experimentando un calentamiento, sigue teniendo noches frías que podrían afectar la dinámica del glaciar. No obstante, la coexistencia de temperaturas mínimas más altas junto con temperaturas máximas elevadas indica un cambio en el equilibrio térmico, lo que podría impactar la masa de hielo y, a largo plazo, influir en el ecosistema circundante y en la disponibilidad de agua para las comunidades que dependen de estos recursos. Este patrón resalta la necesidad de un monitoreo constante de las temperaturas en la región para comprender mejor cómo el cambio climático está afectando al glaciar Quelccaya.

Tabla 07: Estadística descriptiva de las temperaturas máximas y mínimas.

Var.	Media	Mediana	Desviación estándar	Mínimo	Máximo	Coef. de asimetría	Curtosis
Tmax	8.82	8.75	0.60	8.1	9.92	0.59	-0.71
Tmin	-7.85	-7.91	0.39	-8.36	-7.12	0.56	-0.80

Nivel de confianza(95.0%)

En la tabla 07; se aprecia el análisis estadístico de las temperaturas en el nevado Quelccaya muestra que la temperatura máxima tiene una media de 8.82 °C y una mediana de 8.75 °C, con una desviación estándar de 0.60 °C, lo que sugiere cierta variabilidad en los datos recopilados. Las temperaturas máximas oscilan entre 8.1 °C como mínima y 9.92 °C como máxima. Un coeficiente de asimetría de 0.95 indica que la distribución está ligeramente sesgada hacia la derecha, lo que implica que existen algunos valores más altos que son relativamente poco frecuentes. Por otro lado, una curtosis de -0.71 señala que la distribución es bastante plana en comparación con una distribución normal. En lo que respecta a las temperaturas mínimas, la media es de -7.85 °C y la mediana es -7.91 °C, con una desviación estándar de 0.39 °C, indicando menor variabilidad en estos datos. Las temperaturas mínimas se encuentran entre -8.36 °C y -7.12 °C. El coeficiente de asimetría de 0.56 sugiere también una ligera inclinación hacia la derecha, y la curtosis de -0.80 confirma que la distribución es relativamente plana. Estos hallazgos ponen de manifiesto la estabilidad de las temperaturas mínimas en contraste con la variabilidad de las máximas, lo cual es crucial para entender cómo las condiciones climáticas están evolucionando en esta área y su efecto en el glaciar y su entorno ecológico.

Tabla 08: Prueba de normalidad ‘Shapiro-Wilk’ de las temperaturas.

Variables	Statistic	<i>p-values</i>
Tmax	0.919	0.243
Tmin	0.937	0.423

Nivel de confianza(95.0%)

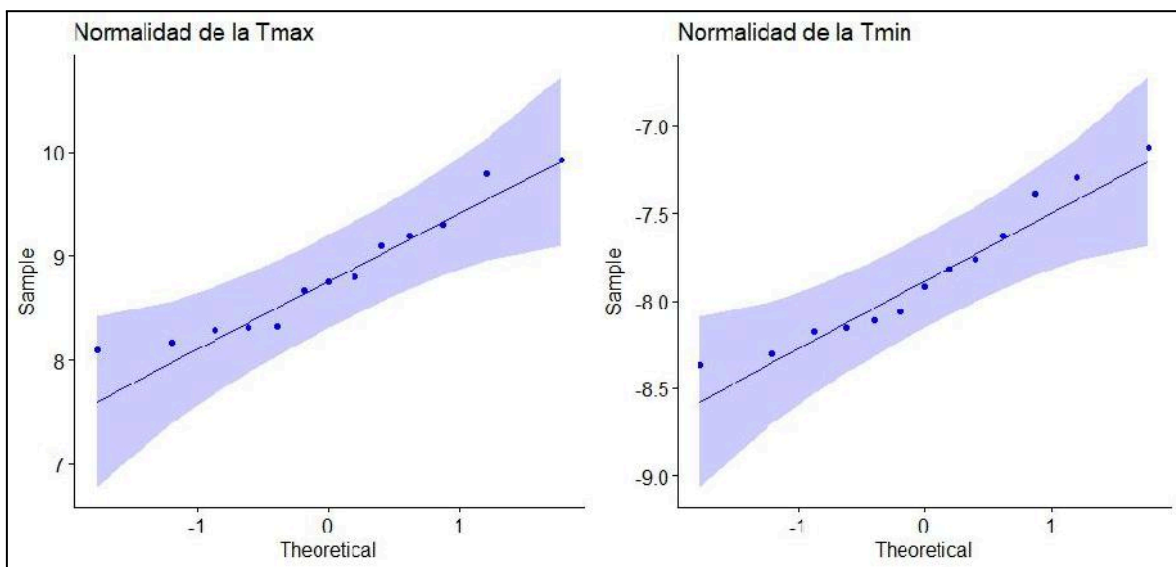


Figura 17: Prueba de normalidad ‘Shapiro-Wilk’ de las temperaturas.

En la tabla 08 y en la figura 17; se muestran los resultados de la prueba de normalidad de Shapiro-Wilk indican que el *p-valor* para la temperatura máxima es 0.243 y para la temperatura mínima es 0.423. Ambos valores son superiores al umbral de significancia de 0.05, esto implica que las distribuciones de las temperaturas máximas y mínimas son normales y se concluye que son paramétricos. Dado que los datos son paramétricos, es apropiado emplear el coeficiente de correlación de Pearson para examinar la relación entre las variables. Esta prueba supone que los datos tienen una distribución normal y se utiliza para evaluar la fuerza y la dirección de una relación lineal entre dos variables.

4.3. EXPOSICION Y ANALISIS DE LA DETERMINACIÓN LA INFLUENCIA DE LA PRECIPITACIÓN EN EL RETROCESO DE LA COBERTURA GLACIAR DEL NEVADO QUELCCAYA ENTRE EL 2010 - 2022.

El análisis de la influencia de la precipitación en el retroceso de la cobertura glacial del nevado Quelccaya durante el periodo de 2010 a 2022 muestra una conexión notable entre esta variable. A lo largo de estos años, se ha evidenciado que las fluctuaciones en los niveles de precipitación están asociadas con el comportamiento del glaciar. En los años donde se registraron precipitaciones más altas, la tasa de retroceso del glaciar fue menor, lo que indica que la acumulación de nieve y hielo puede mitigar, al menos en parte, la pérdida de masa glacial debido al calentamiento global.

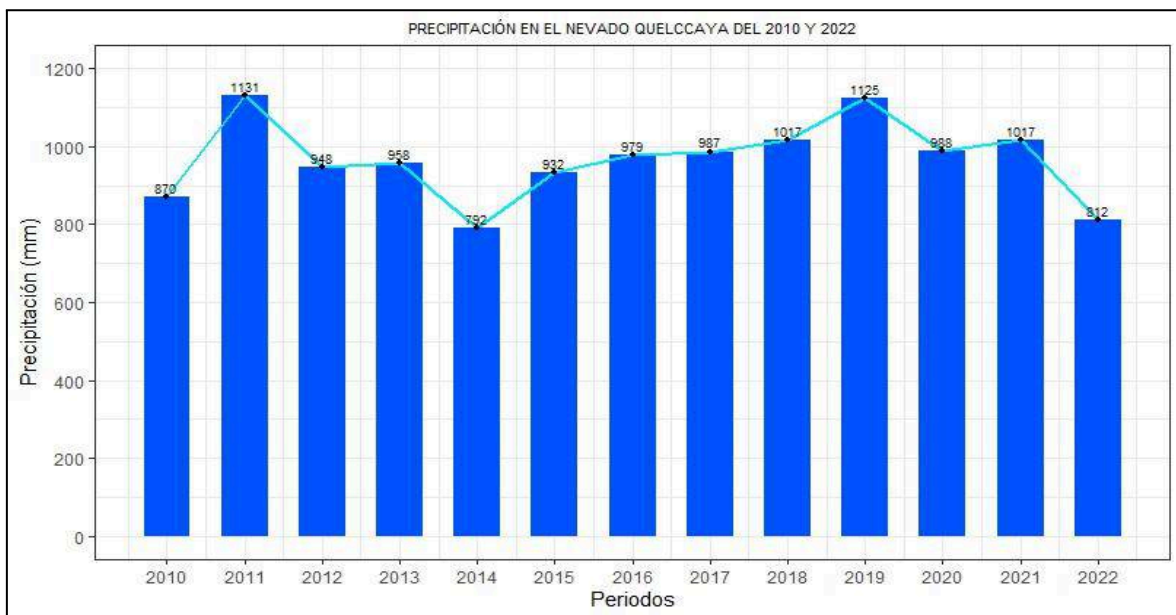


Figura 18: Precipitación acumulada del nevado Quelccaya.

En la figura 18; se aprecia que la precipitación acumulada en el nevado Quelccaya ha experimentado una notable reducción entre 2010 y 2022. En 2010, se registró un total de 870 mm, mientras que en 2022 la cifra descendió a 812 mm, lo que equivale a una disminución de -58 mm. Esta reducción en las precipitaciones podría tener consecuencias significativas para el glaciar, ya que una menor acumulación de nieve y hielo podría incrementar la tasa de retroceso del glaciar y reducir la masa de hielo total. Este cambio

en los niveles de precipitación subraya la importancia de llevar a cabo un monitoreo constante para comprender mejor los efectos del cambio climático en la zona y cómo estos impactan tanto en el ecosistema como en las comunidades que dependen de los recursos hídricos que genera el nevado Quelccaya. Por otro lado concuerda con **(Cabrera et al., 2023)**, en los Andes ecuatorianos, este estudio tuvo como objetivo cuantificar la pérdida de la cobertura glaciar del nevado Cayambe, ubicado en la provincia de Pichincha, Ecuador, durante las últimas décadas (1990-2020). En sus resultados las tendencias de las variables climáticas no son estadísticamente significativas, se observa un aumento en la temperatura y una disminución en la precipitación.

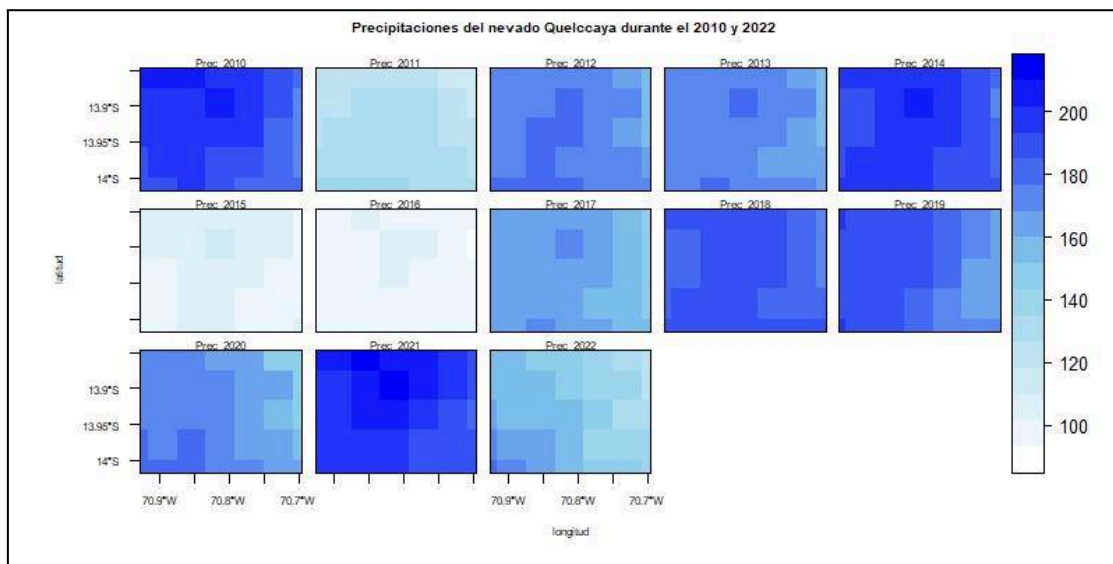


Figura 19: Imágenes de las precipitaciones del nevado Quelccaya.

En la figura 19; se muestran las imágenes que muestran las precipitaciones en el nevado Quelccaya revelan una notable variación en los niveles de precipitación en la región. Se puede observar que las áreas con precipitaciones superiores a 180 mm favorecen una mayor acumulación de nieve, lo que podría beneficiar la masa del glaciar. Por otro lado, las zonas con precipitaciones inferiores a 140 mm reflejan condiciones de baja acumulación, lo que puede resultar en un déficit de nieve y, en consecuencia, un incremento en el retroceso del glaciar. Esta diferencia en los niveles de precipitación

subraya la necesidad de realizar un seguimiento constante de estas condiciones, ya que tienen un impacto directo en la dinámica del glaciar y en la disponibilidad de recursos hídricos para las comunidades locales, así como en los ecosistemas que dependen de ellos.

Tabla 09: Estadística descriptiva de las precipitaciones.

Var.	Media	Mediana	Desviación estándar	Mínimo	Máximo	Coef. de asimetría	Curtosis
Prec.	965.84	979	101.46	792	1131	-0.09	-0.07

Nivel de confianza(95.0%)

En la tabla 09; se muestra el análisis descriptivo de las precipitaciones en el nevado Quelccaya muestra que la media se establece en 965.84 mm, con una mediana de 979 mm, lo que indica que la mayoría de los registros tienden a concentrarse en niveles altos de precipitación. La desviación estándar de 101.46 mm sugiere una variabilidad moderada en las cifras de precipitación, abarcando un rango que va desde un mínimo de 792 mm hasta un máximo de 1131 mm. Un coeficiente de asimetría de -0.09 indica que la distribución de las precipitaciones es casi simétrica, con una ligera inclinación hacia la izquierda. Además, la curtosis de -0.07 señala que la distribución es relativamente plana en comparación con una distribución normal. Estos hallazgos son relevantes, ya que subrayan la consistencia en los patrones de precipitación, lo cual puede influir significativamente en la salud del glaciar.

Tabla 10: Prueba de normalidad ‘Shapiro-Wilk’ de las precipitaciones.

Variable	Statistic	<i>p-values</i>
Precipitación	0.945	0.522

Nivel de confianza(95.0%)

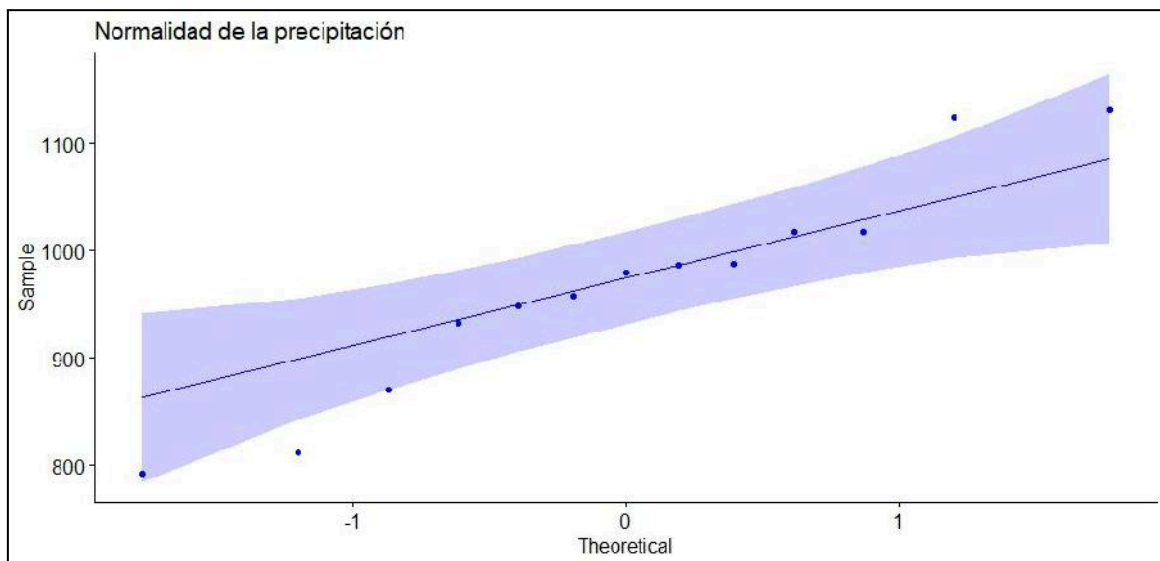


Figura 20: Prueba de normalidad ‘Shapiro-Wilk’ de las precipitaciones.

En la tabla 10 y en la figura 20; se muestran los resultados de la prueba de normalidad de Shapiro-Wilk para las precipitaciones muestran un *p-valor* de 0.522, el cual excede el umbral de significancia de 0.05, sugiriendo que los datos de precipitación se distribuyen de manera normal. Se concluye que los datos son paramétricos, es apropiado utilizar el coeficiente de correlación de Pearson para evaluar la relación entre las variables, ya que esta prueba se basa en la suposición de que los datos siguen una distribución normal y mide la intensidad y dirección de una relación lineal entre dos variables.

4.4. PROCESO DE LA PRUEBA DE HIPÓTESIS

4.4.1. Prueba de hipótesis para el objetivo específico 01.

Formulación de la hipótesis:

Hipótesis alterna (HA) = La cobertura glaciar del nevado Quelccaya de la cordillera Vilcanota es de 1500 ha durante el periodo 2010 - 2022.

Hipótesis nula (Ho) = La cobertura glaciar del nevado Quelccaya de la cordillera Vilcanota no es de 1500 ha durante el periodo 2010 - 2022.

Toma de Decisiones:

- **Si el valor $p \leq \alpha$:** Se rechaza la hipótesis nula (hay suficiente evidencia para aceptar la hipótesis alternativa).
- **Si el valor $p > \alpha$:** No se rechaza la hipótesis nula (no hay suficiente evidencia para aceptar la hipótesis alternativa).

Dónde: $\alpha = 0.05$ su nivel de significancia es al 95%

Interpretación:

De acuerdo a la tabla 11 y la figura 23, el análisis realizado con la prueba de Spearman ha arrojado un *p-valor* de 0.0021, que es considerablemente inferior al nivel de significancia habitual de 0.05. Esto significa que se rechaza la hipótesis nula (H0), la cual sostiene que la cobertura glaciar del nevado Quelccaya en la cordillera Vilcanota no alcanza las 1500 ha entre 2010 y 2022. Por lo tanto, existe suficiente evidencia para aceptar la **hipótesis alternativa (HA)**, sugiriendo que efectivamente la cobertura glaciar del nevado Quelccaya es de 1500 ha durante dicho periodo. Este descubrimiento es crucial para comprender la dinámica del hielo en la zona y tiene importantes implicaciones para la gestión de los recursos hídricos y la preservación del glaciar en el contexto del cambio climático.

4.4.2. Prueba de hipótesis para el objetivo específico 02

Formulación de la hipótesis:

Hipótesis alterna (HA) = La temperatura influye al aumento del calor en el retroceso glaciar del nevado Quelccaya entre el 2010 - 2022..

Hipótesis nula (Ho) = La temperatura no influye al aumento del calor en el retroceso

glaciar del nevado Quelccaya entre el 2010 - 2022.

Toma de Decisiones:

- **Si el valor $p \leq \alpha$:** Se rechaza la hipótesis nula (hay suficiente evidencia para aceptar la hipótesis alternativa).
- **Si el valor $p > \alpha$:** No se rechaza la hipótesis nula (no hay suficiente evidencia para aceptar la hipótesis alternativa).

Dónde: $\alpha = 0.05$ su nivel de significancia es al 95%

Interpretación:

De acuerdo a la tabla 11 y la figura 23, el análisis mediante la prueba de Spearman ha arrojado un *p-valor* de 0.0088, que es notablemente inferior al nivel de significancia habitual de 0.05. Esto permite rechazar la hipótesis nula (H_0), que sostiene que la temperatura no afecta el aumento del calor relacionado con el retroceso glaciar del nevado Quelccaya entre 2010 y 2022. Por lo tanto, existe evidencia suficiente para respaldar la **hipótesis alternativa (HA)**, lo que sugiere que la temperatura sí influye en el incremento del calor que contribuye al retroceso del glaciar en este periodo. Este resultado subraya la relevancia de evaluar cómo las temperaturas impactan la dinámica del glaciar y las consecuencias para la gestión de los recursos hídricos y la adaptación frente al cambio climático en la región.

4.4.3. Prueba de hipótesis para el objetivo específico 03

Formulación de la hipótesis:

Hipótesis alterna (HA) = La precipitación influye al disminuir las lluvias en el retroceso glaciar del nevado Quelccaya entre el 2010 - 2022.

Hipótesis nula (Ho) = La precipitación no influye al disminuir las lluvias en el retroceso glaciar del nevado Quelccaya entre el 2010 - 2022.

Toma de Decisiones:

- **Si el valor $p \leq \alpha$:** Se rechaza la hipótesis nula (hay suficiente evidencia para aceptar la hipótesis alternativa).
- **Si el valor $p > \alpha$:** No se rechaza la hipótesis nula (no hay suficiente evidencia para aceptar la hipótesis alternativa).

Dónde: $\alpha = 0.05$ su nivel de significancia es al 95%

Interpretación:

De acuerdo a la tabla 11 y la figura 23, el análisis realizado mediante la prueba de Spearman ha arrojado un valor p de 0.66, que excede el umbral de significancia habitual de 0.05. Esto implica que no se puede rechazar la **hipótesis nula (H0)**, la cual sostiene que la precipitación no tiene un efecto significativo en la disminución de las lluvias y, por ende, en el retroceso glaciar del nevado Quelccaya durante el periodo de 2010 a 2022. Por lo tanto, no hay suficiente evidencia para respaldar la hipótesis alternativa (HA), que postula que las lluvias afectan el retroceso del glaciar. Este resultado sugiere que, en este lapso, la variabilidad en las precipitaciones no se correlaciona de manera significativa con el retroceso glaciar, indicando que otros factores podrían ser más influyentes en este proceso.

Tabla 11: Correlación de Spearman de la variable independiente y dependiente.

Variables/Spearman	Glaciar	Tmax	Tmin	Prec	
Glaciar	R²	1	-0.71	-0.49	-0.13
	P-values	< 2.2e-16	0.0088	0.093	0.66
Tmax	R²	-0.71	1	0.83	0.017
	P-values	0.0088	< 2.2e-16	0.00078	0.96
Tmin	R²	-0.49	0.83	1	-0.041
	P-values	0.093	0.00078	< 2.2e-16	0.89
Prec	R²	-0.13	0.017	-0.041	1
	P-values	0.66	0.96	0.89	< 2.2e-16

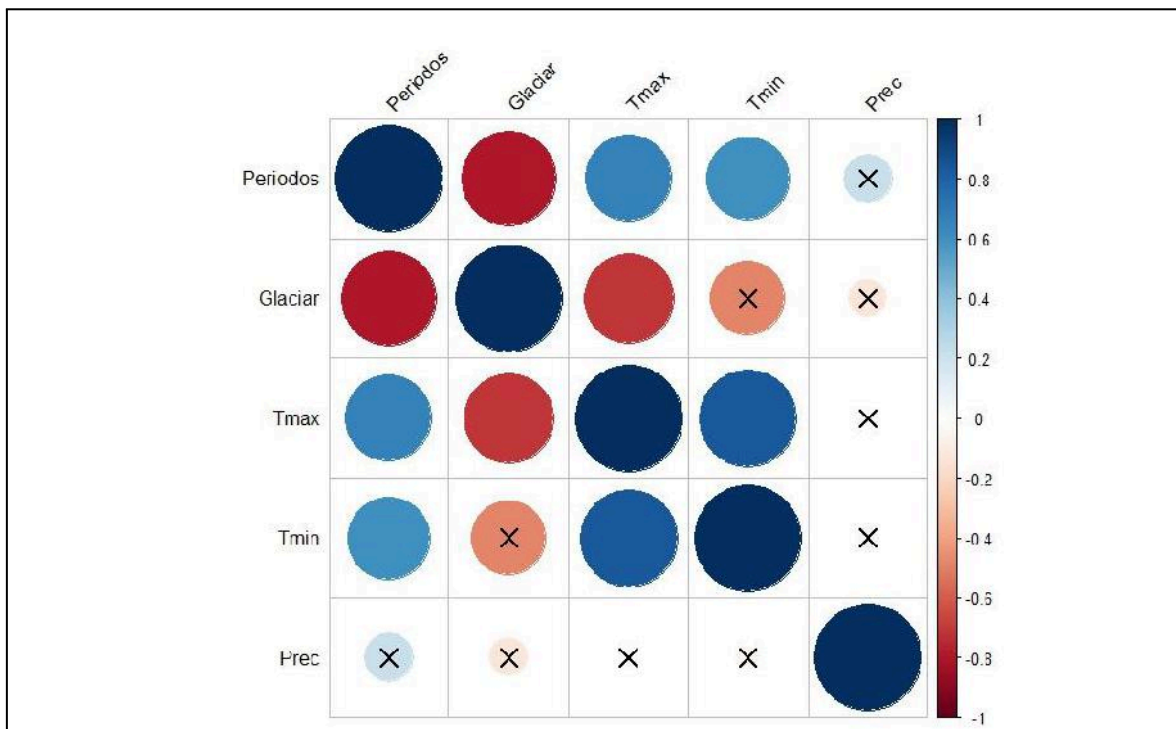


Figura 21: Correlograma de la variables en colores.

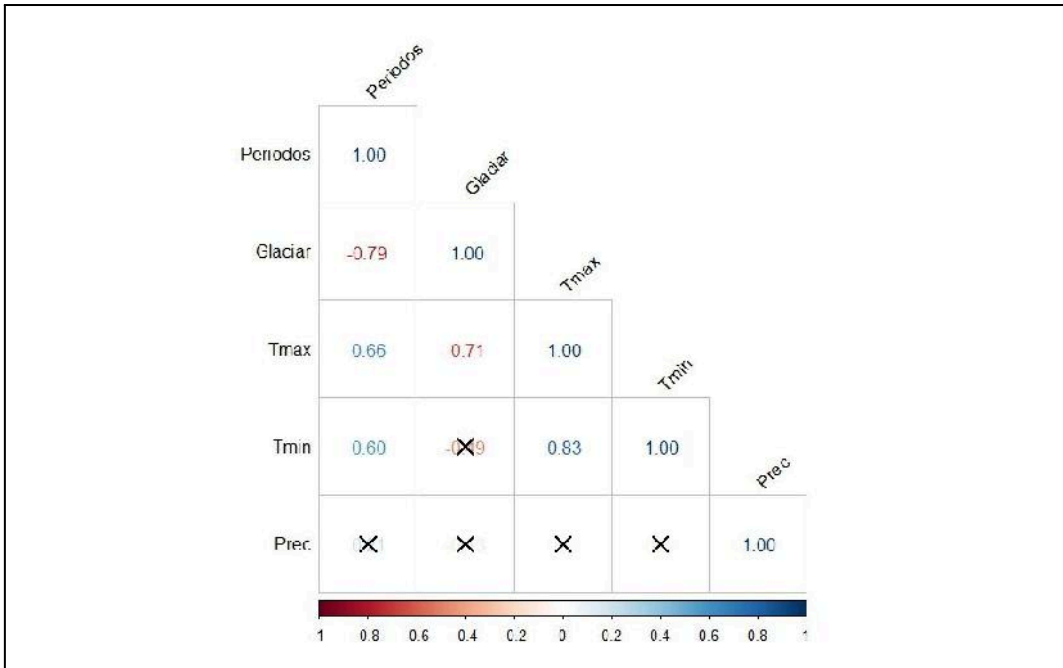


Figura 22: Correlograma de las variables en valores numéricos.

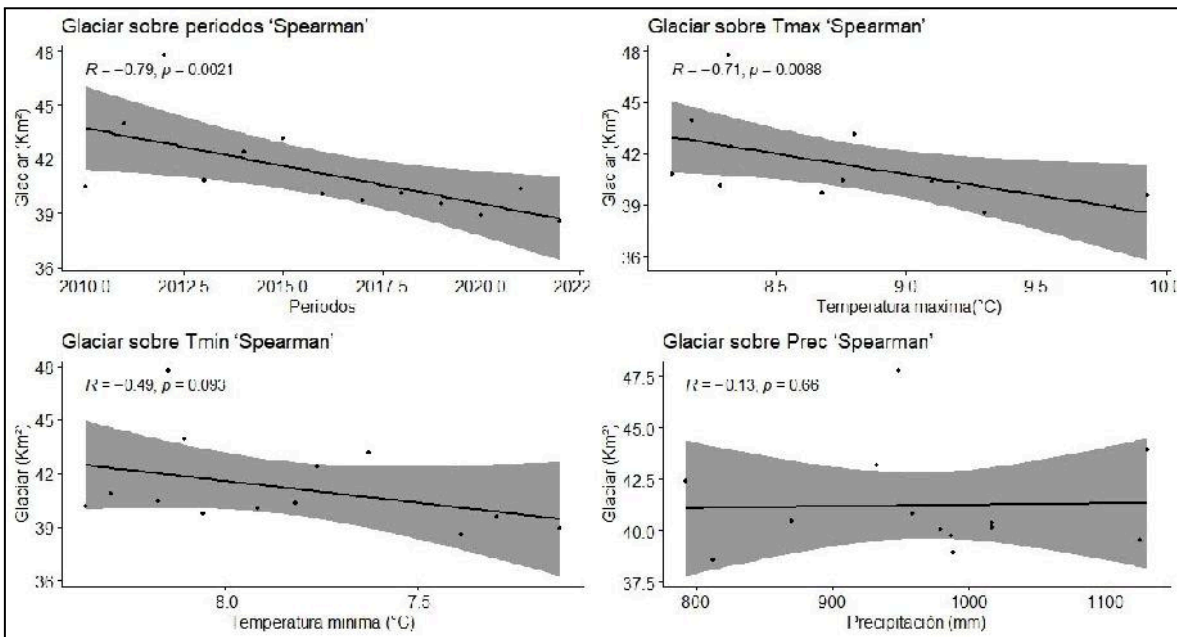


Figura 23: Regresión lineal de las variables.

CONCLUSIONES

PRIMERO: Se concluye que el retroceso de la cobertura glaciar del nevado Quelccaya en la cordillera Vilcanota entre 2010 y 2022 evidencia la notable influencia de los factores climáticos en la dinámica de la masa de hielo. Se ha constatado que las variaciones en la temperatura y las precipitaciones están estrechamente relacionadas con el comportamiento del glaciar; en particular, el aumento de las temperaturas ha tenido un impacto considerable en el deshielo, mientras que las fluctuaciones en las precipitaciones han interferido con la acumulación de nieve, que es crucial para mitigar este retroceso.

SEGUNDO: Se concluye que la evaluación del área de retroceso de la cobertura glaciar del nevado Quelccaya entre 2010 y 2022, con una pérdida de -1.899 km^2 en 12 años, lo que refleja una reducción continua de la masa glaciar, vinculada a los impactos del cambio climático, junto con un coeficiente de correlación de Spearman (r^2) de -0.79 , revela una relación inversamente significativa entre el tiempo y la superficie glaciar. Este hallazgo indica que, a medida que el tiempo avanza, el área del glaciar ha disminuido de manera considerable, el alto coeficiente de correlación enfatiza la gravedad del retroceso glaciar durante este período.

TERCERO: Se concluye que la influencia de la temperatura en el retroceso de la cobertura glaciar del nevado Quelccaya entre 2010 y 2022, utilizando la prueba estadística de Spearman, muestra un coeficiente de correlación (r^2) de -0.71 para la temperatura máxima y (r^2) de -0.49 para la temperatura mínima. Estos hallazgos evidencian una relación inversamente significativa, lo que significa que a medida que las

temperaturas, tanto máximas como mínimas, han ido en aumento, el área del glaciar ha ido disminuyendo.

CUARTO: La investigación sobre la influencia de la precipitación en el retroceso de la cobertura glaciar del nevado Quelccaya entre 2010 y 2022, utilizando la prueba estadística de Spearman, revela un coeficiente de correlación (r^2) de -0.13. Este resultado sugiere una relación inversa y muy débil entre las precipitaciones y el área del glaciar, indicando esta reducción en las precipitaciones podría tener consecuencias significativas para el glaciar, ya que una menor acumulación de nieve y hielo podría incrementar la tasa de retroceso del glaciar y reducir la masa de hielo total.

RECOMENDACIONES

PRIMERO: Se sugiere al Ministerio del Ambiente (MINAM) del Perú que adopte enfoques integrales para monitorear y conservar el glaciar Quelccaya, teniendo en cuenta los efectos del cambio climático en la zona. Esto podría incluir la instalación de estaciones meteorológicas para la recopilación de datos sobre temperatura y precipitaciones, así como la implementación de programas de educación y sensibilización sobre la relevancia de los glaciares en la regulación del agua y el mantenimiento de los ecosistemas locales.

SEGUNDO: Se aconseja al gobierno de Cusco y Puno, Perú, adoptar medidas proactivas para la gestión y conservación del glaciar Quelccaya, considerando la notable reducción de su área en los últimos años. Es fundamental implementar programas que permitan el monitoreo y la evaluación constante de las condiciones climáticas y del glaciar, así como fomentar iniciativas de reforestación y un manejo sostenible de los recursos hídricos en las cuencas que dependen de él.

TERCERO: Se aconseja al Instituto Nacional de Investigación en Glaciares y Ecosistemas de Montaña (INAIGEM) del Perú que intensifique sus esfuerzos en la investigación y el monitoreo de la dinámica del glaciar Quelccaya, dada la considerable influencia de las variaciones de temperatura en su retroceso. Es esencial realizar estudios exhaustivos que incluya la recopilación de datos climáticos a largo plazo y el análisis de las tendencias en el comportamiento del glaciar. Además, se recomienda implementar

programas de concienciación y educación sobre la relevancia de los glaciares para el equilibrio ecológico y el abastecimiento de agua en las comunidades adyacentes.

CUARTO: Se aconseja a la población del Perú que se mantenga al tanto de la relevancia de los glaciares, como el nevado Quelccaya, y su función esencial en el abastecimiento de agua y el equilibrio de los ecosistemas. Aunque los hallazgos de la investigación sugieren que las variaciones en las precipitaciones no afectan de manera significativa el retroceso del glaciar, es crucial que la comunidad implemente prácticas sostenibles para la gestión del agua y la protección del medio ambiente.

BIBLIOGRAFÍA

- Abellán, M. (2021, 02 21). *El cambio climático: negacionismo, escepticismo y desinformación - Archive ouverte HAL*. HAL. Retrieved October 21, 2024, from <https://hal.science/hal-03148048/>
- Barrientos, M. (2023, 06 21). *Evolución del retroceso glaciar de los nevados Japu punta y Yayamari en contexto de cambio climático, en la cordillera Vilcanota, departamento Cusco - Perú*. <https://repositorio.uandina.edu.pe/item/0aac497d-b7d8-4df8-91d5-29279a722f92>
- Bravo, R., Giler, A., & Mogro, Y. (2024, July 2). *Clasificación multitemporal de usos de la tierra utilizando imágenes landsat en la cuenca del Río Quinindé | Revista de Investigaciones en Energía Medio Ambiente y Tecnología RIEMAT ISSN 2588-0721*. Portal de Revistas Científicas de la Universidad Técnica de Manabí. Retrieved October 21, 2024, from <https://revistas.utm.edu.ec/index.php/Riemat/article/view/6793>
- Bravo, W. (2023, 12 08). *Evaluación de los índices de riesgo para la salud humana por contaminación de metales en aguas superficiales de la subcuenca del río Negro, Áncash*. Repositorio INAIGEM. Retrieved October 21, 2024, from <https://repositorio.inaigem.gob.pe/items/eeb89aab-73ce-4441-9909-2e03c6e435f6>
- Cabrera, E., Vega, J., & Jácome, G. (2023, January 25). *Estimación actual y futura del retroceso glaciar del nevado Cayambe, en Ecuador | SATHIRI*. revistas upec. Retrieved October 20, 2024, from <https://revistasdigitales.upec.edu.ec/index.php/sathiri/article/view/1197>
- Cabrera, P. (2023, June 14). *Nueva organización de los diseños de investigación*. South American Research Journal. Retrieved October 21, 2024, from <https://www.sa-rj.net/index.php/sarj/article/view/37>

- Ccallata, I. (2021, 06 14). *Retroceso de la cobertura glaciar del nevado Salluyo de la cordillera Apolobamba y la influencia de los elementos climáticos, en el período 1985-2020*. Repositorio de la Universidad César Vallejo. Retrieved October 20, 2024, from <https://repositorio.ucv.edu.pe/handle/20.500.12692/60169>
- Chávez, J., Gonzales, J., & Iparraguirre, J. (2023, 04 18). *El impacto del cambio climático en la evolución glaciar desde la pequeña edad de hielo, en la vertiente occidental de la subcuenca Ranrahirca (Cordillera Blanca, Ancash)*. <https://repositorio.unac.edu.pe/handle/20.500.12952/8391>
- Cueva, N., Morales, M., & Gonzales, A. (2023, July 8). *Políticas públicas sobre el cambio climático | Producción + Limpia*. Revista Lasallista de Investigación. Retrieved October 21, 2024, from <https://revistas.unilasallista.edu.co/index.php/pl/article/view/3226>
- Deza, B. (2024, March 14). *Retroceso de la cobertura glaciar del nevado Ananea cordillera Apolobamba por influencia de elementos climáticos, período 2015 - 2023*. of DSpace. Retrieved October 20, 2024, from <http://repositorio.upsc.edu.pe/handle/UPSC/797>
- Escalante, A. (2024, 08 27). *Metodología de corrección radio métrica y atmosférica aplicada a imágenes satelitales LANDSAT - 8 OLI en el software ENVI 5*. <https://revistas.usfx.bo/index.php/revistatecnicaconstruccion/article/view/1287>
- Forero, P. (2024, 04 28). *Exploración de características geológicas de la superficie lunar de Encélado (Saturno) utilizando técnicas de aprendizaje automático para la clasificación de imágenes satelitales*. <https://repositorio.unal.edu.co/handle/unal/86800>
- Gamez, K. (2024, February 1). *Deep Learning en agricultura: conceptos y aplicaciones en la identificación de cultivos sobre imágenes satelitales*. Repositorio Institucional Séneca. Retrieved October 21, 2024, from

<https://repositorio.uniandes.edu.co/entities/publication/2cd71d69-7078-4901-87e7-9bc9f2cb62e5>

Gavilanes, R., & Tipán, B. (2021, 12 10). *La Educación Ambiental como estrategia para enfrentar el cambio climático*. SciELO Ecuador. Retrieved October 21, 2024, from http://scielo.senescyt.gob.ec/scielo.php?pid=S1390-86422021000200286&script=sci_arttext

González, G. (2021, 03 09). *Educación para el cambio climático: ¿Educar sobre el clima o para el cambio?* SciELO México. Retrieved October 21, 2024, from https://www.scielo.org.mx/scielo.php?pid=S0185-26982020000200157&script=sci_arttext

Guallazaca, L. (2023, 01 16). *Aproximación espacial para la identificación de áreas de huertos familiares en zonas rurales: el caso de Sinincay - Cuenca - Ecuador*. SciELO Ecuador. Retrieved October 21, 2024, from http://scielo.senescyt.gob.ec/scielo.php?pid=S2631-26542023000100136&script=sci_arttext

Gutierrez, L., Haro, E., & Díaz, N. (2024, 03 08). *Análisis Multitemporal de Distribución Geográfica Potencial del Lama Guanicoe*. <https://revistas.unitru.edu.pe/index.php/PGM/article/view/5862>

Hidalgo, D., Villacís, M., & Maisincho, L. (2024, 08 28). *Retroceso del glaciar del Carihuairazo y sus implicaciones en la comunidad de Cunucyacu*. SciELO Ecuador. Retrieved October 20, 2024, from http://scielo.senescyt.gob.ec/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1390-85962024000100092

Huacani, W. (2019, 06 18). *Aplicación de la teledetección en la desglaciación del nevado del ampay relacionado al cambio climático entre 1980 - 2015*. <https://repositorio.uap.edu.pe/handle/20.500.12990/9725>

- Huayanay, J. (2024, 06 13). *Aplicación de satélite SAR, mediante el método Cloude Pottier para la clasificación de suelos*.
<https://aypate.revista.unf.edu.pe/index.php/aypate/article/view/60>
- Jiménez, L., & Tecse, C. (2021, 04 18). *Revisión sistemática de desglaciación, extensión superficial y formación de lagos en la cordillera de los Andes-Perú mediante métodos de teledetección, 2020*. Repositorio de la Universidad César Vallejo. Retrieved October 20, 2024, from <https://repositorio.ucv.edu.pe/handle/20.500.12692/60526>
- Jumbo, F., Zea, M., & Redrován, F. (2024, April 4). *Uso de herramientas de SIG en la definición de áreas de drenaje de la unidad 13949 - Río León*. Journal of Science and Research. Retrieved October 21, 2024, from <https://revistas.utb.edu.ec/index.php/sr/article/view/3086>
- Mendoza, Y., Mejia, L., & Morales, A. (2024, 06 18). *Identificación de los índices de vegetación y actividad fotosintética para la preservación del monitoreo de páramos en Antioquia*. <https://repository.unad.edu.co/handle/10596/62613>
- Morote, Á. (2020, 09 20). *RUA: El estudio del cambio climático en la Educación Primaria: una exploración a partir de los manuales escolares de Ciencias Sociales de la Comunidad Valenciana*. RUA. Retrieved October 21, 2024, from <https://rua.ua.es/dspace/handle/10045/108231>
- Nicolás, R. (2024, 06 20). *Estimación de parámetros geofísicos y orbitales con observaciones láser a satélites (SLR)*.
<https://sedici.unlp.edu.ar/handle/10915/167814>
- Pacompia, S. (2022, 12 13). *Nivel de desglaciación del nevado Allincapac entre los años 2000 y 2020 ubicado en el Distrito de Macusani*.
<http://repositorio.upsc.edu.pe/handle/UPSC/437>
- Percudani, L., Colavitto, B., & Martínez, O. (2023, 12 24). *Análisis geomorfológico e*


- identificación de amenazas asociados al cambio climático en la cuenca del Glaciar Torrecillas, Parque Nacional Los Alerces, Patagonia Argentina.* Repositorio Institucional CONICET Digital. Retrieved October 21, 2024, from <https://ri.conicet.gov.ar/handle/11336/226007>
- Quiroga, D., Coronato, A., & del Valle, H. (2020, 12 20). *Zonificación de áreas susceptibles a procesos erosivos en laderas desencadenados por la ganadería extensiva, Tierra del Fuego, Argentina.* https://www.scielo.org.ar/scielo.php?pid=S1852-42652020000200004&script=sci_arttext&tlng=en
- Soto, V. (2024, July 31). *La imposibilidad de pronosticar la extinción de un glaciar de montaña | Investigaciones Geográficas.* Investigaciones Geográficas. Retrieved October 21, 2024, from <https://www.investigacionesgeograficas.unam.mx/index.php/rig/article/view/60921>
- Toribio, S. (2023, June 13). *Repositorio Continental: Análisis del efecto espacio - temporal del retroceso glaciar del nevado Huaytapallana en los bofedales del Área de Conservación Regional Huaytapallana en el periodo de 1990-2020, Junín - 2022.* Repositorio Continental. Retrieved October 20, 2024, from <https://repositorio.continental.edu.pe/handle/20.500.12394/13020>
- Torres, P. (2024, 04 06). *Evaluación del estado de salud de las masas forestales de la Comunidad de Madrid mediante técnicas de teledetección.* <https://ebuah.uah.es/dspace/handle/10017/61820>
- Villalobos, F. (2023, 12 24). *Criterios de protección jurídica de glaciares.* <https://repositorio.uchile.cl/handle/2250/196556>
- Villar, F. (2023, 11 09). *Desarrollo de un sistema de monitoreo para la evaluación de bofedales por medio de la observación terrestre.* Repositorio UTEC. Retrieved October 21, 2024, from <https://repositorio.utec.edu.pe/handle/20.500.12815/331>.

ANEXOS


Anexo 01: Matriz de consistencia: Retroceso de la cobertura glaciar del nevado Quelccaya de la cordillera Vilcanota causado por la influencia de los elementos climáticos, período 2010 - 2022

PROBLEMA	OBJETIVOS	HIPÓTESIS	VARIABLES	INDICADORES	INSTRUMENTOS	TÉCNICA DE PROCESAMIENTO DE DATOS
<p>PROBLEMA GENERAL ¿Cuál es el retroceso de la cobertura glaciar del nevado Quelccaya de la cordillera Vilcanota causado por la influencia de los elementos climáticos, período 2010 - 2022?</p> <p>PROBLEMAS ESPECÍFICOS</p> <ul style="list-style-type: none"> • ¿Cuál es el área del retroceso de la cobertura glaciar del nevado Quelccaya entre el 2010 - 2022? • ¿De qué manera la temperatura influye en el retroceso glaciar del nevado Quelccaya entre el 2010 - 2022? • ¿De qué manera la precipitación influye en el retroceso glaciar del nevado Quelccaya entre el 2010 - 2022? 	<p>OBJETIVO GENERAL Evaluar el retroceso de la cobertura glaciar del nevado Quelccaya de la cordillera Vilcanota causado por la influencia de los elementos climáticos, período 2010 - 2022.</p> <p>OBJETIVOS ESPECÍFICOS</p> <ul style="list-style-type: none"> • Estimar el área del retroceso de la cobertura glaciar del nevado Quelccaya entre el 2010 - 2022. • Determinar la influencia de la temperatura en el retroceso de la cobertura glaciar del nevado Quelccaya entre el 2010 - 2022. • Determinar la influencia de la precipitación en el retroceso de la cobertura glaciar del nevado Quelccaya entre el 2010 - 2022. 	<p>HIPÓTESIS GENERAL El retroceso de la cobertura glaciar del nevado Quelccaya de la cordillera Vilcanota es 5 % por la influencia negativa de los elementos climáticos durante el período 2010 - 2022.</p> <p>HIPÓTESIS ESPECÍFICAS</p> <ul style="list-style-type: none"> • La cobertura glaciar del nevado Quelccaya de la cordillera Vilcanota es de 1500 ha durante el período 2010 - 2022. • La temperatura influye al aumento del calor en el retroceso glaciar del nevado Quelccaya entre el 2010 - 2022. • La precipitación influye al disminuir las lluvias en el retroceso glaciar del nevado Quelccaya entre el 2010 - 2022. 	<p>Variable Independiente: Influencia de los elementos climáticos.</p> <p>Variable Dependiente: Retroceso de la cobertura glaciar.</p>	<p>Temperaturas</p> <ul style="list-style-type: none"> • Máximas (°C) • Mínimas (°C) • Mensual (°C) • Anual (°C) <p>Precipitación</p> <ul style="list-style-type: none"> • Mensual (mm) • Anual (mm) <p>Área</p> <ul style="list-style-type: none"> • km² • Ha • % 	<p>R-Studio (v4.3.1)</p> <p>Software QGIS (v3.26.17)</p> <p>SENAMHI: Información meteorológica desde el año 2010 al 2022</p>	<p>Imágenes Satelitales LANDSAT 7 y LANDSAT 8</p> <p>Tipo de Investigación - Descriptivo. - Aplicada de enfoque cuantitativo.</p> <p>Diseño de Investigación - No Experimental</p> <p>Método - Deductivo - Inductivo.</p> <p>Población y muestra:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Nevado Quelccaya

Anexo 02: Descarga de imágenes satelitales Landsat 8, de la plataforma Google Earth Engine.


Earth Engine Data Catalog Search / Language ▼ 

Landsat, a joint program of the USGS and NASA, has been observing the Earth continuously from 1972 through the present day. Today the Landsat satellites image the entire Earth's surface at a 30-meter resolution about once every two weeks, including multispectral and thermal data. The USGS produces data in 3 categories for each satellite (Tier 1, Tier 2 and RT). [Read more about the different tiers.](#)




Surface Reflectance

Landsat 8 OLI/TIRS Collection 2 atmospherically corrected surface reflectance.




Top of Atmosphere

Landsat 8 OLI/TIRS Collection 2 calibrated top-of-atmosphere (TOA) reflectance.



Raw Images

Landsat 8 OLI/TIRS Collection 2 DN values.

Jupyter William Najjar Last Checkpoint: 1 hour ago Trustee 

File Edit View Run Kernel Settings Help


JupyterLab Python 3 (ipykernel)

```
[1]: # importar a google engine
# importar libreria
import ee
import os
ee.Initialize()

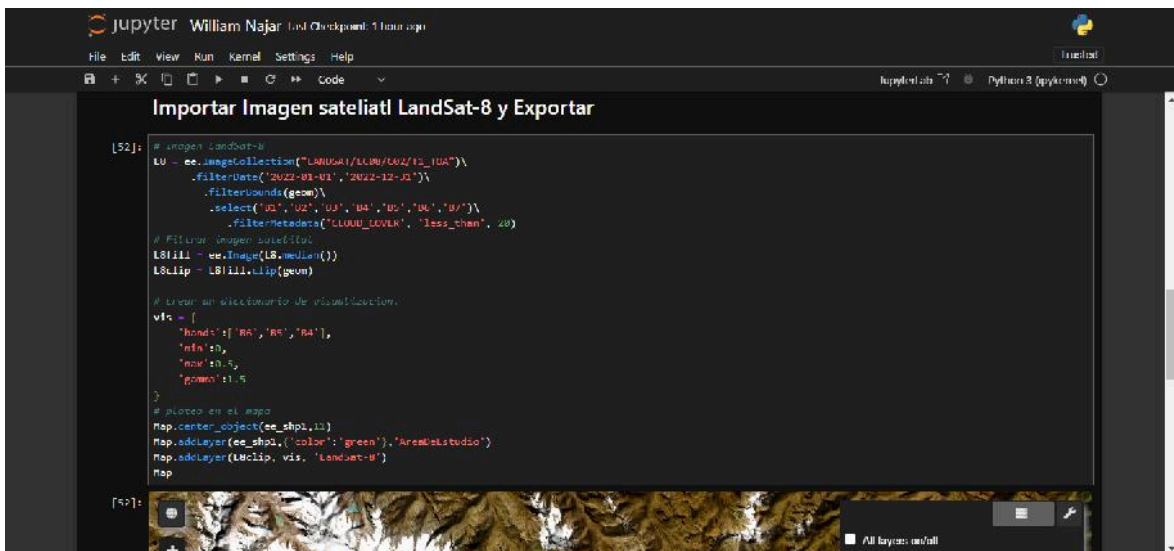
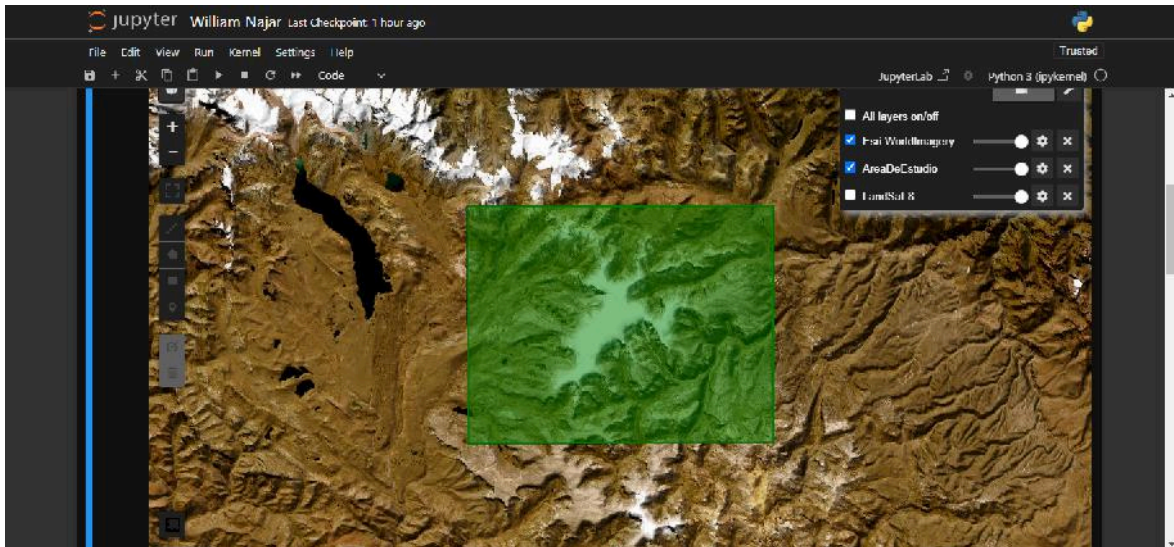
[4]: # importar base map
map = ee.Map(ee.BaseMap('sri.worldimagery'))
map

[5]: # Importar Area de estudio
shp1 = ee.Shapefile('sri/areas/areas.shp')
ee_shp1 = ee.Shapefile(shp1)
geom = ee_shp1.geometry()

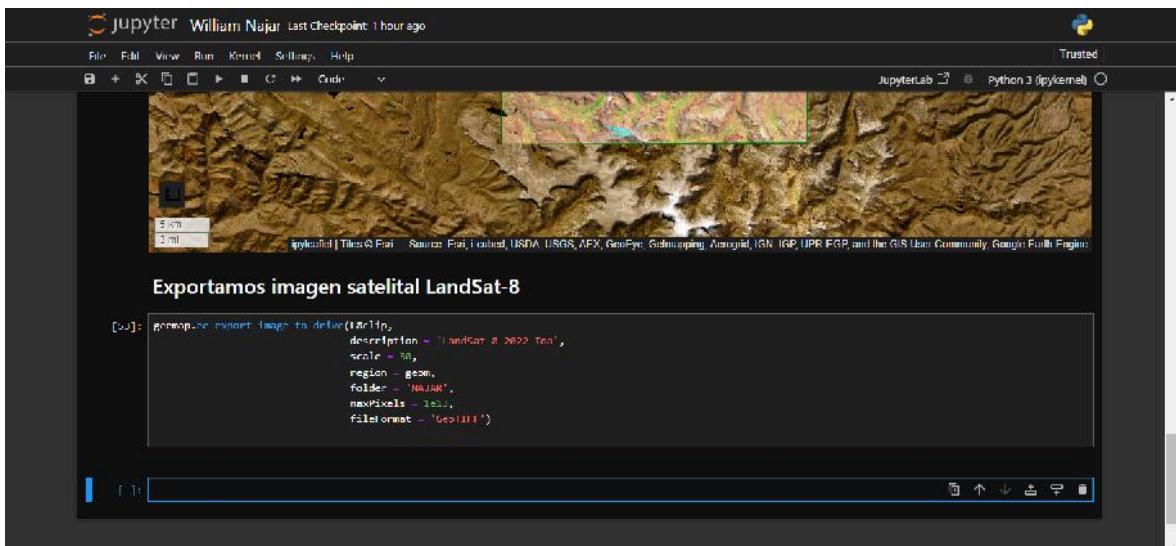
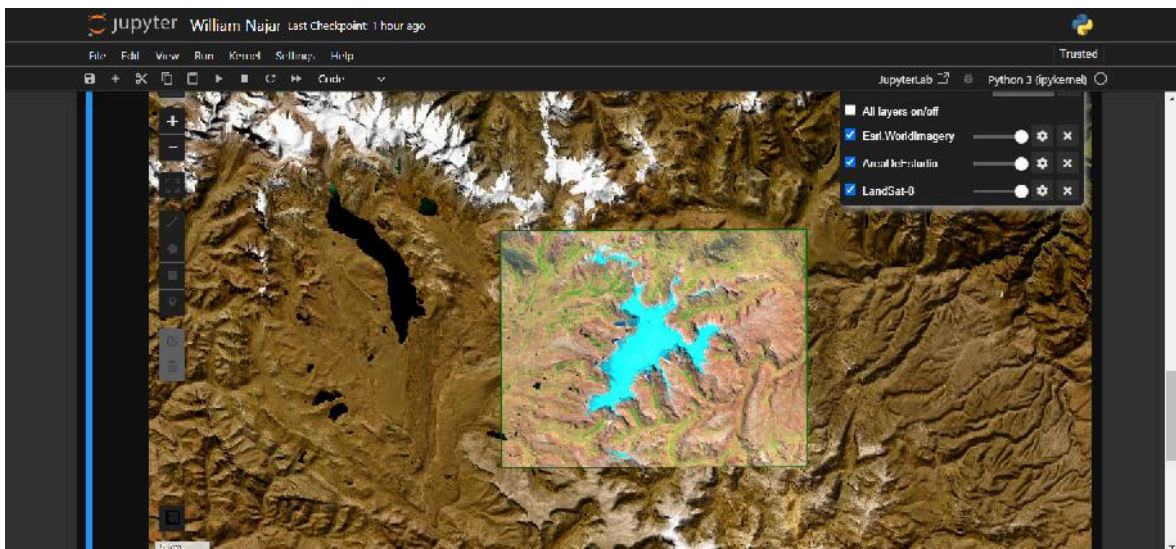
[7]: # visualizar area de estudio
map.centerObject(ee_shp1, 11)
map.addLayer(ee_shp1, {'color': 'green'}, 'Area de estudio')
map

[7]:  All layers on/off
```

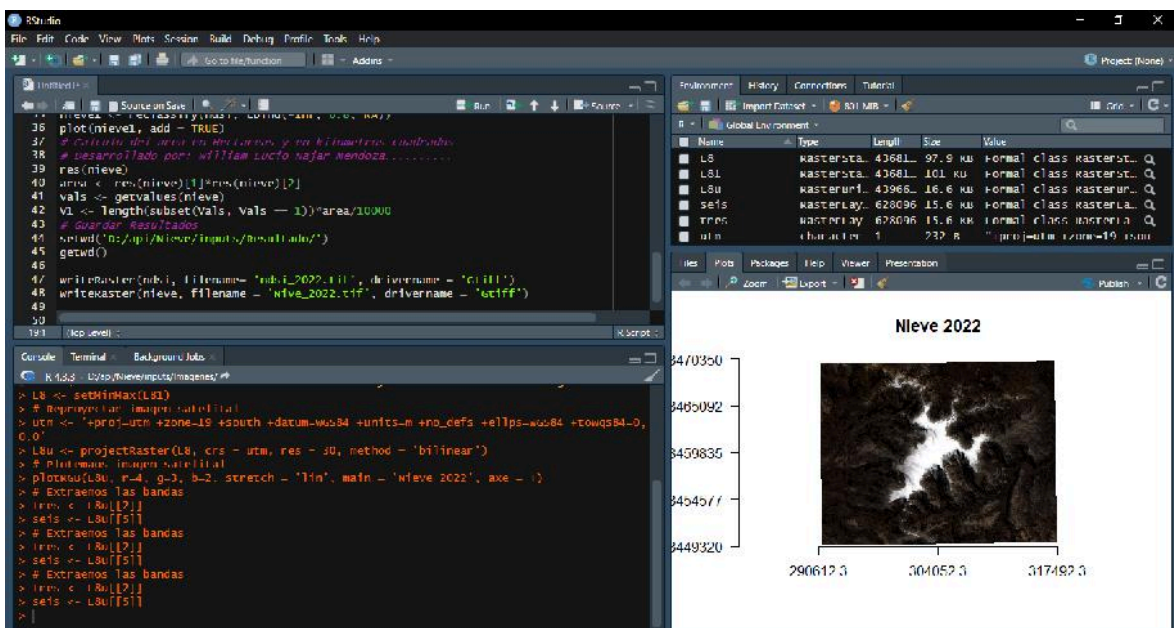
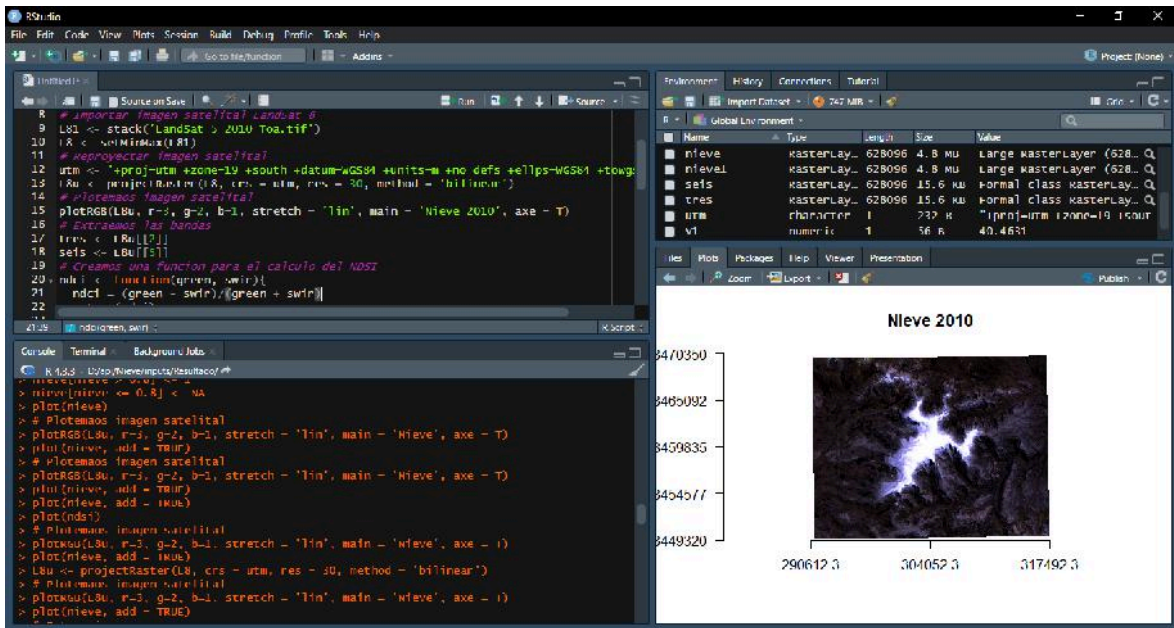
Anexo 03: Conexión a la plataforma Google Earth Engine mediante Python en Jupyter.

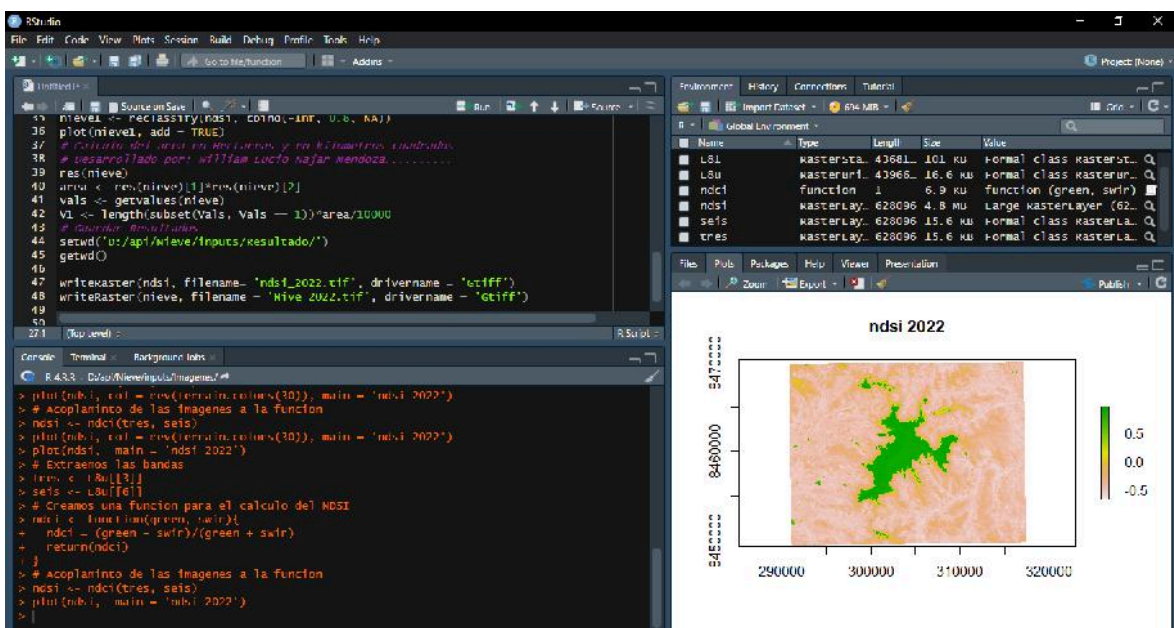
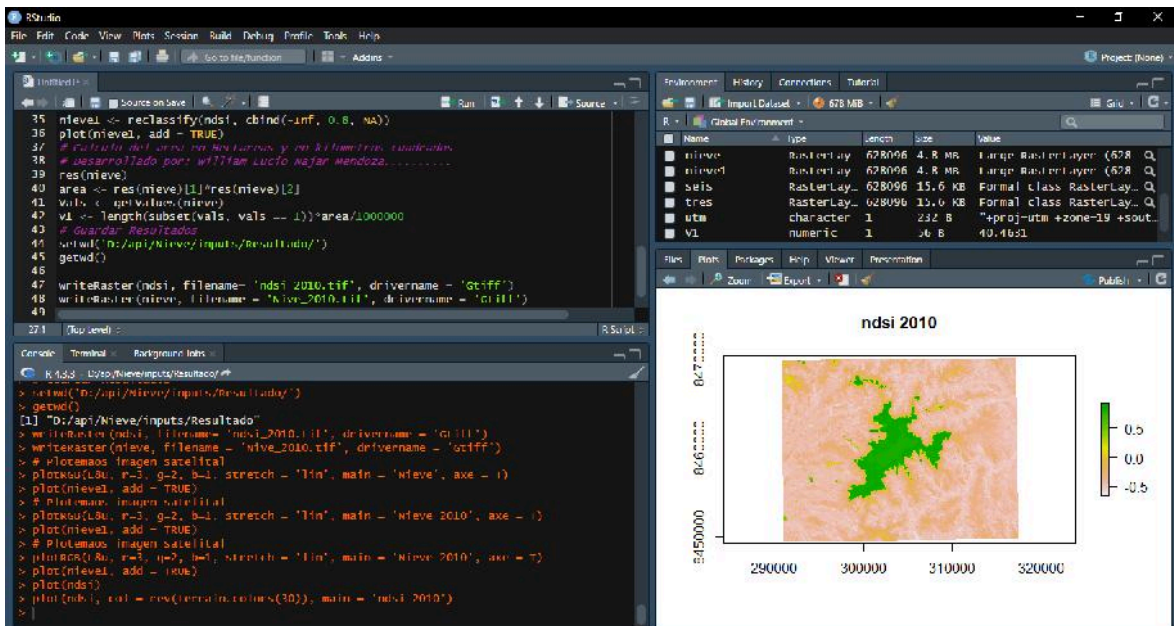


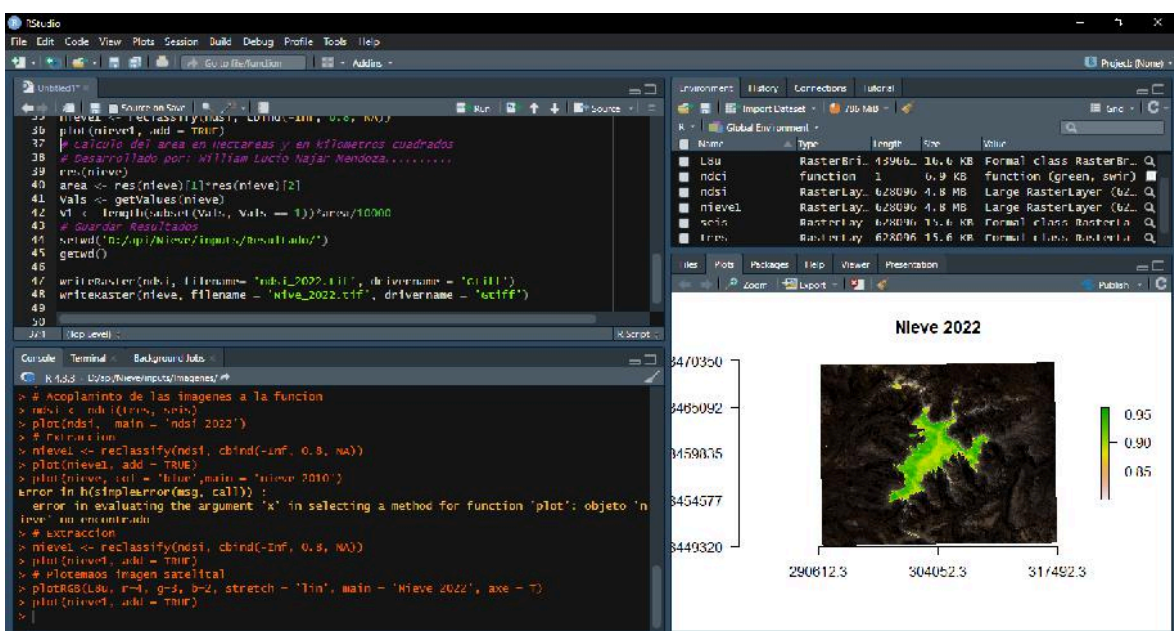
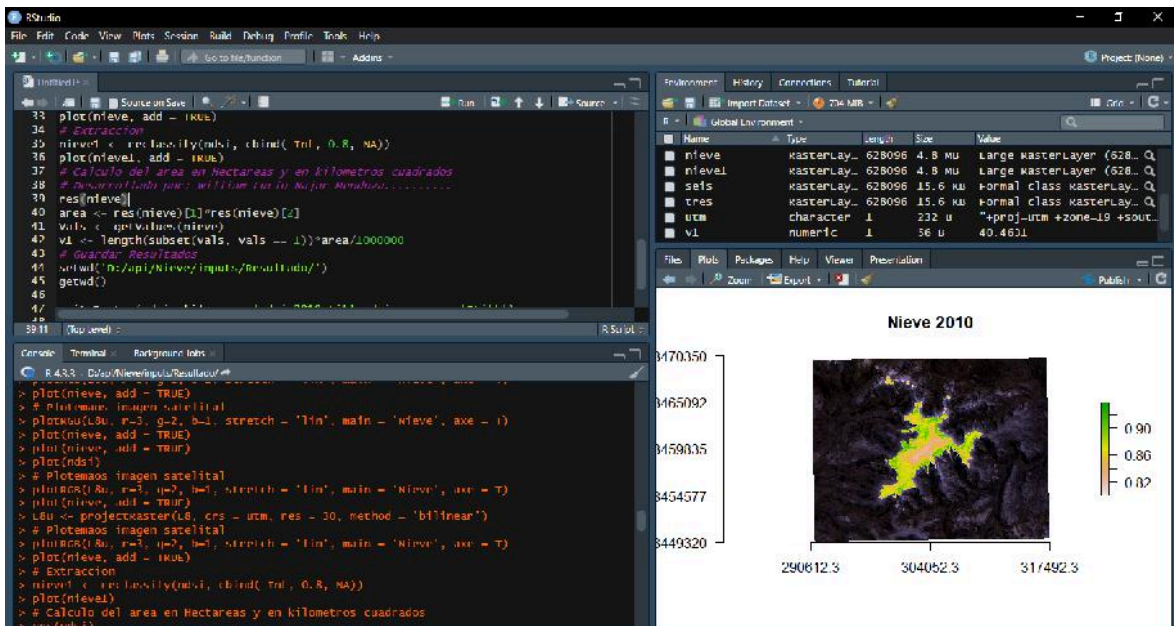
Anexo 04: Descarga de imágenes satelitales mediante Python en Jupyter.

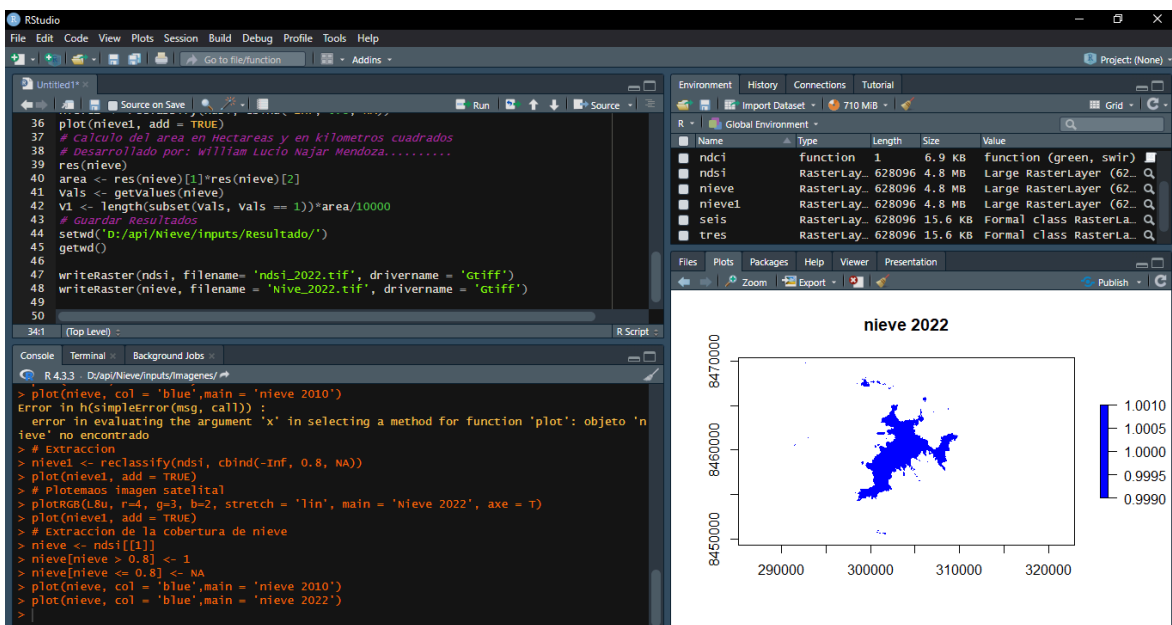
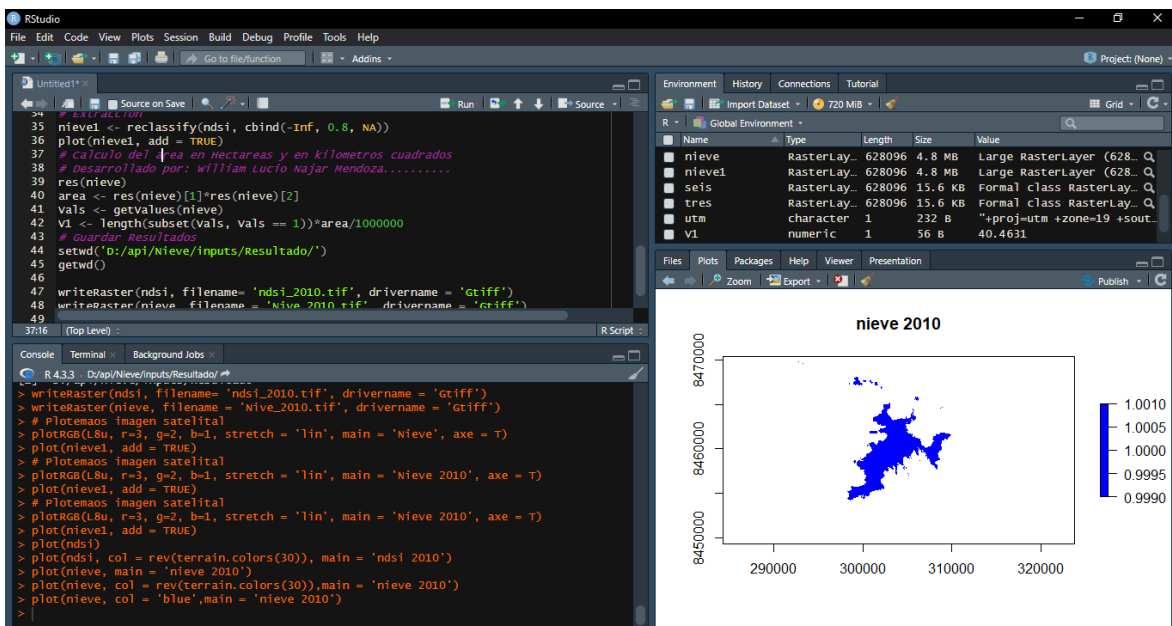


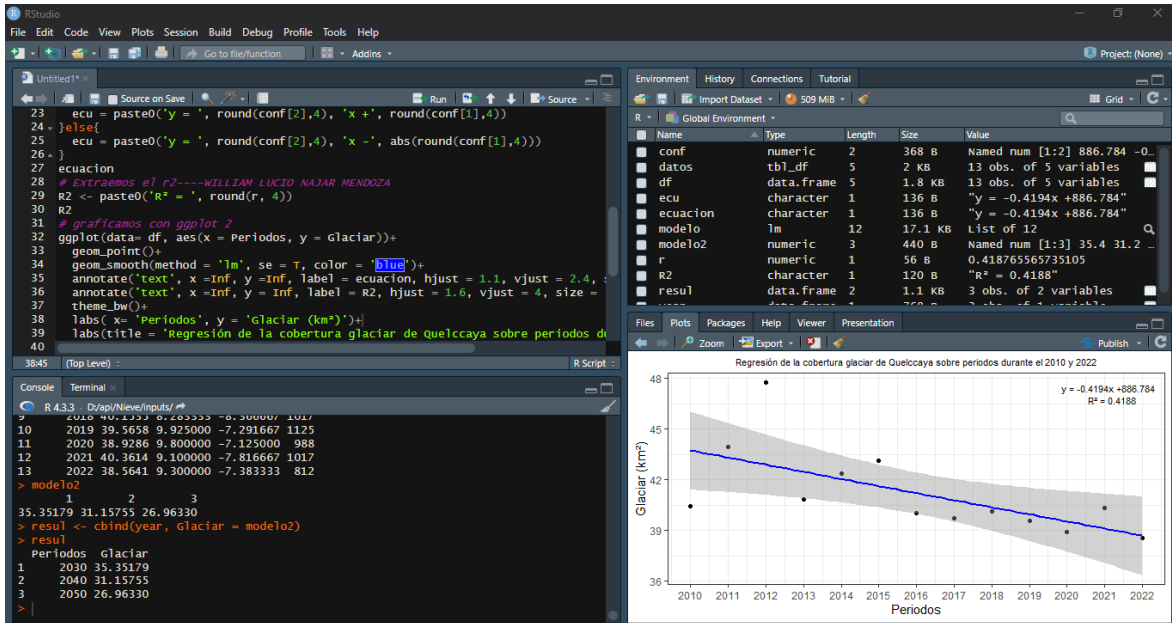
Anexo 05: Procesamiento de las imágenes satelitales mediante R.











Anexo 06: Proceso de la prueba estadística en R.

```
> rstatix::cor_plot(Mat_cor, type = 'lower', method = 'number')
> # Pruebas de normalidad
> datos %>%
+   shapiro_test(GlaciAr)
# A tibble: 1 x 3
  variable statistic      p
  <chr>      <dbl> <dbl>
1 GlaciAr    0.840 0.0215
> # Pruebas de normalidad
> datos %>%
+   shapiro_test(Tmax)
# A tibble: 1 x 3
  variable statistic      p
  <chr>      <dbl> <dbl>
1 Tmax      0.919 0.243
> # Pruebas de normalidad
> datos %>%
+   shapiro_test(Tmin)
# A tibble: 1 x 3
  variable statistic      p
  <chr>      <dbl> <dbl>
1 Tmin      0.937 0.423
> # Pruebas de normalidad
> datos %>%
+   shapiro_test(Prec)
# A tibble: 1 x 3
  variable statistic      p
  <chr>      <dbl> <dbl>
1 Prec      0.945 0.522
```

```
> Mat_cor
# A tibble: 5 x 6
  rowname Periodos GlaciAr Tmax Tmin Prec
* <chr>      <dbl> <dbl> <dbl> <dbl> <dbl>
1 Periodos    1    -0.79  0.66  0.6  0.21
2 GlaciAr   -0.79    1   -0.71 -0.49 -0.13
3 Tmax      0.66  -0.71    1    0.83  0.017
4 Tmin      0.6  -0.49  0.83    1   -0.041
5 Prec      0.21  -0.13  0.017 -0.041  1
> # significancia
> rstatix::cor_mark_significant(Mat_cor)
  rowname Periodos GlaciAr Tmax Tmin Prec
1 Periodos
2 GlaciAr -0.79**
3 Tmax    0.66* -0.71**
4 Tmin    0.6*  -0.49 0.83***
5 Prec    0.21  -0.13 0.017 -0.041
```