

UNIVERSIDAD PRIVADA DE TACNA
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA AMBIENTAL



TESIS

**“EVALUACIÓN MULTITEMPORAL DEL RETROCESO GLACIAR
Y SU RELACIÓN CON LA TEMPERATURA SUPERFICIAL
TERRESTRE (LST) EN EL NEVADO QUELCCAYA,
CORDILLERA VILCANOTA”**

PARA OPTAR:
TÍTULO PROFESIONAL DE INGENIERO AMBIENTAL

PRESENTADO POR:

Bach. KAREN FERNANDA HUILLCA TICONA

TACNA–PERÚ

2026

**UNIVERSIDAD PRIVADA DE TACNA
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA AMBIENTAL**

TESIS

**“EVALUACIÓN MULTITEMPORAL DEL RETROCESO GLACIAR
Y SU RELACIÓN CON LA TEMPERATURA SUPERFICIAL
TERRESTRE (LST) EN EL NEVADO QUELCCAYA,
CORDILLERA VILCANOTA”**

**Tesis sustentada y aprobada el 10 de Julio de 2026; estando el jurado calificador
integrado por:**

PRESIDENTE : Mtra. MILAGROS HERRERA REJAS

SECRETARIO : Ing. CARMEN ROSA ROMÁN ARCE

VOCAL : Mtro. DIEGO YGOR CHOCANO ROSSI

ASESOR : Dr. ALEXANDER NICOLÁS VILCANQUI ALARCÓN

DECLARACIÓN JURADA DE ORIGINALIDAD

Yo, Karen Fernanda Huillca Ticona, egresada, de la Escuela Profesional de Ingeniería ambiental de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Privada de Tacna, identificada con DNI 72106060, así como Alexander Nicolás Vilcanqui Alarcón con DNI 70023449; declaramos en calidad de autor y asesor que:

1. Somos los autores de la tesis titulado: *Evaluación multitemporal del retroceso glaciar y su relación con la temperatura superficial terrestre (LST) en el Nevado Quelccaya, Cordillera Vilcanota*, la cual presentamos para optar el Título Profesional de *Ingeniero Ambiental*.
2. La tesis es completamente original y no ha sido objeto de plagio, total ni parcialmente, habiéndose respetado rigurosamente las normas de citación y referencias para todas las fuentes consultadas.
3. Los datos presentados en los resultados son auténticos y no han sido objeto de manipulación, duplicación ni copia.

En virtud de lo expuesto, asumimos frente a *La Universidad* toda responsabilidad que pudiera derivarse de la autoría, originalidad y veracidad del contenido de la *tesis*, así como por los derechos asociados a la obra.

En consecuencia, nos comprometemos ante *La Universidad* y terceros a asumir cualquier perjuicio que pueda surgir como resultado del incumplimiento de lo aquí declarado, o que pudiera ser atribuido al contenido de la tesis, incluyendo cualquier obligación económica que debiera ser satisfecha a favor de terceros debido a acciones legales, reclamos o disputas resultantes del incumplimiento de esta declaración.

En caso de descubrirse fraude, piratería, plagio, falsificación o la existencia de una publicación previa de la obra, aceptamos todas las consecuencias y sanciones que puedan derivarse de nuestras acciones, acatando plenamente la normatividad vigente.

Tacna, 10 de Julio de 2026

Karen Fernanda Huillca Ticona

DNI: 72106060

Alexander Nicolás Vilcanqui Alarcón

DNI: 70023449

DEDICATORIA

A Dios por brindarme resiliencia y fuerza para enfrentar los retos a lo largo de mi vida, permitiéndome realizar este trabajo de investigación.

A mis padres, Martha y Fernando, por su amor incondicional, esfuerzo infinito y por creer en mí siempre.

A mis hermanos, Rodrigo y Fabrizio, por acompañarme y alentarme en cada paso.

A mi hermana, Lesly, que hoy descansa junto a Dios, por ser mi estrella guía.

A mi persona especial, Gustavo, que me brindó apoyo constante y ánimos para culminar esta meta.

Karen Fernanda Huillca Ticona

AGRADECIMIENTO

A la Universidad Privada de Tacna, por abrirme sus puertas y formarme profesionalmente en su casa de estudios.

A los docentes de la Escuela Profesional de Ingeniería Ambiental, por brindarme los conocimientos necesarios para mi formación profesional.

A mi asesor, Dr. Alexander Nicolas Vilcanqui, por sus asesorías y acompañamiento para realizar con éxito esta tesis.

Karen Fernanda Huillca Ticona

ÍNDICE GENERAL

PÁGINA DE JURADOS.....	ii
DECLARACIÓN JURADA DE ORIGINALIDAD	iii
DEDICATORIA.....	iv
AGRADECIMIENTO.....	v
ÍNDICE DE TABLAS.....	x
ÍNDICE DE FIGURAS	xi
ÍNDICE DE ANEXOS	xii
RESUMEN	xiii
ABSTRACT	xiv
INTRODUCCIÓN	1
CAPÍTULO I: EL PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN	3
1.1 Descripción del problema.....	3
1.2 Formulación del problema.....	4
1.2.1 Problema general.....	4
1.2.2 Problemas específicos	4
1.3 Justificación e importancia	5
1.4. Objetivos.....	6
1.4.1. Objetivo General	6
1.4.2. Objetivos Específicos	6
1.5. Hipótesis general	7
CAPÍTULO II: MARCO TEÓRICO	8
2.1. Antecedentes de la investigación.....	8
2.2. Bases teóricas.....	12
2.2.1. Cambio climático	12
2.2.2. Glaciar	12

2.2.3. Partes del glaciar	12
2.2.4. Glaciares en el Perú	13
2.2.5. Descripción del Nevado Quelccaya	13
2.2.6. Temperatura Superficial Terrestre (LST)	13
2.2.7. Relación entre LST y el retroceso glaciar.....	14
2.2.8. Teledetección e imágenes Landsat	14
2.2.9. Índice Diferenciada de Nieve (NSDI)	14
2.3. Definición de Términos	15
2.3.1. Retroceso glaciar	15
2.3.2. Balance de masa	15
2.3.3. Análisis multitemporal	15
2.3.4. Imágenes satelitales	15
2.3.5. Línea de equilibrio	15
2.3.6. Ablación glaciar.....	16
CAPÍTULO III: MARCO METODOLÓGICO	17
3.1. Diseño de la investigación	17
3.2. Acciones y actividades.....	17
3.2.1. Localización del área de estudio	17
3.2.2. Recopilación de información	17
3.2.3. Correcciones de las imágenes satelitales	19
3.2.4. Delimitación de la cobertura glaciar	19
3.2.5. Pérdida superficial y tasa de retroceso	19
3.2.6. Cálculo de la Temperatura Superficial Terrestre (LST)	20
3.2.7. Variabilidad de la LST y su relación con el retroceso glaciar	23
3.3. Materiales e instrumentos.....	24
3.4. Población y muestra de estudio.....	25
3.4.1. Población.....	25
3.4.2. Muestra	26

3.4.3 Muestra temporal.....	26
3.5. Operacionalización de variables	26
3.6. Procesamiento y análisis de datos	28
3.6.1. Obtención y corrección de imágenes satelitales	28
3.6.2. Análisis estadístico	28
CAPÍTULO IV: RESULTADOS.....	29
4.1. Delimitación y caracterización del área de estudio	29
4.2. Identificación de la extensión espacial del glaciar.....	34
4.2.1. Área glaciar anual.....	34
4.2.2. Mapas de cobertura glaciar	34
4.3. Comparación de la superficie glaciar, magnitud y tasa de retroceso.....	37
4.3.1. Pérdida absoluta y porcentual por periodo.....	37
4.3.2 Tendencia temporal del retroceso glaciar.....	38
4.3.3. Aceleración del retroceso (punto de quiebre).....	40
4.4. Cálculo de la Temperatura Superficial Terrestre (LST).....	41
4.4.1. LST en el polígono glaciar	41
4.4.2. LST borde glaciar	42
4.4.3. Tendencia temporal de la LST	43
4.4.4. Mapas de distribución espacial de la LST	44
4.5. Análisis de la relación multitemporal entre el retroceso glaciar y la LST	47
4.5.1. Correlación entre área glaciar y LST.....	47
4.5.2. Modelo de regresión lineal.....	48
4.5.3. Comparación térmica entre polígono y borde glaciar	48
4.5.4. Correlación con desfase temporal.....	49
4.5.5. Anomalía acumulada y pérdida glaciar	49
4.5.6. Contrastación de hipótesis.....	50
4.6. Patrones de cambio glaciar y zonas con mayor susceptibilidad.....	52
4.6.1. Clasificación por periodos según tasa de retroceso glaciar.....	52

4.6.2. Susceptibilidad por zona térmica	52
4.6.3. Mapa de anomalías acumuladas	53
4.6.4. Patrones espaciales identificados	55
4.6.5. Zonas con mayor vulnerabilidad	56
CAPÍTULO V: DISCUSIÓN	57
CONCLUSIONES	60
RECOMENDACIONES	62
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	63
ANEXOS	68

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Descripción de las imágenes satelitales.....	18
Tabla 2. Operacionalización de variables de investigación	26
Tabla 3. Área glaciar del Nevado Quelccaya por año (km ²)	34
Tabla 4. Pérdida glaciar absoluta y porcentual por periodo.....	38
Tabla 5. Resultados del modelo de regresión lineal.....	39
Tabla 6. Tasas de retroceso antes y después del punto de quiebre	40
Tabla 7. Temperatura Superficial terrestre en el polígono glaciar por año.....	41
Tabla 8. Temperatura Superficial Terrestre en el borde glaciar por año	42
Tabla 9. Matriz de correlaciones entre área glaciar y variables térmicas	47
Tabla 10. Relación entre anomalía acumulada y pérdida glaciar	50
Tabla 11. Resumen de análisis realizados	51

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Búsqueda en la plataforma Earth Explorer del USGS.....	18
Figura 2. Mapa de ubicación del Nevado Quelccaya, Cordillera Vilcanota, Perú	29
Figura 3. Mapa de topografía del Nevado Quelccaya	31
Figura 4. Mapa de relieve del Nevado Quelccaya	31
Figura 5. Mapa de pendientes del Nevado Quelccaya	33
Figura 6. Extensión glaciar del Nevado Quelccaya, Año 2013.....	35
Figura 7. Extensión glaciar del Nevado Quelccaya, Año 2019.....	36
Figura 8. Extensión glaciar del Nevado Quelccaya, Año 2024.....	36
Figura 9. Superposición multitemporal del retroceso glaciar-Nevado Quelccaya.....	37
Figura 10. Tendencia del área glaciar del Nevado Quelccaya (2013-2024)	39
Figura 11. Punto de quiebre en la tendencia del área glaciar	41
Figura 12. Tendencia de la LST media en el polígono glaciar (2013-2024).....	44
Figura 13. Distribución espacial de la LST en el Nevado Quelccaya – Año 2013	45
Figura 14. Distribución espacial de la LST en el Nevado Quelccaya – Año 2019	45
Figura 15. Distribución espacial de la LST en el Nevado Quelccaya – Año 2024	46
Figura 16. Relación entre LST media y el área glaciar del Nevado Quelccaya.....	48
Figura 17. Correlación cruzada entre anomalía de LST y tasa de retroceso.....	49
Figura 18. Mapa de susceptibilidad al retroceso glaciar del Nevado Quelccaya.....	53
Figura 19. Mapa de anomalías térmicas acumuladas (2021-2024)	54
Figura 20. Zonas críticas de retroceso glaciar en el Nevado Quelccaya.....	55

ÍNDICE DE ANEXOS

Anexo 1. Matriz de consistencia	68
Anexo 2. Mapas de extensión glaciár en formato A3	70
Anexo 3. Mapas de la LST en formato A3	71
Anexo 4. Mapas de patrones y susceptibilidad en formato A3	72

RESUMEN

El objetivo fue evaluar el retroceso glaciar multitemporal del Nevado Quelccaya y su relación con la variación de la Temperatura Superficial Terrestre entre el 2013 a 2024. Se empleó un enfoque cuantitativo, con diseño no experimental de tipo longitudinal y alcance correlacional, utilizando imágenes Landsat 8 y 9 para delimitar la extensión glaciar mediante el Índice de Nieve de Diferencia Normalizada y estimar la LST. El análisis incluyó estadística descriptiva, prueba de Mann-Kendall, regresión lineal, correlación de Pearson, prueba t de Student, correlación cruzada y análisis de anomalía acumulada. Los resultados evidenciaron una pérdida de superficie glaciar de 6,90 km² (17,06 % del área inicial), con una tasa media de retroceso de 0,50 km²/año y una aceleración del 95,83 % a partir del año 2020. La LST media fue de -2,31 °C en el polígono glaciar y 9,50 °C en el borde, con una diferencia térmica de 11,81 °C ($p < 0,001$). La prueba de Mann-Kendall confirmó una tendencia positiva significativa de la LST ($\tau = 0,45$, $p = 0,05$). Las correlaciones directas anuales no fueron significativas; sin embargo, el análisis de correlación cruzada evidenció una relación entre la anomalía de LST del borde glaciar y la tasa de retroceso del año siguiente (lag 1). El análisis de anomalía acumulada mostró que los periodos cálidos precedieron a las mayores pérdidas. Se aceptó la hipótesis alternativa, concluyendo que existe una relación significativa entre el retroceso glaciar y la LST, con un retardo aproximado de un año y un efecto acumulativo del calentamiento sostenido. El sector norte fue identificado como zona de mayor susceptibilidad (LST > 31,28 °C, percentil 90). El deshielo del nevado amenaza el agua disponible y los ecosistemas de alta montaña. No obstante, estos resultados ofrecen una base técnica para formular estrategias de adaptación climática y gestión hídrica sostenible.

Palabras clave: Temperatura superficial terrestre; retroceso glaciar; Nevado Quelccaya; teledetección; cambio climático.

ABSTRACT

The objective was to assess the multitemporal glacial retreat of Nevado Quelccaya and its relationship with variations in land surface temperature between 2013 and 2024. A quantitative approach was employed, with a non-experimental, longitudinal design and a correlational scope, using Landsat 8 and 9 imagery to delineate the glacier extent using the Normalized Difference Snow Index and to estimate LST. The analysis included descriptive statistics, the Mann-Kendall test, linear regression, Pearson's correlation, Student's t-test, cross-correlation, and cumulative anomaly analysis. The results showed a glacier area loss of 6.90 km² (17.06 % of the initial area), with an average retreat rate of 0.50 km²/year and an acceleration of 95.83 % starting in 2020. The mean LST was -2.31 °C in the glacier polygon and 9.50 °C at the edge, with a temperature difference of 11.81 °C ($p < 0.001$). The Mann-Kendall test confirmed a significant positive trend in LST ($\tau = 0.45, p = 0.05$). The direct annual correlations were not significant; however, cross-correlation analysis revealed a relationship between the LST anomaly at the glacier edge and the retreat rate of the following year (lag 1). The cumulative anomaly analysis showed that warm periods preceded the greatest losses. The alternative hypothesis was accepted, concluding that there is a significant relationship between glacier retreat and LST, with an approximate one-year lag and a cumulative effect of sustained warming. The northern sector was identified as the area of greatest susceptibility (LST > 31.28 °C, 90th percentile). The melting of snow-capped mountains threatens water availability and high-mountain ecosystems. However, these findings provide a technical basis for developing climate adaptation strategies and sustainable water management.

Keywords: Land Surface Temperature; glacial retreat; Nevado Quelccaya; remote sensing; climate change.

INTRODUCCIÓN

Según el Panel Intergubernamental sobre Cambio Climático (IPCC, 2021), los glaciares del mundo han reducido su volumen de forma continua desde mediados del siglo XX, con una aceleración notable en los últimos años. El retroceso glaciar es, de hecho, uno de los signos más claros y alarmantes del calentamiento global. El World Glacier Monitoring Service (WGMS) estima que los glaciares de montaña pierden anualmente entre 0,5 y 1 m. de espesor equivalente en agua, lo que contribuye directamente al ascenso del nivel del mar y a la reducción de agua dulce disponible para millones de personas. Esta pérdida no solo afecta el equilibrio climático del planeta, sino que también impacta directamente a comunidades humanas que dependen de estos ecosistemas para el suministro de agua, la regulación hídrica y la estabilidad ambiental.

En Perú, la situación es especialmente crítica. El país concentra aproximadamente el 70 % de los glaciares tropicales del mundo, lo que lo convierte en una de las naciones más vulnerables al cambio climático (INAIGEM, 2022). Desde 1962, la superficie glaciar nacional se ha reducido en más del 50 %, particularmente en cordilleras como la Blanca, Huaytapallana y Vilcanota. Esta pérdida afecta gravemente la seguridad hídrica de extensas zonas altoandinas, perjudicando la agricultura, el suministro de agua potable, la producción hidroeléctrica y la biodiversidad local. Además, el deshielo acelerado incrementa el riesgo de desastres naturales como aluviones, deslizamientos y la formación de lagunas glaciares inestables, amenazando la vida y los medios de vida de las comunidades cercanas.

A nivel local, el nevado Quelccaya, ubicado en la cordillera Vilcanota entre las regiones de Cusco y Puno, es reconocido como el casquete glaciar tropical más grande del mundo. En la década de 1980, su superficie superaba los 44 km² (Hanshaw y Bookhagen, 2014). Sin embargo, estudios recientes han documentado una pérdida acelerada de su cobertura glaciar, con una reducción estimada del 37 % entre 1980 y 2020, lo que evidencia un ascenso de la línea de equilibrio y una intensificación de la ablación durante periodos cálidos (Lamantia et al., 2024). La temperatura superficial terrestre (LST) se ha identificado como un factor clave en este proceso, ya que el calentamiento de la superficie promueve el derretimiento del hielo, especialmente en los

márgenes del glaciar y en altitudes elevadas. A pesar de su importancia, el nevado Quelccaya requiere estudios actualizados que integren el análisis de la LST como variable explicativa del retroceso glaciar, lo que permitiría comprender mejor los mecanismos térmicos que controlan la pérdida de hielo en esta zona.

No obstante, la presente Investigación presenta limitaciones metodológicas que deben considerarse. El análisis se basa en una sola escena satelital por año, lo que lo hace vulnerable a la nubosidad puntual; asimismo, al no contar con validación in situ, los valores de LST y NDSI reflejan tendencias espaciales más que mediciones directas. El uso del umbral fijo $NDSI \geq 0,4$ puede ser sensible a la presencia de hielo sucio o detritos, afectando la delimitación del borde glaciar. Finalmente, los resultados, al corresponder al caso particular del Quelccaya, no son directamente extrapolables a otros glaciares con distinta morfología y dinámica climática.

En este contexto, la presente investigación tiene como objetivo evaluar el retroceso glaciar multitemporal del nevado Quelccaya y su relación con la variación de la temperatura superficial terrestre, utilizando herramientas de teledetección, sistemas de información geográfica (SIG) y análisis estadístico. Se plantea como hipótesis que existe una relación significativa entre ambas variables, manifestada a través de una tendencia negativa del área glaciar y una tendencia positiva de la LST, tanto en el polígono como en el borde glaciar. Los resultados obtenidos permitirán cuantificar la magnitud del retroceso, identificar patrones espaciales de pérdida y establecer vínculos estadísticos entre el aumento térmico y la disminución de la cobertura glaciar. Asimismo, sirven de base técnica para mejorar el monitoreo de los glaciares tropicales en Perú, respaldar la toma de decisiones con información científica y orientar políticas de adaptación climática y gestión hídrica sostenible en ecosistemas altoandinos.

CAPÍTULO I: EL PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN

1.1 Descripción del problema

Los glaciares tropicales andinos son parte de las reservas hídricas críticas que regulan el caudal de los ríos y la disponibilidad del agua durante estaciones secas, de tal forma, aportan al mantenimiento de ecosistemas altoandinos y diversas actividades humanas dependientes del deshielo (Malone, 2022). En ese contexto, Perú, cuenta con diversos nevados pertenecientes a los andes tropicales, uno de ellos, es el Nevado Quelccaya, ubicado en la cordillera Vilcanota, entre las regiones Cusco y Puno, representa el casquete glaciar tropical más grande del mundo. Dicho nevado contaba con una extensión que superaba los 44 km² (Hanshaw y Bookhagen, 2014), en la década de 1980. No obstante, diferentes estudios sobre glaciares recientes de muestran una pérdida de masa y superficie, registrándose reducción glaciar aproximada del 37 % de su área total entre los años 1980 y 2020, lo que evidencia un ascenso de la línea de equilibrio y una intensificación de la ablación durante periodos cálidos, cabe recalcar que se le han vinculado fenómenos climáticos como El Niño (Lamantia et al., 2024). Dichos cambios indican que el equilibrio entre la acumulación y ablación está alterado, lo que sugiere riesgos sobre la disponibilidad hídrica a mediano y largo plazo en las cuencas del lugar.

Si bien, la literatura científica ha documentado una reducción de área y los cambios en la línea de equilibrio en diversos glaciares andinos (Malone, 2022; Lamantia et al., 2024), persiste una brecha metodológica relevante, la cual es, el uso de la temperatura superficial terrestre como una variable que explica y cuantifica la dinámica de la pérdida de la cobertura glaciar sigue siendo limitada en estudios locales. Cabe mencionar que, la temperatura superficial terrestre, es derivada de sensores térmicos satelitales, ofreciendo una medida directa del estado térmico de la superficie (como hielo, detrito, roca y agua), así mismo, puede captar procesos de fusión superficial y variabilidad de energía que no siempre quedan reflejadas por la temperatura del aire medida en estaciones meteorológicas puntuales (Jiménez J. et al., 2009; Malakar et al., 2018). Investigaciones regionales han evidenciado que el calentamiento de la superficie terrestre puede cambiar con la altitud y que en los Andes hay un patrón de calentamiento dependiente de elevación detectable a través de la LST (Aguilar J. et al., 2019). Por lo que, incorporar el uso de la temperatura superficial terrestre en un análisis multitemporal

de cambio glaciar es metodológicamente sólido y de gran aporte para entender las causas de la desglaciación.

En ese sentido, combinar el uso de índices espectrales para delimitar hielo (NDSI) y datos de la temperatura superficial terrestre (LST) permite elaborar un análisis espaciotemporal que relacionan cambios de cobertura glaciar con tendencias térmicas superficiales (Malone, 2022; Jiménez J. et al., 2009). A pesar de ello, metodológicamente, son escasas las investigaciones que integren series multitemporales de LST y áreas glaciales en el Nevado Quelccaya. Esta ausencia estaría limitando la capacidad de generar proyecciones más certeras sobre la persistencia del glaciar y sobre la planificación del recurso hídrico en la región, así como el planteamiento de medidas de adaptación.

Por lo que, es imprescindible efectuar un análisis multitemporal que combina la estimación de la LST y la cuantificación multianual de la superficie glaciar del Nevado Quelccaya, con el fin de determinar si existe una relación estadísticamente significativa entre la variación térmica superficial y la pérdida del área glaciar y cuanta parte de la variación anual del retroceso puede explicarse por los cambios de la temperatura superficial terrestre. Este abordaje reforzará el conocimiento científico sobre la desglaciación en los glaciares tropicales, también ofrecerá información importante para que las comunidades andinas, que dependen del aporte glaciar, y autoridades competentes puedan desarrollar una gestión ambiental sostenible.

1.2 Formulación del problema

1.2.1 Problema general

¿Cuál es la relación entre el retroceso glaciar multitemporal y la variación de la temperatura superficial terrestre del Nevado Quelccaya, Cordillera Vilcanota?

1.2.2 Problemas específicos

- a. ¿Cuál es la extensión espacial del glaciar en diferentes periodos, mediante la delimitación espectral usando el Índice de Nieve Normalizado (NDSI), en imágenes satelitales multitemporales del Nevado Quelccaya, Cordillera Vilcanota?
- b. ¿Cómo varía la superficie glaciar correspondiente a cada año de estudio para determinar la magnitud y la tasa de retroceso del Nevado Quelccaya, Cordillera Vilcanota?

- c. ¿Cuál es la Temperatura Superficial Terrestre (LST) a partir de bandas térmicas satelitales y generar mapas multitemporales que describan su variación espacial en el entorno del Nevado Quelccaya, Cordillera Vilcanota?
- d. ¿Qué relación espacial y temporal existe entre el retroceso glaciar y la variación de la LST mediante herramientas estadísticas y geoespaciales del Nevado Quelccaya, Cordillera Vilcanota?
- e. ¿Cuáles son los patrones de cambio glaciar y zonas con mayor susceptibilidad al retroceso en función de la tendencia de la temperatura superficial terrestre del Nevado Quelccaya, Cordillera Vilcanota?

1.3 Justificación e importancia

a. Desde el punto de vista ambiental

Esta investigación es ambientalmente justificada porque una pérdida de la cobertura o superficie de glaciar del Nevado Quelccaya tiene efectos sobre los ecosistemas altoandinos que dependen de su aporte hídrico para mantener un equilibrio ecológico, es decir que actúan como reservorios naturales, van liberando agua de manera progresiva, en especial, durante la estación seca, de tal forma, se garantiza el mantenimiento de bofedales, humedales, riberas o suelos que son importantes para sostener una biodiversidad. Por tanto, analizar la relación entre la temperatura superficial terrestre y el retroceso glaciar permite identificar con mayores detalles los procesos del calentamiento global que influyen la fusión del hielo.

b. Desde el punto de vista social

Existen comunidades altoandinas que dependen del agua proveniente de la Cordillera Vilcanota en general, ya que es fundamental para sus actividades como el consumo humano, agricultura, ganadería y el mantenimiento de bofedales utilizados como pastizales. Por lo que el retroceso glaciar y el consecuente incremento de la vulnerabilidad hídrica afectaría la seguridad alimentaria, hídrica y cultural de estas poblaciones, a la vez que genera conflictos sociales por el acceso a recursos cada vez más limitados. Es por ello, que investigar este problema contribuirá a generar información para anticipar posibles escenarios de riesgo mediante un análisis de tendencias térmicas y del retroceso glaciar, para que las autoridades locales, regionales y nacionales puedan implementar acciones de adaptación.

c. Desde el punto de vista económico

El presente estudio brinda información relevante para evaluar riesgos económicos relacionados con la reducción de recursos hídricos y a la vez planificar alternativas más sostenibles. Esto es debido a que el retroceso glaciar del Nevado Quelccaya tiene repercusiones importantes económicas, sobre todo, actividades como la agricultura y la ganadería, que son centrales en la economía rural andina. Estas dependen directamente del agua que proviene de la fusión glaciar que alimenta bofedales altoandinos, pastizales y sistemas de riego. En síntesis, la desglaciación sostenida afecta la productividad, incrementa costos, y perjudica la capacidad de sostener la ganadería.

d. Desde el punto de vista científico

El uso de la teledetección multitemporal y sistemas de información geográfico permitirá aportar evidencia científica sobre los cambios de la superficie del Nevado Quelccaya y la variabilidad de la temperatura superficial terrestre (LST) durante un mismo tiempo determinado, como uno de los procesos para explicar las causas de este problema ambiental, es decir, relacionarlo con el cambio climático. De tal manera, la presente investigación brindara conocimientos que podría ser replicado en otros sistemas de montaña y aportar a la literatura internacional sobre los efectos del cambio climático en este tipo de ecosistemas, además, se debe mencionar que, aun siendo uno de los casquetes glaciares tropicales más grandes del mundo, aún existe un déficit de estudios que integren la perspectiva hidrológica, glaciológica y ecológica en el estudio de las interacciones entre glaciares, biodiversidad y el cambio climático.

1.4. Objetivos

1.4.1. Objetivo General

Evaluar el retroceso glaciar multitemporal y su relación con la variación de la Temperatura Superficial Terrestre en el Nevado Quelccaya, Cordillera Vilcanota.

1.4.2. Objetivos Específicos

- a. Identificar la extensión espacial del glaciar en diferentes periodos, mediante la delimitación espectral usando el Índice de Nieve Normalizado (NDSI), en imágenes satelitales multitemporales del Nevado Quelccaya, Cordillera Vilcanota

- b. Comparar la superficie glaciar correspondiente a cada año de estudio para determinar la magnitud y la tasa de retroceso del Nevado Quelccaya, Cordillera Vilcanota
- c. Calcular la Temperatura Superficial Terrestre (LST) a partir de bandas térmicas satelitales y generar mapas multitemporales que describan su variación espacial en el entorno del Nevado Quelccaya, Cordillera Vilcanota
- d. Analizar la relación espacial y temporal entre el retroceso glaciar y la variación de la LST mediante herramientas estadísticas y geoespaciales del Nevado Quelccaya, Cordillera Vilcanota
- e. Evaluar los patrones de cambio glaciar e identificar las zonas con mayor susceptibilidad al retroceso en función de la tendencia de la temperatura superficial terrestre del Nevado Quelccaya, Cordillera Vilcanota

1.5. Hipótesis general

Sí existe una relación significativa entre el retroceso glaciar del Nevado Quelccaya y la variación de la Temperatura Superficial Terrestre (LST).

CAPÍTULO II: MARCO TEÓRICO

2.1. Antecedentes de la investigación

Gok et al. (2024), realizaron un estudio sobre las tendencias de la temperatura superficial terrestre (LST) mediante series temporales de imágenes Landsat en regiones de alta montaña en los Alpes suizos, las cuales fueron Landsat 5, 7 y 8 procesadas en la colección Landsat 2, con el objetivo de analizar el calentamiento en zonas de montaña y su impacto en la criosfera. Para ello, se compararon los valores de LST obtenidos mediante la teledetección con mediciones de 119 estaciones terrestres, logrando validar la precisión y consistencia de los datos satelitales. Además, analizaron un registro multitemporal de aproximadamente de 22 años para identificar tendencias térmicas y cuantificar los sesgos ocasionados por variaciones en el tiempo de adquisición del satélite, topografía y condiciones de cielo despejado. Tras aplicar correcciones a dichos sesgos, los autores determinaron que las tendencias de LST presentan incrementos de entre 0,07 y 0,10 km/año, lo que evidencia un claro calentamiento superficial en las zonas de montaña. Así mismo, concluyeron que los datos Landsat permiten detectar señales relacionadas con proceso criosféricos como el retroceso glaciar del permafrost, demostrando su utilidad para el monitoreo espacial y temporal del cambio climático en ambientes alpinos.

Salas y Duarte (2018), realizaron un estudio del tipo multitemporal de imágenes satelitales en relación con el volcán del nevado Ruíz, comprendido entre los años 1999-2016, mediante imágenes satelitales Landsat correspondientes a los años 1999, 2002, 2014 y 2016. La investigación se realizó abarcando un tiempo de 17 años, así mismo, aplicaron técnicas de procesamiento digital de imágenes, donde se empleó la clasificación de distancia mínima para realizar una categorización de los promedios de reflectancia. Con el propósito de garantizar la comparación entre los escenarios, se utilizó un proceso de homogeneización radiométrica, así mismo, la confiabilidad de la clasificación fue evaluada a través del coeficiente Kappa. Por último, con todos los datos obtenidos para dichos cuatro periodos se hizo un ajuste de regresión que brindo una proyección de la posible fecha de desaparición del glaciar del volcán nevado del Ruiz.

Zhang et al. (2018) realizaron una investigación titulada “Estimación diaria de la temperatura del aire en las superficies de los glaciares en la meseta tibetana utilizando datos LST”, donde sus hallazgos son relevantes para estudios de retroceso glaciar debido a que demuestran que la temperatura superficial terrestre funciona como un

indicador térmico estrechamente asociado a los procesos de ablación y pérdida de masa glaciar. Dado que el retroceso glaciar está directamente controlado por el balance energético en la superficie del glaciar, es decir que, un incremento en la LST implica mayor energía disponible para el derretimiento. Por lo que, los modelos basados en LST permiten estimar con precisión la temperatura del aire sobre superficies glaciares. En síntesis, concluye que la variable de temperatura superficial terrestre puede emplearse como una variable clave para explicar la dinámica del retroceso glaciar en regiones donde la disponibilidad de estaciones meteorológicas es limitada.

En el trabajo de Díaz y Bejarano (2017), se desarrolló un análisis multitemporal usando imágenes satelitales Landsat 6 y 7 ETM con el fin de evaluar el retroceso glaciar en el nevado Cotopaxi, Ecuador, entre 1998, 2007 y 2016. La investigación comprendió un tiempo de 18 años, con un intervalo de 9 años, con el fin de identificar la evolución del retroceso glaciar, el cual es asociado con el incremento de la temperatura global o cambio climático, un fenómeno que está siendo documentado mediante la teledetección en diferentes regiones del mundo. Además, utilizaron el programa ArcGIS y sus herramientas de análisis espacial para hacer una estimación de la superficie glaciar, lo que posibilitó el cálculo de valores aproximados de pérdida de masa glaciar durante el periodo evaluado. A partir de los datos obtenidos, se propuso una proyección que indica la continuidad de la reducción glaciar del nevado del volcán Cotopaxi hasta el año 2025.

Gallegos et al. (2018). En su estudio realizaron una evaluación de la variación multitemporal de la superficie del glaciar correspondiente al Nevado Cayambe, ubicado en Ecuador, utilizando imágenes Landsat. El propósito fue evaluar la variación de dicha cobertura durante los años 1978-2009, debido a la problemática ambiental de reducción constante de nieve y hielo en los nevados de dicha región, dejando expuestas morrenas, roquedos y otras geoformas. El área de estudio se ubicó a más de 5,79 m.s.n.m., el cual presenta pendientes suaves y valles profundos en el sector occidental, así mismo, hacia el oriente se visualiza pendientes más pronunciadas y una accidentada topografía. Los datos obtenidos evidencian que entre dichos años de estudio la superficie glaciar se redujo en un 25,58 % y la tasa de desglaciación por año fue de 0,85 %. Se concluye que los mayores porcentajes de reducción glaciar se dieron en la zona sureste (23,22 %) y noreste (30,97 %).

Francou (2013), en su artículo científico, afirma que los glaciares tropicales o de montaña son sensibles al cambio climático, es decir a las variables atmosféricas, puesto que, el comportamiento de estas depende del equilibrio entre los procesos físicos de acumulación y ablación. Así mismo, señala que, en el caso de los andes tropicales se empezó a registrar un retroceso glaciar a partir del siglo 18, intensificándose en el siglo

20, aproximadamente después de la década de los 70, con pérdidas de hasta un 50 % en superficie y volumen. Dicha desglaciación ocurre principalmente por la relación que tienen con el aumento de la temperatura atmosférica y la mayor incidencia de los fenómenos como El Niño. Finalmente, recalca que es necesario realizar investigaciones y monitoreos de la desglaciación progresiva ya que afecta a la disponibilidad hídrica y estabilidad de ecosistemas altoandinos como los bofedales, con el fin de establecer lineamientos de gestión ambiental.

Huacani (2021), realizó un estudio titulado “Efectos del cambio climático en la desglaciación del nevado Ampay-Apurímac, periodo 2000-2019, con el objetivo principal de determinar los efectos del cambio climático en la pérdida de la cobertura glaciar del mencionado nevado a través de herramientas de teledetección. Para eso, utilizo imágenes satelitales Landsat 7 y 8, calibradas en reflectancia TOA, procesadas en la plataforma Google Earth Engine. La delimitación de la cobertura glaciar se realizó mediante el Índice Diferencial Normalizado de Nieve. Por otro lado, los resultados obtenidos, evidencia una reducción significativa de la superficie glaciar, puesto que en el año 2000 se registraron 234,50 ha, mientras que para el año 2019 el área disminuyó a 91,98 ha, lo que representa una pérdida total de 142.52 ha equivalente al 54 %. Además, se incorporó información de la temperatura superficial terrestre, obtenida de bandas térmicas de Landsat, con el fin de evaluar su relación con la desglaciación como indicador del calentamiento del área glaciar. Finalmente, se concluye con una correlación negativa considerable entre la extensión glaciar y la temperatura media anual ($r = -0,65$), lo que refleja que el incremento térmico, representado también por el aumento del LST, contribuyó al retroceso glaciar.

Díaz et al. (2017), realizaron un estudio de análisis multitemporal entre los años 1975 y 2015 en relación con la variabilidad de la superficie glaciar de los nevados Allin Capac y Chichi Capac en Perú, donde aplicaron técnicas de teledetección para estimar la superficie glaciar de mencionados nevados, con el fin de analizar la variación espacial y temporal durante cuatro décadas. Los datos obtenidos muestran un retroceso glaciar significativo, puesto que en el año 1975 se tenía registro de un 52,3 km² y se pasó a un 16,9 km² en el año 2015, lo que representa una pérdida de 35,6 km². Además, se determinó que alrededor de un tercio del área del glaciar se ubicaba en una altura inferior a los 5000 m.s.n.m. en 1975, mientras que para el año 2015 este valor descendió a solo el 9 % del total. Por último, el estudio concluyó que el mayor retroceso glaciar ocurrió en las últimas tres décadas del siglo 20, reduciéndose así la cobertura en un 67 %.

El estudio de Luque y Clinio (2024), fue enfocado en el nevado Quelccaya, ubicado en la cordillera Vilcanota, con el fin de estudiar el retroceso glaciar, es decir la reducción de su cobertura glaciar en relación con el impacto de variables climáticas durante los años 2010-2022. En cuanto a la metodología utilizada, se utilizó imágenes Landsat 8, obtenidas de la plataforma Google Earth Engine, también se determinó el Índice Diferencial Normalizado de Nieve (NDSI) en el software R, la obtención de datos como temperaturas máximas, mínimas y precipitaciones fueron obtenidas de datos climáticos de TerraClim. Para el análisis de la relación entre las variables de estudio se utilizó la prueba estadística de Spearman. Los resultados mostraron una reducción considerable en la superficie glaciar, puesto que en el 2010 la superficie era de 40,46 km^2 , disminuyendo a 38,56 km^2 para el año 2022, con una proyección de reducción a 26,96 km^2 hacia el año 2050. La calibración del modelo arrojó errores promedios bajos, lo que confirma su confiabilidad. En cuanto a las variables climáticas, se observó un incremento tanto en la temperatura máxima (0,54 °C) como la mínima (0,79 °C), junto con una disminución de las precipitaciones en 58 mm. El análisis de correlación evidencio un r^2 igual a 0,79 entre el tiempo y la superficie glaciar, lo que refleja una relación inversa, mientras que con la temperatura se obtuvo un r^2 de 0,71, señalando que el aumento térmico está estrechamente relacionado con la pérdida de masa glaciar. En resumen, el incremento de las temperaturas constituye el principal factor que impulsa el retroceso del glaciar Quelccaya, mientras que la reducción de las precipitaciones ha limitado los procesos de acumulación de nieve.

Cunza (2024), realizó una estimación de la desglaciación del Nevado Ausangate a través de una evaluación multitemporal desde el año 1985 al 2020. En cuanto a la metodología, se obtuvo imágenes satelitales LANDSAT 5, 7 y 8, posteriormente, se procesó en el programa ArcGIS 10.5. Así mismo, realizó el cálculo del índice diferencial normalizado de nieve para cuantificar el perímetro y área del glaciar, luego, se utilizó el software Excel 2019 para estimar cuanto tiempo tiene de permanencia la cobertura glaciar del Nevado Ausangate, donde se aplicó el modelo de regresión lineal y prueba de Durbin-Watson. Finalmente, el resultado del R cuadrado fue de 0,73, evidenciando que la variable del tiempo o años tiene efectos significativos en la variación del área glaciar total, además, concluye que la tasa de desglaciación es del 50,59 % durante el periodo de tiempo determinado para el estudio, por lo que se estima que el nevado podría desaparecer por completo para el año 2076.

2.2. Bases teóricas

2.2.1. Cambio climático

Se entiende como un cambio atribuido directa o indirectamente de las actividades humanas, que altera la composición de la atmósfera mundial y se presenta de diferentes maneras. Las principales manifestaciones de este son el incremento de la temperatura media global, una alteración de patrones de precipitación y el retroceso de glaciares de manera acelerada (Zamora, 2015). Dichos cambios impactan directamente en la seguridad hídrica y en la resiliencia de los ecosistemas de alta montaña, como bofedales altoandinos.

2.2.2. Glaciar

Está definida como una gran masa de hielo que tiene origen por la compactación de nieve, la cual tiene una capacidad de desplazarse bajo la acción de la gravedad y su propia deformación interna (Cuffey y Paterson, 2010). La dinámica está regulada por el balance de masa, comprendido como la diferencia entre los procesos de acumulación y ablación. Cuando las pérdidas por ablación superan las ganancias por acumulación, se produce un retroceso glaciar. Este es un fenómeno considerado uno de los indicadores más sensibles frente a las consecuencias del cambio climático (Zemp et al., 2019).

2.2.3. Partes del glaciar

Organismos especializados en glaciología como el Servicio Geológico de Estados Unidos han estandarizado las partes de un glaciar. En ese sentido, cuentan con diferentes secciones que permiten entender su dinámica y comportamiento. De ese modo, se puede distinguir principalmente la zona de acumulación, donde sucede la compactación de nieve para transformarse en hielo; la zona de ablación, en la cual se produce la pérdida de masa ya sea por fusión, sublimación o desprendimientos por gravedad; ambas partes están separadas por la línea de equilibrio; así como la lengua glaciar, caracterizada por fluir en dirección a los valles; por último el frente glaciar, que es donde se puede observar con mayor notoriedad el retroceso o avance glaciar (Molnia, 2004).

2.2.4. Glaciares en el Perú

Perú cuenta con glaciares de tipo tropical, albergando aun una cantidad considerable a nivel mundial, localizados principalmente en las Cordilleras Vilcanota y Blanca. Dichos ecosistemas han ido sufriendo un retroceso significativo en las últimas décadas consecuente del cambio climático. Diversas investigaciones han documentado esta reducción, dada en la superficie glaciar y la aparición de nuevas lagunas, llamadas proglaciares, las cuales generan riesgos y alteraciones en los ecosistemas aledaños (Wood et al., 2021). Además, reportes oficiales, datan que más del 40% de la superficie glaciar peruana se ha ido perdiendo desde la década de los años 70, lo que evidencia la seriedad y gravedad de este problema (MINAM, 2019).

2.2.5. Descripción del Nevado Quelccaya

El glaciar Quelccaya es parte de la Cordillera del Vilcanota, entre las regiones Cusco y Puno, considerada como la segunda cordillera con mayor cobertura de nieve del Perú. Cuenta con una extensión de 134 km², políticamente se encuentra entre Pitumarca y Corani, asimismo, con anterioridad, era denominado el casquete tropical más grande a nivel global, no obstante, el derretimiento de su masa de hielo ha desplazado su lugar, después del Nevado Coropuna. En ese sentido, aproximadamente desde fines de la década de los 70 el Quelccaya ha sido estudiado, registrándose diversos datos relevantes, lo que es relevante para estudios relacionados con el cambio climático, puesto que es considerado como un indicador de efectos de dicho fenómeno en el tema del retroceso de glaciares (Díaz et al., 2022).

Según Thompson et al., (2013) el volumen de este glaciar ha disminuido entre un 30 % y 45 %, ello evidencia la vulnerabilidad del glaciar tropical ante el incremento de la temperatura media del aire, por consecuente, al cambio climático.

2.2.6. Temperatura Superficial Terrestre (LST)

Se define como la temperatura emitida por la superficie terrestre del planeta, la cual es medida según la radiación térmica que esta emite y registrada por sensores remotos ubicados en satélites. Asimismo, representa el calor real que posee la superficie de la Tierra, como la nieve, hielo, suelo, vegetación o rocas. Cabe recalcar que, se difiere de la temperatura del aire, puesto que es dependiente directamente de las propiedades físicas y de la energía que absorbe. En síntesis, es un indicador relevante en estudios de cambio climático, retroceso glaciar, hidrología y diversos procesos ambientales,

puesto que permite identificar variaciones térmicas a lo largo del tiempo y analizar su relación con la dinámica de la superficie terrestre (Ghaderpour et al., 2024).

2.2.7. Relación entre LST y el retroceso glaciar

La relación de estos dos conceptos se basa en que un incremento sostenido de la temperatura en la superficie del hielo tiende a aumentar la energía disponible para la fusión; en consecuencia, acelera los procesos de ablación y provoca una reducción progresiva de la masa glaciar. Diversas investigaciones han evidenciado que las tendencias positivas de la temperatura superficial terrestre se asocian de forma directa con una mayor pérdida de área y volumen glaciar; por ejemplo, Wang et al. (2023) evidenciaron que en los glaciares del Tíbet el aumento de la LST se correlaciona significativamente con el acelerado descenso de la masa durante los últimos años. De manera similar, Li et al. (2024) reportaron que un incremento de la LST en el casquete de Groenlandia se vincula con mayores tasas de derretimiento anual, confirmando que es un factor determinante en la dinámica del retroceso glaciar.

2.2.8. Teledetección e imágenes Landsat

Es una herramienta esencial para el monitoreo de glaciares y bofedales, puesto que permite analizar cambios multitemporales mediante el uso de imágenes satelitales como Landsat 8 y 9. Entre los principales indicadores utilizados se destacan el NDVI (Normalized Difference Vegetation Index), que mide la densidad y cobertura de la vegetación; el NDWI (Normalized Difference Water Index), que identifica cuerpos de agua y por último el NDSI (Normalized Difference Snow Index), que permite delimitar hielo y nieve. Todas estas herramientas han demostrado gran utilidad en el análisis de ecosistemas y en la detección de tendencias de expansión o pérdida (Quentin et al., 2023).

2.2.9. Índice Diferenciada de Nieve (NSDI)

El Servicio Geológico de los Estados Unidos (USGS) lo define como un índice espectral utilizado en teledetección con el fin de discriminar superficies de nieve de otro tipo de coberturas como vegetación, rocas o suelo. Está basada en la diferencia normalizada entre la banda verde y la banda de infrarrojo de onda corta de imágenes satelitales, en ese sentido, valores altos de este índice indican la probabilidad elevada de nieve o hielo, lo que permite delimitar áreas glaciales con mayor precisión.

2.3. Definición de Términos

2.3.1. Retroceso glaciar

Se define como la reducción de la extensión, disminución del grosor y volumen de la masa de un glaciar, se produce cuando el aumento de la línea inferior de la nieve permanente de alta montaña se eleva cada vez más a mayor altitud, hasta desaparecer por completo. Los principales factores son los cambios climáticos globales de los últimos años, el efecto invernadero, el deterioro de la capa de ozono y, en algunos casos, la actividad minera (Fountain et al., 2003).

2.3.2. Balance de masa

Se comprende como la adición algebraica de las cantidades de alimentación o acumulación de nieve y avalanchas y la masa pérdida por ablación (fusión, sublimación, desprendimientos) durante un periodo de al menos un año hidrológico. Si el resultado es positivo el glaciar aumentará de volumen, en cambio, si es negativo, este disminuye. Además, la igualdad de dicha adición se da en la línea de equilibrio (Rivera et al., 2016).

2.3.3. Análisis multitemporal

Es una técnica empleada en sensores remotos que utiliza imágenes procedentes de distintas fechas con el fin de detectar variaciones temporales en componentes ambientales. Según Coppin et al. (2004), los datos obtenidos tras un análisis multitemporal y multiespectral de satélites contribuyen de forma relevante para la detección, clasificación, mapeo y seguimiento a alteraciones en ecosistemas.

2.3.4. Imágenes satelitales

Son imágenes o fotografías tomadas desde el espacio por un satélite artificial sobre la superficie de la Tierra. Tienen un formato de archivo llamado ráster, el cual contiene información de la posición, forma, textura y la capacidad espectral de cada píxel en la imagen. Asimismo, son útiles para estudiar la vegetación, el clima, la geología, topografía y planificación urbana (Slaymaker, 2001).

2.3.5. Línea de equilibrio

Según Cogley et al., (2010), es la altitud promedio sobre un glaciar en donde la acumulación de nieve es igual a la pérdida por ablación durante un año hidrológico. Es

decir, es la cota en donde la ganancia de masa por la nieve y la pérdida por fusión, sublimación o entre otros se logra equilibrar.

2.3.6. Ablación glaciar

Es comprendido como la pérdida de masa glaciar debido a procesos como fusión, sublimación, evaporación, desprendimiento de hielo, entre otros. Este término está expresado usualmente en metros de equivalentes de agua o volumen, dependiente del método de medición. Por tanto, si la ablación supera la acumulación de un glaciar durante un periodo de tiempo determinado, la masa neta es negativa, lo que significa un retroceso del frente glaciar, disminución de espesor, por consecuente una reducción de superficie (Wang et al., 2023).

CAPÍTULO III: MARCO METODOLÓGICO

3.1. Diseño de la investigación

El diseño de la investigación se clasifica como no experimental, debido a que, en esta investigación no hay manipulación de las variables delimitadas, es decir solo se observa los fenómenos en un ambiente natural con el propósito de analizarlos (Hernández y Mendoza, 2018). Además, tiene un enfoque longitudinal ya que la evaluación se hace a lo largo de un periodo multitemporal, de tal forma permite identificar tendencias y variaciones tanto en la superficie glaciar del Nevado Quelccaya como en la temperatura superficial terrestre. Por último, el alcance es correlacional, porque busca determinar la relación existente entre las dos variables planteadas, complementándose con un componente descriptivo que caracteriza el comportamiento independiente de cada variable en el tiempo.

3.2. Acciones y actividades

3.2.1. Localización del área de estudio

El presente estudio se localiza en el Nevado Quelccaya, ubicado en la Cordillera Vilcanota entre las regiones de Puno y Cusco, teniendo como coordenadas geográficas aproximadas de 13° 56' de latitud sur y 70° 50' de longitud oeste. Se delimitará el área glaciar haciendo uso de la información cartográfica oficial del Instituto Geográfico Nacional del Perú y del INAIGEM. Cabe recalcar que la proyección cartográfica correspondiente es UTM zona 19S WGS 84.

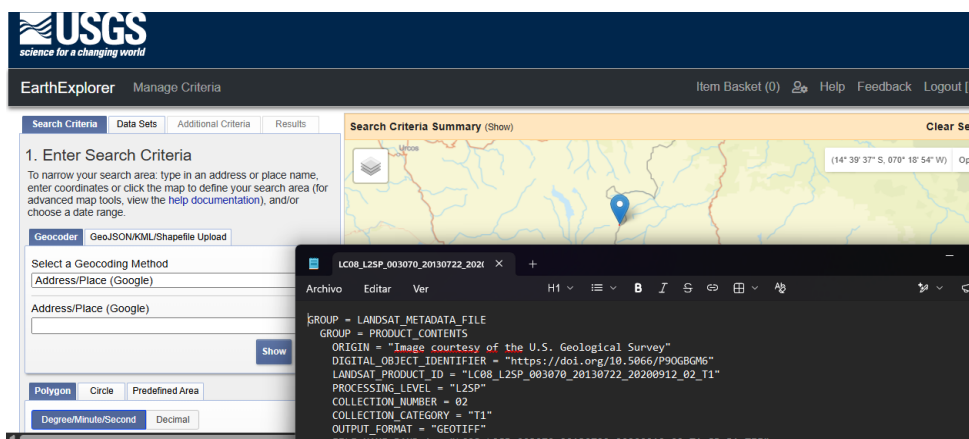
3.2.2. Recopilación de información

Para la recopilación de las imágenes satelitales se utilizó la plataforma Earth Explorer del Servicio Geológico de los Estados Unidos (USGS), complementada con Google Earth Engine para la verificación y selección de las escenas. Se trabajó con sensores Landsat 8 OLI/TIRS y Landsat 9 OLI-2/TIRS-2, debido a su mejor resolución radiométrica y consistencia espectral en las bandas térmica y de infrarrojo de onda corta. La serie temporal comprendió 12 años, distribuidos entre 2013 y 2024, priorizando imágenes con nubosidad menor al 20 % y pertenecientes a la época seca (julio-agosto), con el fin de minimizar interferencias atmosféricas y garantizar una correcta

interpretación espectral de la cobertura glaciar. Dependiendo del propósito del análisis, se emplearon imágenes de nivel Level-2 para la delimitación glaciar y Level-1 para el cálculo de la temperatura superficial terrestre, de acuerdo con los requerimientos de cada procedimiento (detalladas en la Tabla 1). Así mismo, la Figura 1 muestra un ejemplo de las búsquedas realizadas en la plataforma mencionada.

Figura 1

Búsqueda en la plataforma Earth Explorer del USGS



Nota. Interfaz de la plataforma Earth Explorer USGS.

Tabla 1

Descripción de las imágenes satelitales

Año	Satélite	Sensor	Fecha	Path/Row	Nubosidad
2013	Landsat8	OLI/TIRS	22/07/2013	003/070	5,51
2014	Landsat8	OLI/TIRS	09/07/2014	003/070	7,97
2015	Landsat8	OLI/TIRS	29/08/2015	003/070	1,81
2016	Landsat8	OLI/TIRS	30/07/2016	003/070	0,68
2017	Landsat8	OLI/TIRS	02/08/2017	003/070	1,74
2018	Landsat8	OLI/TIRS	06/09/2018	003/070	10,49
2019	Landsat8	OLI/TIRS	08/08/2019	003/070	0,18
2020	Landsat8	OLI/TIRS	10/08/2020	003/070	1,49
2021	Landsat8	OLI/TIRS	13/08/2021	003/070	3,66
2022	Landsat9	OLI/TIRS	07/07/2022	003/070	0,27
2023	Landsat8	OLI/TIRS	19/08/2023	003/070	1,49
2024	Landsat8	OLI/TIRS	24/07/2024	003/070	0.28

Nota. Las imágenes Level-2 (Surface Reflectance) se utilizaron para el cálculo del NDSI, mientras que las imágenes Level-1 (TOA) se emplearon para el cálculo de la LST.

3.2.3. Correcciones de las imágenes satelitales

Las imágenes satelitales seleccionadas corresponden al nivel de procesamiento Landsat Collection 2 Level-2, brindadas por el USGS. Dicho nivel de procesamiento cuenta con correcciones atmosféricas y radiométricas estandarizadas, lo que permite garantizar la calidad y comparabilidad de los datos a lo largo del periodo de estudio señalado. Por tanto, no se aplicaron correcciones adicionales a las imágenes recopiladas, sin embargo para las imágenes de Level-1 si se realizaron correcciones.

3.2.4. Delimitación de la cobertura glaciar

Con las imágenes corregidas se procedió a calcular el Índice Diferencial Normalizado de Nieve (NDSI), con el que se identificará la cobertura glaciar, mediante la siguiente ecuación 1:

$$NDSI = \frac{(Green - SWIR)}{(Green + SWIR)} \quad (1)$$

Cabe recalcar que se utilizaron la banda 3 y banda 6, además de aplicar el umbral $NDSI \geq 0,4$ para clasificar los píxeles entre el valor 1 como glaciar y el valor 0 como no glaciar, siguiendo la recomendación del INAIGEM (2017). Luego, se aplicó un filtro Majority Filter con el fin de eliminar píxeles aislados y lograr reducir el ruido en la clasificación. Posteriormente, se convirtió el ráster clasificado al formato vectorial, obteniendo así, polígonos que representan la extensión glaciar para cada año seleccionado.

En la tabla de atributos se unieron los polígonos correspondientes al glaciar (gridocode = 1) obteniendo uno solo que represente la superficie glaciar total del Nevado Quelccaya en km^2

Cabe mencionar que, no se utilizó el índice NDWI para excluir cuerpo de agua, puesto que el umbral $NDSI \geq 0,4$ resultó suficiente para discriminar de forma adecuada el hielo del glaciar de otros elementos en el área de estudio, lo cual ha sido aplicado en estudios anteriores en glaciares andinos. (Huacani, 2021; Luque y Clinio, 2024).

3.2.5. Pérdida superficial y tasa de retroceso

Con los polígonos glaciar obtenidos se procedió a calcular el área de la cobertura glaciar en km^2 y en *ha* mediante la herramienta Calculate Geometry de ArcGIS 10.5. Así mismo se elaboró una tabla comparativa con las superficies glaciares de cada año de estudio

seleccionado, en orden cronológico. Para cuantificar la magnitud del retroceso glaciar se calcularon tres indicadores:

a. Pérdida acumulada (km^2)

Es la diferencia entre el área del año inicial y el área del año final de un periodo determinado, expresada mediante la ecuación 2:

$$Perdida\ acumulada = S_i - S_f \quad (2)$$

b. Tasa anual de retroceso

Para comparar el retroceso en periodos de diferente duración, se calcula la pérdida acumulada dividida entre el número de años del intervalo, expresada mediante la ecuación 3:

$$Tds = \frac{(S1 - S2)}{n} \quad (3)$$

Donde:

$S1 = Valor\ de\ la\ fecha\ 1$

$S2 = Valor\ de\ la\ fecha\ 2$

$n = Diferencia\ entre\ ambos\ valores\ de\ fechas$

3.2.6 Calculo de la Temperatura Superficial Terrestre (LST)

La temperatura superficial terrestre se calculó a partir de imágenes Landsat 8 OLI/TIRS y Landsat 9 OLI-2/TIRS-2 de nivel de procesamiento Level-1, puesto que sólo cuentan con corrección radiométrica, pero no con la corrección atmosférica. Esta elección es necesaria desde el punto de vista metodológico, ya que el cálculo de la LST debe realizarse en función de los valores originales de radiancia en banda térmica, sin las transformaciones que incluye el procesamiento Level-2. Cabe recalcar que, a diferencia del cálculo de la LST, la delimitación de la cobertura glaciar mediante el índice NDSI se hizo ya con imágenes Level-2 (corregidas atmosféricamente), garantizando así una mejor discriminación espectral del hielo.

El procedimiento de cálculo se realizó en función del algoritmo propuesto por Jimenéz-Muñoz et al. (2009) y corresponde a un flujo de procesamiento secuencial en

el que se implementaron la estimación de índices espectrales, la corrección de la temperatura de brillo y la determinación de la emisividad superficial a partir de una condición basada en la cobertura de hielo.

a. Cálculo del Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI)

Si bien el objetivo de la investigación es el retroceso glaciar, sin embargo, la estimación de la temperatura superficial terrestre no solo requiere el cálculo de la emisividad superficial correspondiente al hielo, sino también de la emisividad superficial de coberturas adyacentes como el suelo desnudo, roca expuesta o vegetación altoandina. Por ello, para discriminar coberturas, se calculó el NDVI que determina la superficie vegetal al suelo desnudo. Se calculo a partir de las reflectancias en el rojo (Red, Banda 4) y el infrarrojo cercano (NIR, banda 5), tal como se aprecia en la ecuación 4:

$$NDVI = \frac{NIR - Red}{NIR + Red} \quad (4)$$

b. Cálculo de la Proporción de Vegetación (PVI)

Permite la estimación de la vegetación menos sensible a las variaciones del suelo subyacente. Su cálculo se realizó mediante la siguiente expresión, mediante la ecuación 5:

$$PVI = \sqrt{(NIR - a * Red - b)^2} \quad (5)$$

c. Cálculo del índice de Nieve de Diferencia Normalizada (NDSI)

Permite identificar los píxeles que corresponden a hielo o nieve y así asignarles un valor de emisividad específico ($\varepsilon = 0,99$), se calculo a partir de la banda verde (Green, banda 3) y la banda de infrarrojo de onda corta (SWIR, banda 6), tal como se aprecia en la ecuación 6:

$$NDSI = \frac{\rho_{Green} - \rho_{SWIR}}{\rho_{Green} + \rho_{SWIR}} \quad (6)$$

Cabe mencionar que, se usó el umbral recomendado por el INAIGEM (2017), se consideró como hielo o nieve aquellos píxeles con $NDSI \geq 0,4$.

d. Cálculo de la Temperatura de Brillo (BT)

Se obtuvo a partir de la banda térmica (Banda 10). Primero se convirtió los números digitales a radiancia espectral, mediante la ecuación 7:

$$L_{\lambda} = M_L * Q_{cal} + A_L \quad (7)$$

Donde M_L y A_L son los factores multiplicativo y aditivo, extraídos del archivo metadata de cada imagen. Posteriormente se aplicó la temperatura de brillo (Top of Atmosphere Brightness Temperature), mediante la ecuación 8:

$$T_B = \frac{K_2}{\ln\left(\frac{K_1}{L_{\lambda}} + 1\right)} \quad (8)$$

e. Estimación de la Emisividad Superficial (LSE)

Se calculo mediante la ecuación 9 de tipo condicional que discrimina entre superficies glaciares y no glaciares a partir del NDSI. Asignándole un valor constante de 0,99 a los píxeles clasificados como hielo, mientras que para las demás coberturas se aplica la formula empírica que utiliza el PVI calculado anteriormente:

$$\varepsilon = \begin{cases} 0,99, & \text{si } NDSI \geq 0,4 \text{ (nieve o hielo)} \\ 0,004 * PVI + 0,986 & \text{si } NDSI < 0,4 \text{ (otras coberturas)} \end{cases} \quad (9)$$

El valor asignado de 0,99 corresponde a la emisividad que es característica de las superficies glaciares en el rango térmico (USGS). Para las demás coberturas se aplicó la formulación de Sobrino et al. (2004), donde 0,986 es la emisividad del suelo desnudo y 0,004 un factor de ajuste para la vegetación.

f. Cálculo de la Temperatura Superficial Terrestre (LST)

Para finalizar, se calculó la LST corrigiendo la temperatura de brillo con la emisividad superficial, utilizando el algoritmo adaptado para la banda 10 de Landsat, mediante la ecuación 10:

$$LST = \frac{BT}{1 + \left(\frac{\lambda * BT}{\rho}\right) * \ln(\varepsilon)} \quad (10)$$

Posteriormente se convirtió a grados Celsius, utilizando la ecuación 11:

$$LST (^{\circ}C) = LST(K) - 273,15 \quad (11)$$

3.2.7 Variabilidad de la LST y su relación con el retroceso glaciar

Para evaluar la relación entre la variación de la temperatura superficial terrestre y el retroceso glaciar del Nevado Quelccaya, se construyó una base de datos integrada que incluyó las series multitemporales del área glaciar (km²) y de la LST media (°C), diferenciando dos zonas de análisis: el polígono glaciar (superficie cubierta por hielo) y el borde glaciar (perímetro de contacto con el sustrato rocoso). Esta distinción respondió a la necesidad de evaluar diferencialmente el comportamiento térmico en áreas con cobertura de hielo y en zonas expuestas de transición, dada su relevancia en los procesos de ablación glaciar.

El análisis estadístico se estructuró en cinco etapas complementarias. En la primera etapa, se realizó un análisis exploratorio visual mediante gráficos bidimensionales y series de tendencia, con el propósito de identificar patrones generales de comportamiento de las variables a lo largo del periodo de estudio.

En la segunda etapa, se aplicó el coeficiente de correlación de Pearson (r) para cuantificar la intensidad y dirección de la relación lineal entre el área glaciar y las siguientes variables: LST media del polígono glaciar, anomalía de LST del polígono glaciar y LST media del borde glaciar. La significancia estadística de cada correlación fue evaluada mediante un umbral de $p < 0,05$, siguiendo los lineamientos de Hernández y Mendoza (2018).

En la tercera etapa, se ajustó un modelo de regresión lineal simple empleando la LST media del polígono glaciar como variable predictora del área glaciar. Este modelo permitió estimar la magnitud de la pérdida de superficie glaciar asociada a cada incremento unitario de la temperatura y evaluar el poder explicativo de la variable térmica sobre la variabilidad del área glaciar a través del coeficiente de determinación (R^2).

Se aplicó la prueba t de Student para muestras independientes con el fin de comparar las LST medias anuales entre el polígono y el borde glaciar. No se requirió verificar el supuesto de homogeneidad de varianzas, ya que se utilizó la corrección de Welch, la cual es robusta ante diferencias de varianza.

En la quinta etapa, se implementó un análisis de correlación cruzada entre la serie de anomalías de LST del borde glaciar y la serie de tasas de retroceso anual, considerando desfases temporales de hasta dos años. Este análisis permitió evaluar la hipótesis de una respuesta retardada del glaciar frente a los estímulos térmicos, identificando el desfase temporal óptimo en el que la correlación resulta máxima y estadísticamente significativa.

Complementariamente, se calculó la anomalía acumulada de LST, entendida como la sumatoria de las anomalías de los dos años previos a cada periodo de pérdida, con el fin de evaluar el efecto del calentamiento sostenido en el tiempo sobre la magnitud del retroceso glaciar. Todos los procedimientos estadísticos fueron implementados en el software R Studio (versión 4.6.0), empleando los paquetes base stats para correlación, regresión y prueba t; el paquete trend para la prueba de Mann-Kendall; y el paquete forecast para el análisis de correlación cruzada.

La integración de estas técnicas permitió determinar, de manera rigurosa, si el incremento de la LST constituye un factor explicativo relevante en la pérdida de superficie glaciar del Nevado Quelccaya, considerando tanto la respuesta inmediata como la posible respuesta retardada del glaciar, en línea con lo documentado por Huacani (2021) y Aguilar et al. (2019) para glaciares tropicales andinos de características similares.

3.3. Materiales e instrumentos

Se utilizaron recursos digitales, software especializados y plataformas de acceso a datos satelitales que permitieron el procesamiento y análisis multitemporal del retroceso glaciar del Nevado Quelccaya.

a. Imágenes satelitales Landsat

- Fuente: Plataforma Earth Explorer del USGS.
- Sensores utilizados: Landsat 8 OLI/TIRS y Landsat 9 OLI-2/TIRS-2.
- Frecuencia temporal: 12 años (2013 – 2024).
- Variable relacionada: Superficie glaciar (km^2) y Temperatura Superficial Terrestre (LST).

b. Software SIG (Sistemas de Información Geográfica)

- ArcGIS 10.5 (ESRI) – ArcMap 10.8.2

Utilizado para geoprocésamiento, análisis de superficies, cálculo de áreas, generación de mapas temáticos, superposición de coberturas y cálculo de la Temperatura Superficial Terrestre (LST) mediante la extensión Spatial Analyst.

c. Software estadístico

- R Studio (versión 4.6.0)

Utilizado para el análisis de correlación de Pearson, regresión lineal, prueba t de Student con corrección de Welch, prueba de Mann-Kendall, correlación cruzada (cross-correlation) y análisis de anomalía acumulada.

d. Equipo de cómputo

- Procesador: Intel Core i7.
- Memoria RAM: 16 GB.
- Tarjeta gráfica: Compatible con procesamiento geoespacial.
- Sistema operativo: Windows 11 (64 bits).

e. Otros recursos complementarios

- Cartografía base: Instituto Geográfico Nacional (IGN) – Perú.
- Capas vectoriales de referencia: INAIGEM.
- Software de apoyo: Microsoft Excel 2024, utilizado para organizar datos tabulares y elaborar tablas comparativas de superficies glaciares.

3.4 Población y muestra de estudio

3.4.1 Población

La población de estudio incluyó los glaciares de la Cordillera Vilcanota, ubicados entre las regiones de Cusco y Puno, caracterizados por ecosistemas de glaciares tropicales de gran altitud.

3.4.2 Muestra

La muestra estuvo representada por la capa de nieve de Quelccaya, seleccionada por su prominencia como una de las principales capas de glaciares tropicales en Perú y por sus considerables signos representativos de retroceso glaciar en relación con la variabilidad climática y los procesos de cambio climático.

3.4.3 Muestra temporal

La muestra temporal consistió en imágenes satelitales Landsat del 2013 hasta 2024, siendo un total de 12 años, que fueron seleccionadas de manera no probabilística y deliberada, basándose en la calidad radiométrica, bajo cobertura nubosa (<20 %), accesibilidad de las bandas térmicas y compatibilidad espectral para el cálculo del Índice de Nieve de Diferencia Normalizada (NDSI) y la Temperatura de la Superficie Terrestre (LST).

En general, se utilizó una muestra representativa de escenas satelitales de todo el periodo de estudio, dando prioridad a las imágenes de la estación seca, para limitar a interferencia atmosférica y proporcionar comparabilidad multitemporal de los resultados. El límite temporal de 2013 a 2024 se estableció debido a la resolución radiométrica óptima y la consistencia del análisis térmico de la superficie para las imágenes de Landsat 8 y Landsat 9, proporcionando así una estimación confiable.

3.5. Operacionalización de variables

La tabla 2 muestra la operacionalización de variables de esta investigación, además el Anexo 1 explica su relación con los objetivos e hipótesis.

Tabla 2

Operacionalización de variables de investigación

Variable	Definición conceptual	Dimensiones	Indicador	Escala	Técnicas/Métodos
	Es la temperatura emitida por	- LST en polígono glaciar	- LST media anual (°C)	°C	- Teledetección (bandas térmicas Landsat 8 y 9) - Procesamiento en ENVI 5.1 y QGIS.

(continúa)

Tabla 2 (Continuación)

Variable	Definición conceptual	Dimensiones	Indicador	Escala	Técnicas/Métodos
Temperatura Superficial Terrestre (LST) (Variable independiente)	la superficie terrestre del nevado, calculada a partir de bandas térmicas satelitales, y usada como indicador del calentamiento superficial relacionado con procesos de fusión glaciar.		- LST máxima anual (°C). - LST mínima anual (°C). - Anomalía de LST (°C).	°C	- Algoritmo de conversión radiancia a temperatura. - Emisividad corregida.
		- LST en borde glaciar.	- LST media anual en borde (°C). - LST máxima en borde (°C). - Anomalía de LST en borde (°C).	°C	- Extracción mediante máscara de borde en ArcGIS/QGIS. - Análisis de zona de transición.
		-Tendencia térmica.	-Tendencia de LST (°C/año) - Tau de Kendall	°C/año	- Prueba de Mann-Kendall en R Studio - Regresión lineal.
		-Diferencia térmica.	- Diferencia LST polígono vs borde (°C).	°C	- Prueba t de Student en R Studio.
Retroceso glaciar del Nevado Quelccaya (Variable dependiente)	Comprende la Disminución de la extensión superficial del glaciar Quelccaya durante el periodo 2013-2024, como consecuencia de factores climáticos, principalmente el aumento de la temperatura superficial.	- Extensión glaciar.	- Área glaciar anual (km²). - Pérdida acumulada (km²).	km2	- Delimitación espectral mediante NDSI en ENVI 5.1 y ArcGIS 10.5 - Imágenes Landsat 8 y 9.
		- Tasa de retroceso.	- Tasa de retroceso anual (km²/año) - Tasa por periodo (km²/año)	km2/año	- Cálculo diferencial de áreas - Análisis en Excel y R Studio.
		-Aceleración del retroceso.	- Punto de quiebre (año). - Incremento porcentual de la tasa (%).	%/año	- Breakpoint analysis en R Studio. - Regresión segmentada.
		-Relación LST-retroceso	- Correlación de Pearson. - Correlación cruzada con desfase (lag 1 y 2) - Anomalía acumulada de LST	Adimensional.	- Correlación en R Studio. - Cross-correlation (paquete forecast) - Análisis de series temporales.

3.6. Procesamiento y análisis de datos

3.6.1. Obtención y corrección de imágenes satelitales

Las imágenes satelitales fueron obtenidas de los sensores Landsat 8 OLI/TIRS y Landsat 9 OLI-2/TIRS-2, aplicando técnicas de teledetección, geoprocesamiento y análisis multitemporal. Para la delimitación del área glaciar se empleó el índice de diferencia normalizada de nieve (NDSI), utilizando imágenes de nivel Level-2 (Surface Reflectance), que incluyen correcciones atmosféricas y radiométricas. Para el análisis de la variación térmica superficial y la estimación de la Temperatura Superficial Terrestre (LST) se emplearon imágenes de nivel Level-1 (Top of Atmosphere, TOA), ya que el algoritmo de cálculo requiere los valores originales de radiancia en la banda térmica, sin las correcciones atmosféricas incluidas en el Level-2.

3.6.2. Análisis estadístico

La investigación emplea un diseño cuantitativo correlacional entre la Temperatura Superficial Terrestre (LST) como variable explicativa y la superficie glaciar como variable de respuesta. Para evaluar esta relación, se aplicó el coeficiente de correlación de Pearson, complementado con regresión lineal simple, prueba t de Student (comparación térmica entre polígono y borde glaciar), análisis de correlación cruzada (cross-correlation) para evaluar desfases temporales, y análisis de anomalía acumulada de LST.

El enfoque general es descriptivo-correlacional, alineado con estudios de teledetección en glaciares tropicales. La validez y confiabilidad del análisis se garantiza mediante: (i) el uso de imágenes Landsat 8 y 9 validadas por el USGS; (ii) la selección de una imagen representativa por año en la época de estiaje, priorizando una nubosidad menor al 20 %, con el fin de garantizar la consistencia temporal; (iii) la aplicación de metodologías estandarizadas para el cálculo de NDSI y LST según protocolos del USGS; (iv) la implementación de todos los análisis en R Studio (versión 4.6.0); y (v) la verificación de supuestos estadísticos, como el de normalidad (Shapiro-Wilk) previa a pruebas paramétricas, así como, el supuesto de homocedasticidad (no fue requerido porque se utilizó la corrección de Welch para la prueba de t de Student).

CAPÍTULO IV: RESULTADOS

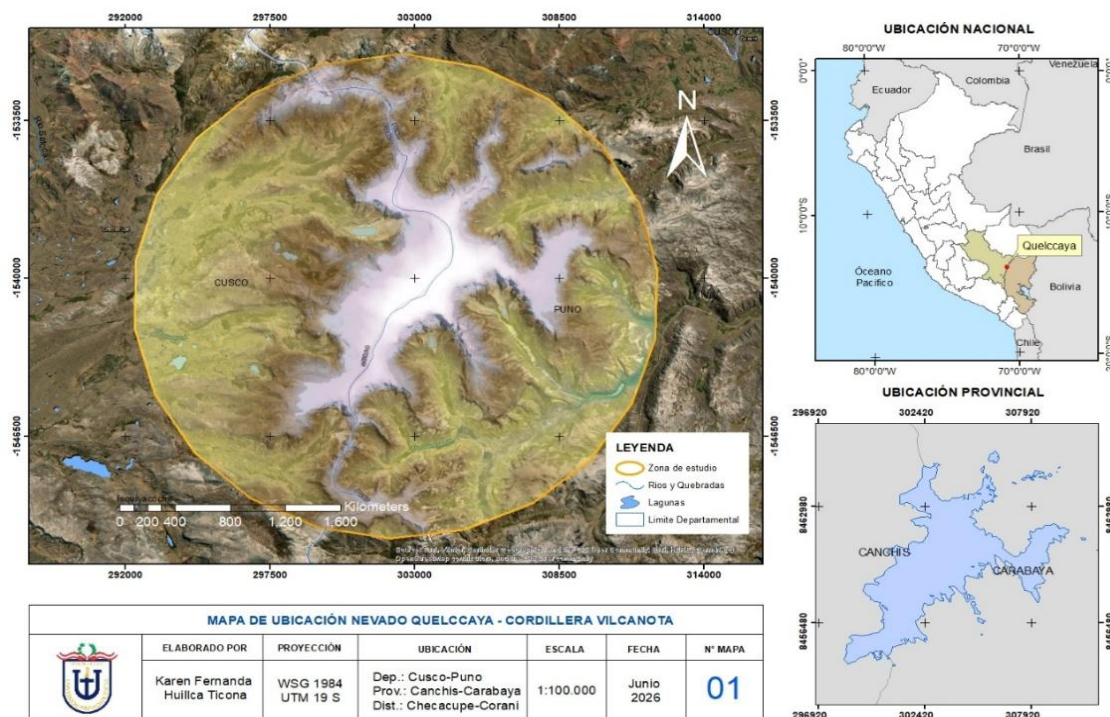
4.1. Delimitación y caracterización del área de estudio

El área de estudio fue definida en el Nevado Quelccaya (Cordillera Vilcanota, entre Cusco y Puno), utilizando DEM y coberturas base en UTM zona 19S (WGS 1984). Con ArcMap 10.8.2 se identificaron las unidades geomorfológicas predominantes y, a partir de hillshade y curvas de nivel, se calcularon la altitud, orientación de vertientes y pendientes para caracterizar el entorno glaciar (INAIGEM, 2025).

En la Figura 2 se presenta el mapa de ubicación del Nevado Quelccaya, que incluye la delimitación del casquete glaciar, la red hidrográfica (ríos, quebradas y lagunas), los límites departamentales (Cusco-Puno), provinciales (Canchis-Carabaya) y distritales (Checacupe-Corani), así como las ciudades cercanas. Esta configuración permite visualizar la importancia estratégica del glaciar como fuente hídrica para las cuencas de los ríos Vilcanota y Amazonas.

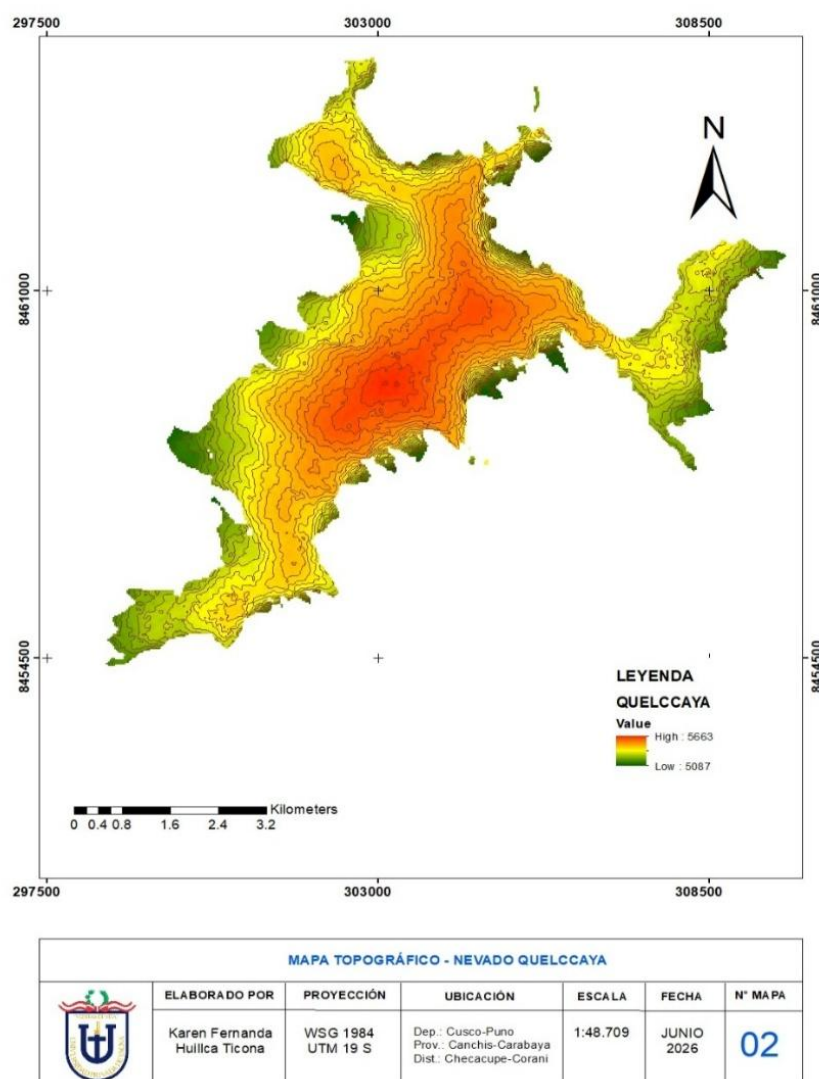
Figura 2

Mapa de ubicación del Nevado Quelccaya, Cordillera Vilcanota, Perú.

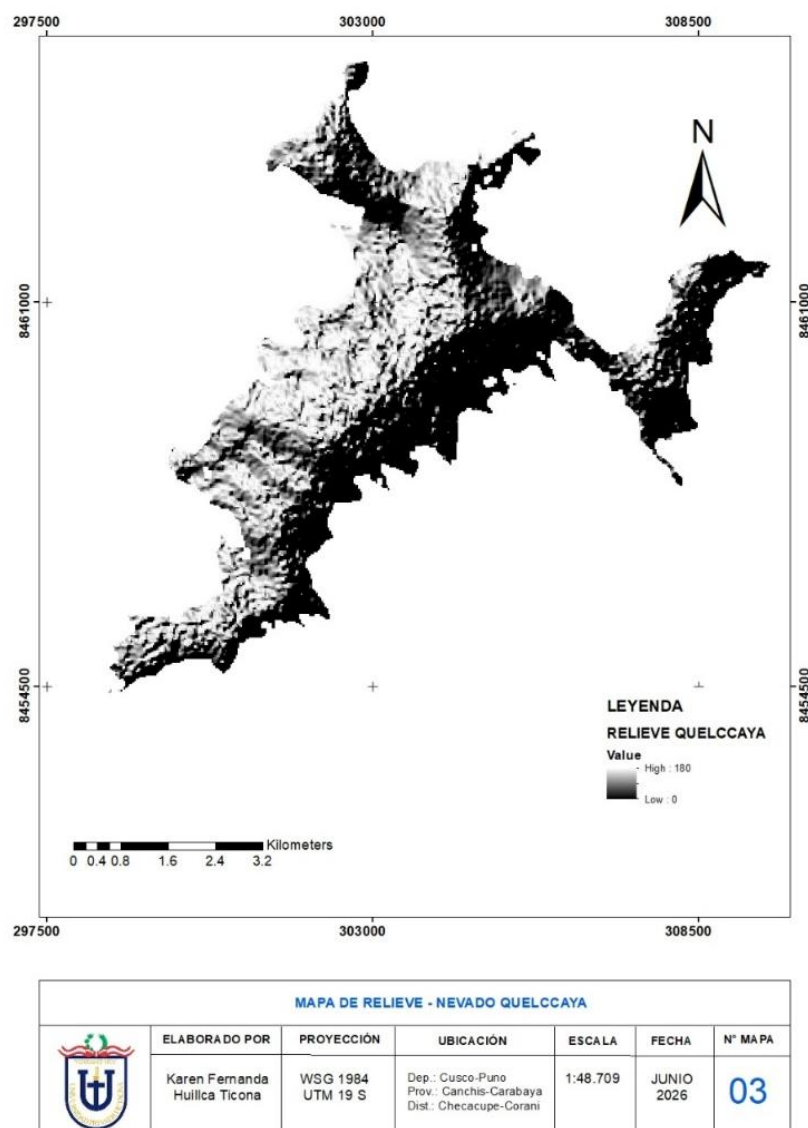


El Nevado Quelccaya es reconocido como el casquete glaciar tropical más grande del mundo (INAIGEM, 2025). Su morfología corresponde a un casquete glaciar de tipo meseta, caracterizado por una forma redondeada en la zona central y pendientes suaves, a diferencia de los glaciares de valle como el Ausangate que exhiben perfiles más escarpados (INAIGEM, 2025). El casquete fluye radialmente, alimentando múltiples lenguas glaciares desde su núcleo. La altitud máxima registrada es de 5659 m.s.n.m. en el domo Qoyllur Puruña, mientras que las zonas más bajas alcanzan los 4950 m.s.n.m. en el glaciar Phacu Cucho (INAIGEM, 2025). Según el Inventario Nacional de Glaciares del INAIGEM (2025), los glaciares del sistema Quelccaya se ubican en este rango altitudinal.

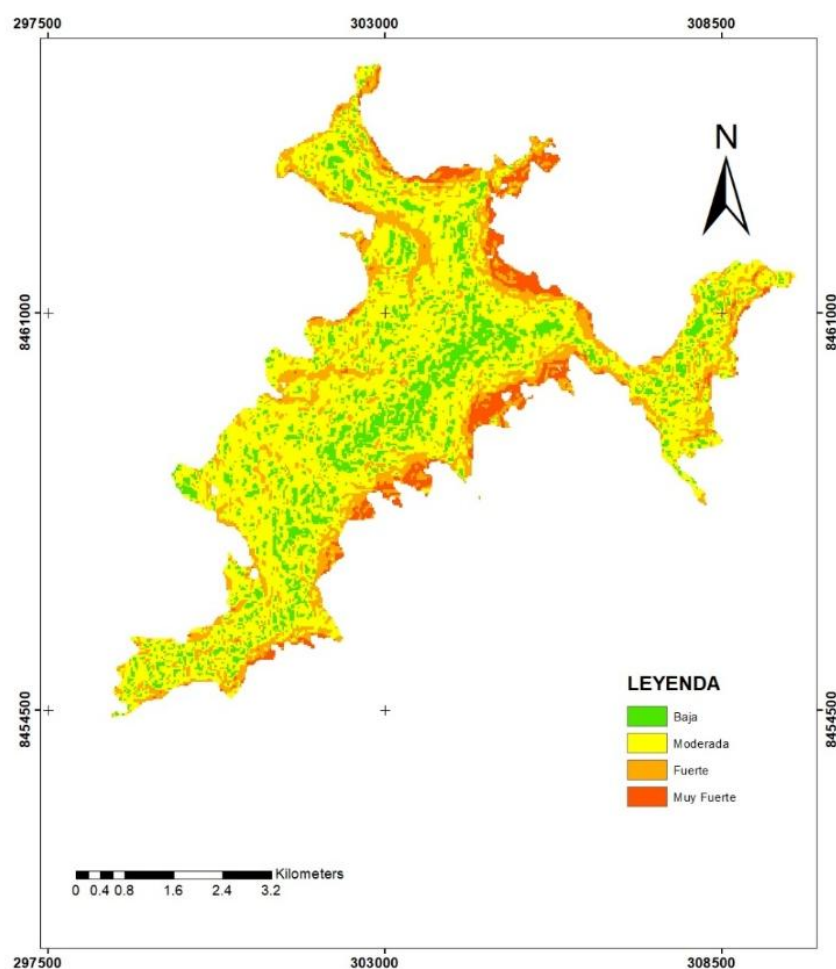
La topografía del área de estudio (Figura 3) es un factor determinante en su dinámica. El perfil del casquete revela una meseta de hielo con pendientes suaves en el núcleo, concentrando la mayor parte de la superficie sobre los 5300 m s. n. m. (INAIGEM, 2025). Esta configuración, sumada a su ubicación en el trópico donde la incidencia solar es casi perpendicular, lo hace particularmente sensible a los cambios de temperatura y a procesos como la sublimación (INAIGEM, 2025). Las curvas de nivel permiten identificar zonas de pendiente extrema, bordes glaciares empinados y áreas de acumulación en la parte central. Las mediciones meteorológicas directas realizadas en el glaciar revelan una temperatura media anual de $-3,2^{\circ}\text{C}$, con máximas de $6,9^{\circ}\text{C}$ y mínimas de $-13,4^{\circ}\text{C}$ (INAIGEM, 2025).

Figura 3*Mapa de topografía del Nevado Quelccaya*

El mapa de relieve del Nevado Quelccaya (Figura 4), generado a partir del sombreado (hillshade) del DEM, evidencia la morfología glaciár compleja. Las huellas de la dinámica pasada son visibles en las morrenas, que marcan los límites del avance durante la Pequeña Edad de Hielo (aproximadamente 1500-1880 d.C.), cuando el casquete alcanzó su máxima extensión reciente (Thompson et al., 1986). Estudios de testigos de hielo (Thompson et al., 1986) indican que durante ese periodo húmedo y frío, la acumulación de nieve compensaba la ablación. En la actualidad, el paisaje se caracteriza por la presencia de circos glaciares en las zonas altas, lenguas de hielo fragmentadas, morrenas laterales expuestas, grietas y fracturas que evidencian un núcleo central en retroceso (INAIGEM, 2025).

Figura 4*Mapa de relieve del Nevado Quelccaya*

En la Figura 5, el mapa de pendientes del Nevado Quelccaya muestra un predominio de valores bajos (0-5 %) en la parte central del casquete glaciar, lo que indica una superficie relativamente plana donde predomina la acumulación de nieve y hielo (zona de acumulación). En los bordes del glaciar, las pendientes se vuelven moderadas a fuertes (15-30 %), lo que favorece los procesos de ablación y el desprendimiento de hielo. Finalmente, en los valles de salida y laderas externas, se registran pendientes muy fuertes (>30 %), asociadas a zonas de alta erosión glaciar y a relieves estructurales como aristas y picos rocosos expuestos. Actualmente, el 53 % de la superficie glaciar del Quelccaya presenta pendientes suaves, lo que contrasta con la topografía escarpada de la cordillera circundante (INAIGEM, 2025).

Figura 5*Mapa de pendientes del Nevado Quelccaya*

MAPA DE PENDIENTES - NEVADO QUELCCAYA						
	ELABORADO POR	PROYECCIÓN	UBICACIÓN	ESCALA	FECHA	N° MAPA
	Karen Fernanda Huilica Ticona	WSG 1984 UTM 19 S	Dep.: Cusco-Puno Prov.: Canchis-Carabaya Dist.: Checacupe-Corani	1:48.709	JUNIO 2026	04

Las imágenes satelitales y el DEM evidencian una transformación acelerada del paisaje, con rasgos morfológicos propios de glaciares tropicales. Esta topografía determina tanto la dinámica del flujo de hielo como los riesgos de inestabilidad del terreno y el almacenamiento de agua en lagunas proglaciares. El glaciar ya no es un bloque único, sino que muestra una notable fragmentación, evidenciando su fragilidad frente al cambio climático actual.

4.2. Identificación de la extensión espacial del glaciar

4.2.1. Área glaciar anual

Con las imágenes satelitales Landsat 8 y Landsat 9, se procedió a calcular el índice de Nieve de Diferencia Normalizada (NDSI) utilizando un umbral de $\geq 0,4$ para determinar la cobertura anual de los glaciares en el Nevado Quelccaya. La tabla 3 muestra las áreas de cada año desde el 2013 al 2024.

Tabla 3

Área glaciar del Nevado Quelccaya por año (km²)

Nº	Año	Área glaciar (km ²)
1	2013	40,45
2	2014	39,76
3	2015	40,79
4	2016	38,58
5	2017	37,94
6	2018	37,93
7	2019	37,57
8	2020	37,31
9	2021	37,84
10	2022	36,83
11	2023	36,16
12	2024	33,55

Nota. Elaboración a partir de imágenes Landsat 8 y 9 (bandas Green y SWIR), con umbral NDSI $\geq 0,4$.

4.2.2. Mapas de cobertura glaciar

Las Figuras 6 a 8 muestran la extensión glaciar del Nevado Quelccaya para los años 2013, 2019 y 2024, respectivamente. En la Figura 6 (2013), el glaciar presenta una cobertura continua y compacta (40,45 km²). En la Figura 7 (2019), se observa un retroceso progresivo, especialmente en los márgenes occidental y sur (37,57 km²). En la Figura 8 (2024), se evidencia un retroceso acelerado, con exposición de roca subglaciar y formación de lagunas proglaciares (33,55 km²). Finalmente, la Figura 10 presenta la superposición de los límites glaciares de 2013, 2019 y 2024,

permitiendo visualizar de manera integrada la magnitud y dirección del retroceso. Se observa claramente que la mayor pérdida de superficie se concentra en los sectores occidental y sur del glaciar, mientras que el núcleo central permanece relativamente estable.

Figura 6

Extensión glaciar del Nevado Quelccaya, Año 2013

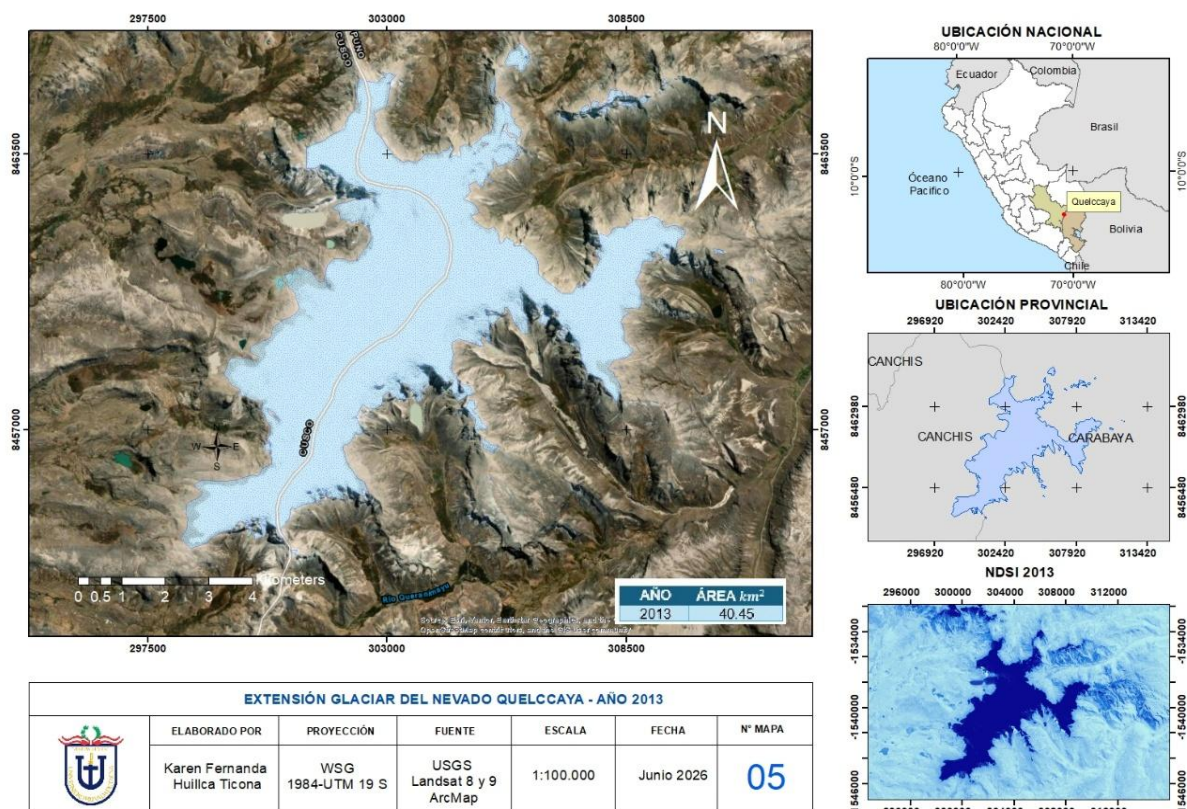


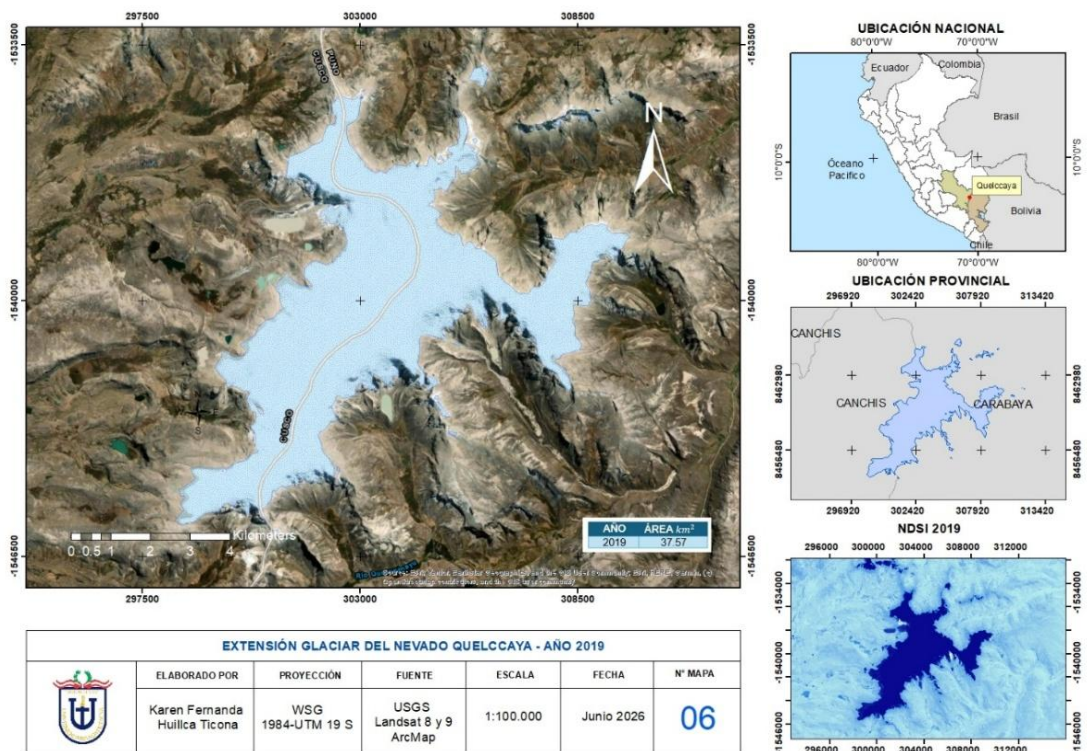
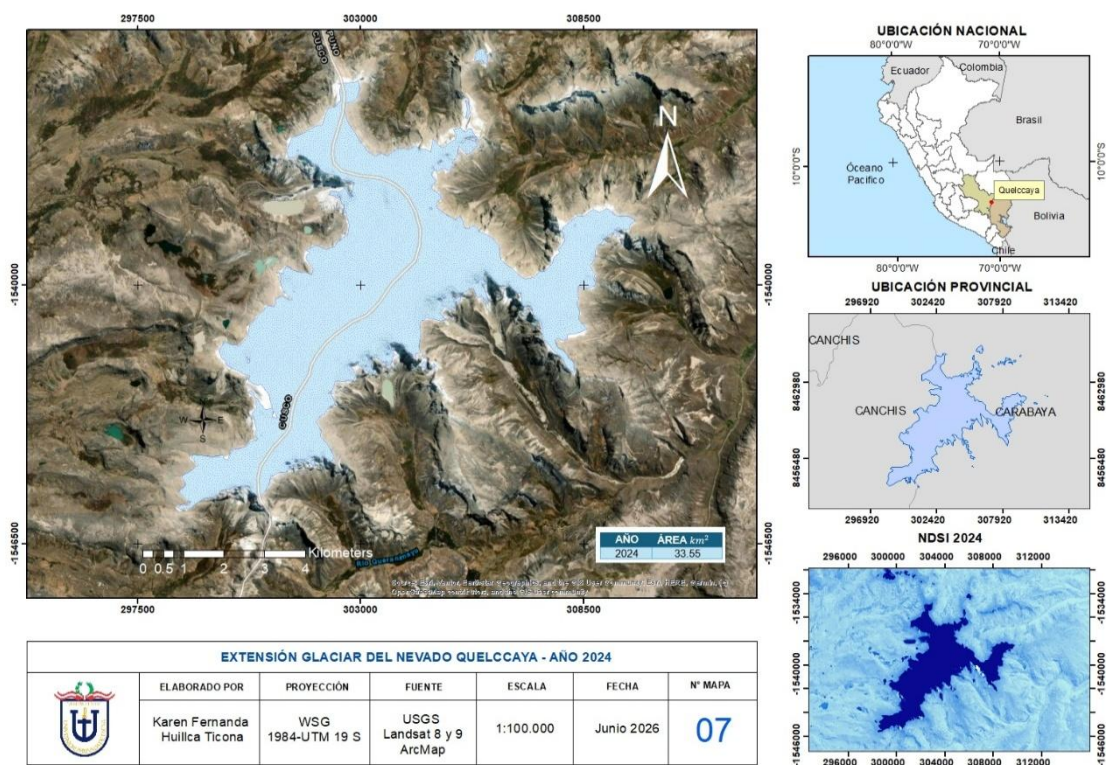
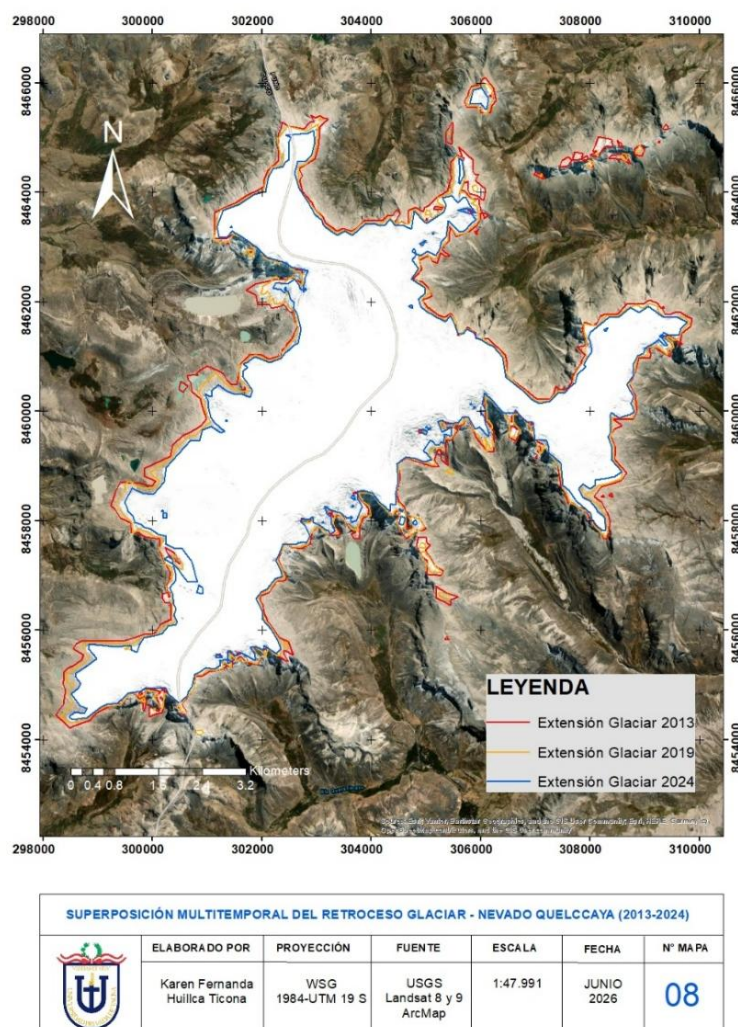
Figura 7*Extensión glaciár del Nevado Quelccaya, Año 2019***Figura 8***Extensión glaciár del Nevado Quelccaya, Año 2024*

Figura 9

Superposición multitemporal del retroceso glaciar-Nevado Quelccaya



4.3. Comparación de la superficie glaciar, magnitud y tasa de retroceso

En base a las superficies glaciares anuales calculadas (Tabla 3), se seleccionó periodos multianuales que sean consecutivos con pérdida glaciar positiva, además, se excluyeron los intervalos donde se registró ganancias superficiales a causa de nevadas estacionales.

4.3.1. Pérdida absoluta y porcentual por periodo

En la Tabla 4 se muestra los resultados obtenidos.

Tabla 4*Pérdida glaciar absoluta y porcentual por periodo*

Periodo	Área inicial (km ²)	Área final (km ²)	Pérdida glaciar (km ²)	Tasa de retroceso (km ² /año)
2013-2014	40,45	39,76	0,69	0,69
2014-2015	39,76	40,79	-1,03	No aplica
2015-2016	40,79	38,58	2,21	2,21
2016-2017	38,58	37,94	0,64	0,64
2017-2018	37,94	37,93	0,01	0,01
2018-2019	37,93	37,57	0,36	0,36
2019-2020	37,57	37,31	0,26	0,26
2020-2021	37,31	37,84	-0,53	No aplica
2021-2022	37,84	36,83	1,01	1,01
2022-2023	36,83	36,16	0,67	0,67
2023-2024	36,16	33,55	2,61	2,61

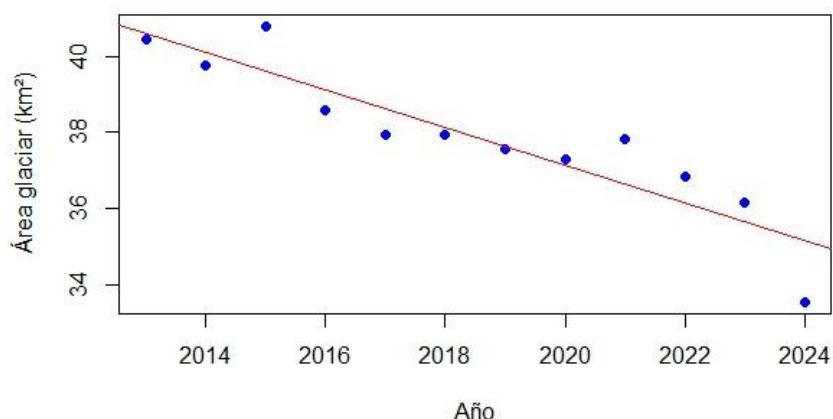
Nota. Los datos negativos de la columna “Pérdida glaciar” significan una ganancia superficial. Se tienen dos periodos (2014-2015 y 2020-2021) que no representaron pérdida neta, por lo que no aplican para asignarles una tasa de retroceso.

Se puede observar que los años con la mayor pérdida absoluta y la tasa de retroceso más significativa son 2015-2016 (2,21 km², 2,21 km²/año) y 2023-2024 (2,61 km², 2,61 km²/año) siendo este último el que muestra la tasa más alta del estudio. En contraste, los periodos de 2014-2015 y 2020-2021 mostraron un aumento en la superficie, debido a nevadas estacionales excepcionales, que posiblemente estén asociadas a condiciones climáticas como La Niña.

En total, entre 2013 y 2024, la pérdida acumulada fue de 6,90 km², lo que equivale a una reducción del 17,06 % de la superficie glaciar inicial en un lapso de 12 años.

4.3.2 Tendencia temporal del retroceso glaciar

Se realizó un análisis de regresión lineal para evaluar la tendencia del área glaciar en función del tiempo (2013-2024). La Figura 10 muestra la evolución del área glaciar durante el periodo de estudio, junto con la línea de tendencia lineal ajustada.

Figura 10*Tendencia del área glaciar del Nevado Quelccaya (2013-2024)*

Los resultados del modelo de regresión lineal se presentan en la Tabla 5.

Tabla 5*Resultados del modelo de regresión lineal*

Parámetro	Valor
Ecuación de regresión	$\text{Área} = 1039,87 - 0,496 \times (\text{Año})$
Pendiente	-0,496
R^2	0,832
r	-0,912
p-valor	$3,515 \times 10^{-5}$
Grados de libertad	10
Estadístico F	49,65

La pendiente negativa de $-0,496 \text{ km}^2$ indica que el Nevado Quelccaya ha experimentado una pérdida glaciar sostenida durante el periodo 2013-2024. El coeficiente de determinación ($R^2 = 0,832$) señala que el 83,24 % de la variabilidad del área glaciar es explicado por el factor temporal, lo que demuestra una tendencia de retroceso altamente consistente.

El p-valor obtenido ($3,515 \times 10^{-5}$) es muy inferior al umbral de significancia del 0,05, lo que confirma que la tendencia negativa es estadísticamente altamente significativa. En otras palabras, la probabilidad de que esta tendencia se deba al azar es extremadamente baja (menor al 0,004 %).

La correlación negativa fuerte ($r = -0,91$) refuerza esta relación inversa entre el tiempo y la superficie glaciar: a medida que avanzan los años, el área glaciar disminuye sistemáticamente.

4.3.3. Aceleración del retroceso (punto de quiebre)

Para identificar si existió un cambio significativo en la tendencia del retroceso glaciar, se aplicó un análisis de punto de quiebre (breakpoint análisis) a la serie temporal del área glaciar entre 2013 y 2024. Este método permite detectar cambios estructurales en la tendencia de una serie de datos.

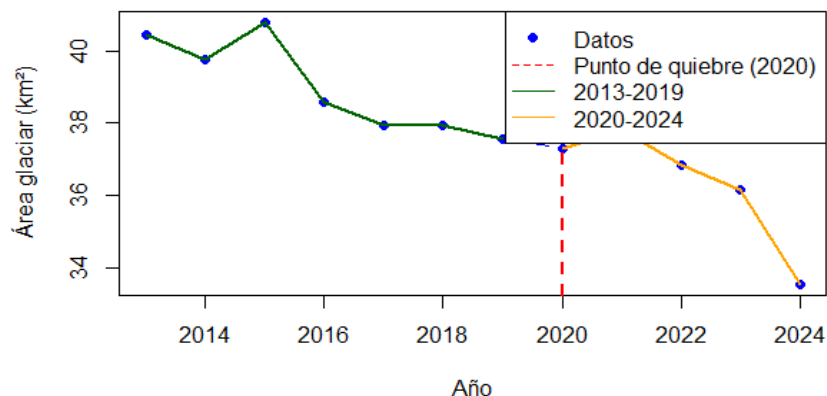
Los resultados del análisis revelaron un punto de quiebre en la observación número 8, correspondiente al año 2020. El criterio de información bayesiano (BIC) fue menor en el modelo con dos segmentos ($BIC = 33,13$) que en el modelo con un solo segmento ($BIC = 35,21$), lo que confirma que la partición en dos periodos es estadísticamente mejor.

Tabla 6

Tasas de retroceso antes y después del punto de quiebre

Periodo	Tasa de retroceso (km ² /año)
2013-2019	-0,48
2020-2024	-0,94

La tasa de retroceso aumentó de $-0,48 \text{ km}^2/\text{año}$ en el periodo 2013-2019 a $-0,94 \text{ km}^2/\text{año}$ en el periodo 2020-2024. El valor negativo de la tasa indica pérdida de superficie glaciar en ambos periodos. La aceleración del retroceso fue del 95,83 %, lo que significa que la velocidad de pérdida prácticamente se duplicó a partir del año 2020.

Figura 11*Punto de quiebre en la tendencia del área glaciar*

El análisis de punto de quiebre (Figura 11) identificó un cambio estructural en la tendencia del retroceso glaciar a partir del año 2020. Antes de este año, la tasa de retroceso era de $-0,48 \text{ km}^2/\text{año}$, mientras que después del quiebre se incrementó a $-0,94 \text{ km}^2/\text{año}$, lo que representa una aceleración del 95,83 %. Este cambio coincide con el periodo en el que se registraron las mayores anomalías térmicas positivas (2018, 2021, 2022), lo que sugiere una respuesta del glaciar al calentamiento superficial con un retardo aproximado de 1 a 2 años.

4.4. Cálculo de la Temperatura Superficial Terrestre (LST)

El cálculo de la Temperatura Superficial Terrestre (LST) se realizó a partir de imágenes Landsat Level-1, siguiendo el algoritmo monocanal de Jiménez-Muñoz et al. (2009). Se obtuvieron valores de LST media, máxima, mínima y anomalía térmica para cada año, tanto en el polígono (Tabla 7), borde glaciar (Tabla 8) y en las zonas de pérdida glaciar.

4.4.1. LST en el polígono glaciar

Tabla 7*Temperatura Superficial terrestre en el polígono glaciar por año*

Año	LST media (°C)	LST máxima (°C)	LST mínima (°C)	LST anomalía (°C)
2013	-4,26	6,83	-8,46	-1,95
2014	-4,18	13,94	-8,46	-1,87
2015	-3,49	10,96	-7,89	-1,18

continúa

Tabla 7 (Continuación)

Año	LST media (°C)	LST máxima (°C)	LST mínima (°C)	LST anomalía (°C)
2016	-5,02	11,67	-10,37	-2,71
2017	-1,63	12,78	-6,58	+0,68
2018	1,06	19,31	-3,49	+3,37
2019	-3,24	12,23	-8,88	-0,93
2020	-1,21	12,23	-5,76	+1,10
2021	-0,02	14,71	-5,09	+2,29
2022	0,02	21,70	-4,85	+2,33
2023	-3,10	10,88	-8,91	-0,79
2024	-2,59	9,59	-8,32	-0,28

Nota. Para el cálculo de las anomalías se usó la LST media del año menos el promedio multianual del polígono glaciar (-2.31 °C)

Durante el periodo 2013-2024, la LST media en el polígono glaciar fue de $-2,31\text{ °C}$ ($DE = 1,94\text{ °C}$). El valor mínimo registrado fue de $-5,02\text{ °C}$ en el año 2016, mientras que el valor máximo fue de $1,06\text{ °C}$ en el año 2018. El rango térmico fue de $6,08\text{ °C}$. La LST media se mantuvo por debajo de 0 °C durante la mayoría de los años, con excepción de 2018 ($1,06\text{ °C}$), 2021 ($-0,02\text{ °C}$) y 2022 ($0,02\text{ °C}$), donde se registraron temperaturas cercanas o ligeramente superiores al punto de fusión. La desviación estándar de $1,94\text{ °C}$ indica una variabilidad moderada en las temperaturas superficiales del polígono glaciar.

4.4.2. LST borde glaciar

Tabla 8

Temperatura Superficial Terrestre en el borde glaciar por año

Año	LST media (°C)	LST máxima (°C)	LST mínima (°C)	LST anomalía (°C)
2013	5,64	22,37	-8,77	-3,86
2014	5,62	22,78	-8,77	-3,88
2015	9,52	27,63	-8,34	+0,02
2016	6,63	26,18	-10,53	-2,87
2017	10,92	28,62	-7,12	+1,42
2018	14,19	33,78	-7,86	+4,69

(continúa)

Tabla 8 (Continuación)

Año	LST media (°C)	LST máxima (°C)	LST mínima (°C)	LST anomalía (°C)
2019	9,88	29,94	-9,67	+0,38
2020	10,72	27,56	-6,38	+1,22
2021	12,02	31,16	-5,96	+2,52
2022	11,50	31,28	-5,99	+2,00
2023	9,48	30,16	-9,08	-0,02
2024	7,83	25,80	-8,66	-1,67

Nota. La anomalía se calculó como LST media del año menos el promedio multianual del borde glaciar (9,50 °C)

Durante el periodo 2013-2024, la LST media en el borde glaciar fue de 9,50 °C ($DE = 2,65$ °C). El valor mínimo registrado fue de 5,62 °C en el año 2014, mientras que el valor máximo fue de 14,19 °C en el año 2018. El rango térmico fue de 8,57 °C.

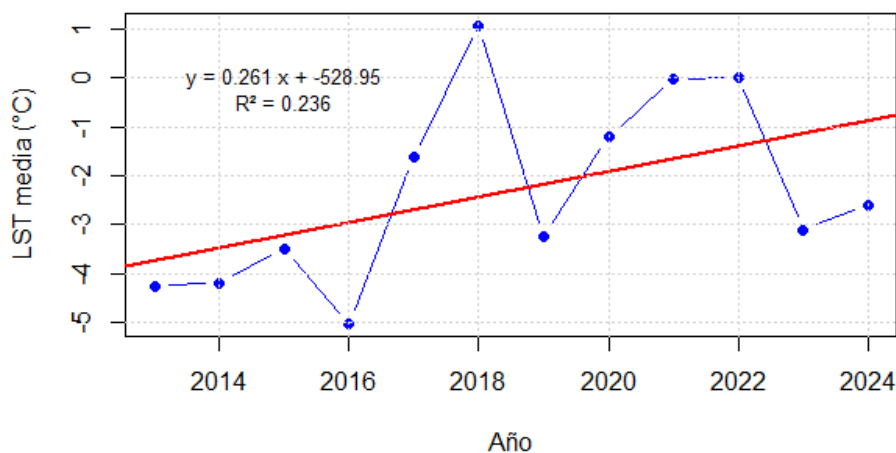
La LST media en el borde glaciar fue sistemáticamente más alta que en el polígono glaciar, con una diferencia de 11,81 °C. El año más cálido en el borde fue 2018 (14,19 °C), coincidiendo con el año de mayor LST en el polígono glaciar. La desviación estándar de 2,65 °C indica una variabilidad mayor en el borde en comparación con el polígono glaciar (1,94 °C), lo que sugiere que las temperaturas en los márgenes son más sensibles a las condiciones climáticas anuales.

4.4.3. Tendencia temporal de la LST

Para evaluar la tendencia de la Temperatura Superficial Terrestre en el polígono glaciar durante el periodo 2013-2024, se aplicó la prueba no paramétrica de Mann-Kendall (Figura 12). Esta prueba es adecuada para series temporales cortas y no requiere normalidad de los datos.

Figura 12

Tendencia de la LST media en el polígono glaciar (2013-2024)



Los resultados arrojaron un valor de Tau de Kendall de 0,45 con un p-valor de 0,047, y un estadístico z de 1,99 para una serie de 12 años.

El valor de Tau ($\tau = 0,45$) indica una tendencia positiva moderada, lo que significa que la LST media en el polígono glaciar ha mostrado un incremento durante el periodo de estudio. El p-valor obtenido (0,047) es inferior al umbral de significancia del 0,05, lo que confirma que esta tendencia es estadísticamente significativa. Por lo tanto, se concluye que existe un calentamiento superficial en el polígono glaciar del Nevado Quelccaya entre 2013 y 2024.

Este resultado respalda lo observado en el análisis de regresión lineal del área glaciar, donde también se identificó una tendencia negativa significativa, lo que sugiere una relación entre el aumento de la temperatura superficial y la pérdida de superficie glaciar.

4.4.4. Mapas de distribución espacial de la LST

Las Figuras 13, 14 y 15 presentan la distribución espacial de la Temperatura Superficial Terrestre (LST) en el entorno del Nevado Quelccaya para los años 2013, 2019 y 2024, respectivamente. Los mapas fueron generados a partir de las bandas térmicas de las imágenes satelitales Landsat 8 y Landsat 9, aplicando el algoritmo de emisividad correspondiente.

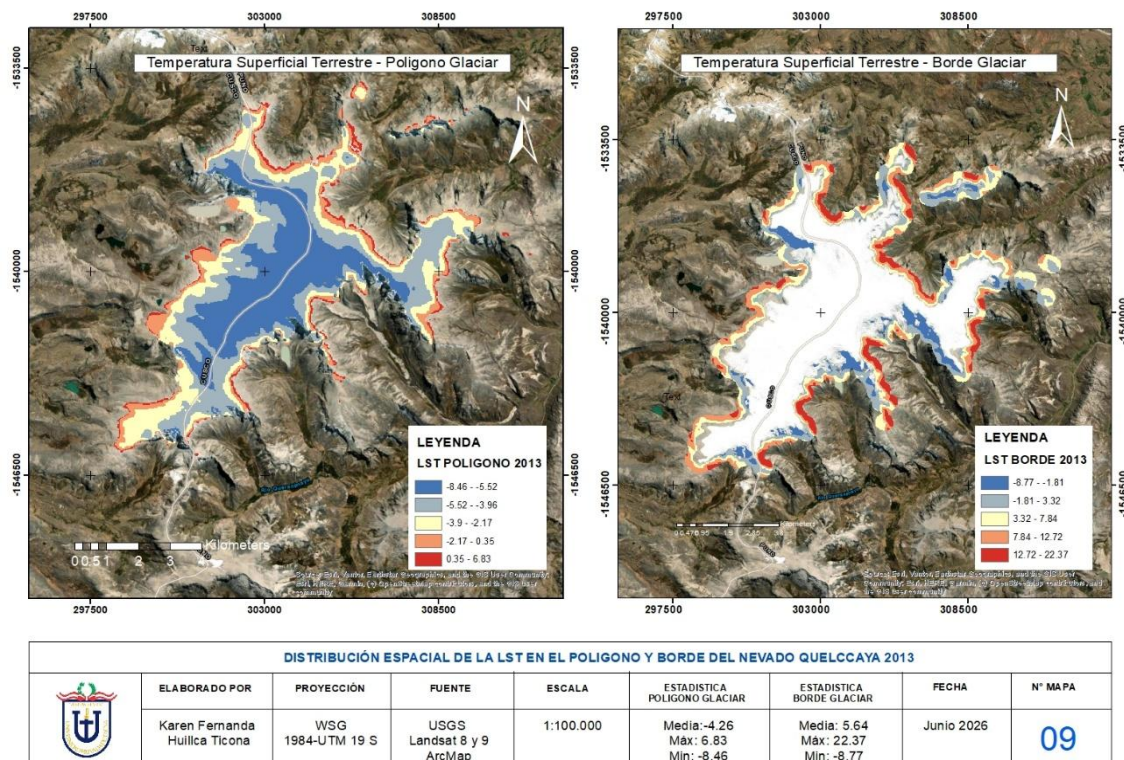
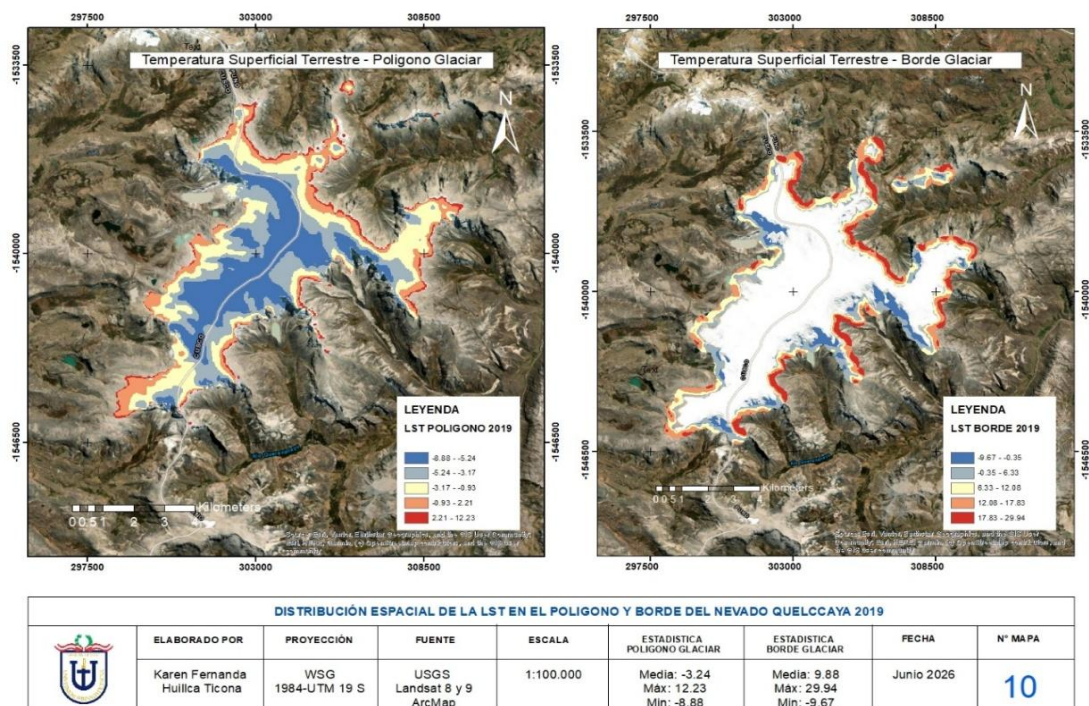
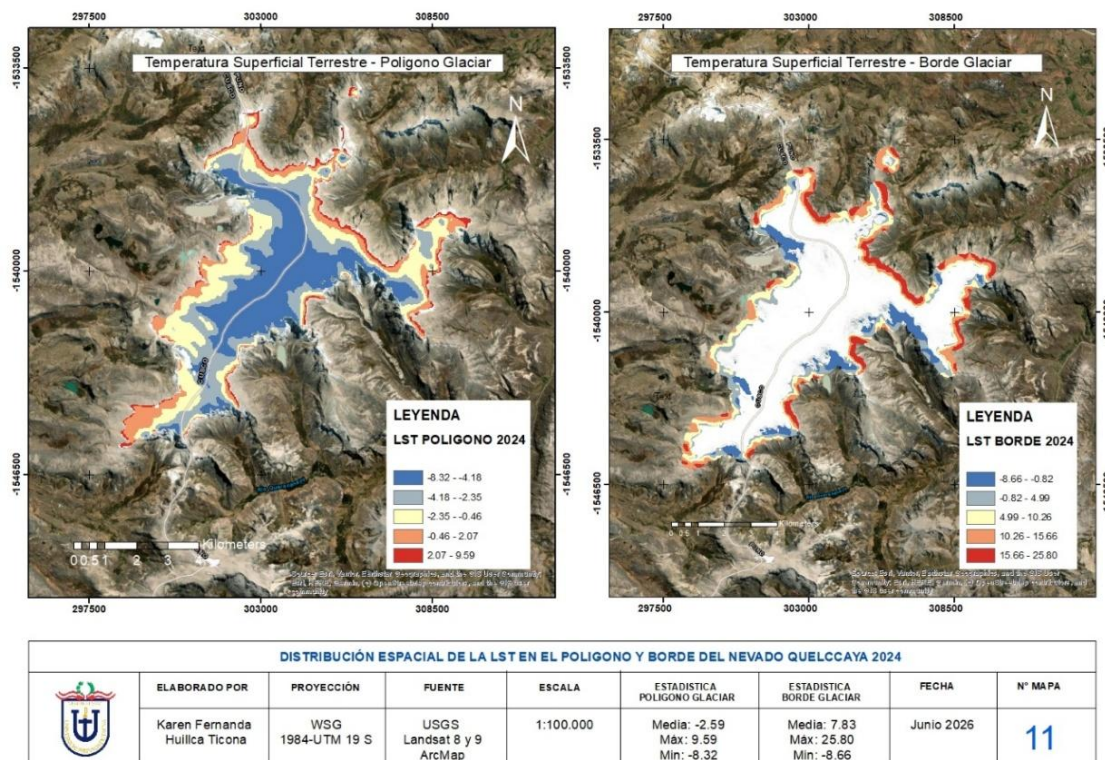
Figura 13*Distribución espacial de la LST en el Nevado Quelccaya – Año 2013***Figura 14***Distribución espacial de la LST en el Nevado Quelccaya – Año 2019*

Figura 15

Distribución espacial de la LST en el Nevado Quelccaya – Año 2024



Se observa un patrón consistente de temperaturas más bajas (tonos azules) en el polígono glaciar, donde la LST media anual alcanza $-2,31^{\circ}\text{C}$, y temperaturas significativamente más altas (tonos rojos) en el borde glaciar, con una media de $9,50^{\circ}\text{C}$. La zona de transición térmica se ubica en los márgenes occidental y sur del glaciar, donde se concentra el mayor retroceso glaciar según lo documentado en el objetivo a.

En el año 2013 (Figura 13), el polígono glaciar registró una LST media de $-4,26^{\circ}\text{C}$ (máx. $6,83^{\circ}\text{C}$, mín. $-8,46^{\circ}\text{C}$), mientras que el borde glaciar alcanzó una media de $5,64^{\circ}\text{C}$ (máx. $22,37^{\circ}\text{C}$, mín. $-8,77^{\circ}\text{C}$). Para el año 2019 (Figura 14), el polígono presentó una LST media de $-3,24^{\circ}\text{C}$ (máx. $12,23^{\circ}\text{C}$, mín. $-8,88^{\circ}\text{C}$) y el borde una media de $9,88^{\circ}\text{C}$ (máx. $29,94^{\circ}\text{C}$, mín. $-9,67^{\circ}\text{C}$). Finalmente, en el año 2024 (Figura 15), el polígono registró una LST media de $-2,59^{\circ}\text{C}$ (máx. $9,59^{\circ}\text{C}$, mín. $-8,32^{\circ}\text{C}$) y el borde una media de $7,83^{\circ}\text{C}$ (máx. $25,80^{\circ}\text{C}$, mín. $-8,66^{\circ}\text{C}$).

El año 2018 (Tabla 7 y 8) destaca como el más cálido de toda la serie, tanto en el polígono ($1,06^{\circ}\text{C}$) como en el borde ($14,19^{\circ}\text{C}$). Por el contrario, el año 2016 fue el más frío en el polígono ($-5,02^{\circ}\text{C}$), mientras que 2014 lo fue en el borde ($5,62^{\circ}\text{C}$).

4.5. Análisis de la relación multitemporal entre el retroceso glaciar y la LST

4.5.1. Correlación entre área glaciar y LST

Para evaluar la relación entre el retroceso glaciar y la temperatura superficial, se calcularon los coeficientes de correlación de Pearson entre el área glaciar y las diferentes variables térmicas, la Tabla 9 detalla las interpretaciones respectivas a cada análisis.

Tabla 9

Matriz de correlaciones entre área glaciar y variables térmicas

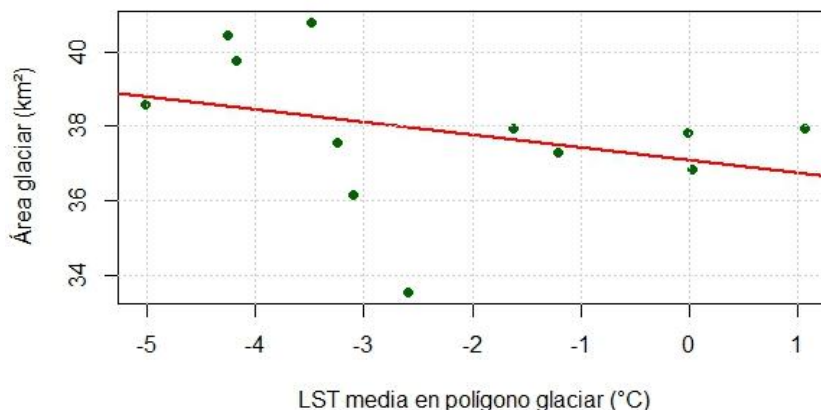
Variable	Coeficiente de correlación (r)	p-valor	Interpretación
LST media en polígono glaciar	-0,334	0,289	Correlación negativa débil, no significativa
Anomalía de LST en polígono glaciar	-0,334	0,289	Correlación negativa débil, no significativa
LST media en borde glaciar	-0,256	0,423	Correlación negativa débil, no significativa

Las correlaciones obtenidas fueron negativas, lo que indica una relación inversa entre la temperatura superficial y el área glaciar (a mayor temperatura, menor área). Sin embargo, ninguna de las correlaciones alcanzó significancia estadística ($p > 0,05$ en todos los casos). Esto sugiere que la relación lineal directa año a año entre el área glaciar y la LST no es lo suficientemente fuerte, posiblemente debido a que el glaciar responde al calentamiento con un retardo temporal.

La Figura 16 muestra la relación entre la LST media del polígono glaciar y el área glaciar, junto con la línea de tendencia lineal ajustada.

Figura 16

Relación entre LST media y el área glaciar del Nevado Quelccaya



En el gráfico se observa una dispersión moderada de los puntos alrededor de la línea de tendencia, lo que refleja la correlación débil ($r = -0,334$) y la ausencia de significancia estadística encontrada en el análisis de correlación.

4.5.2. Modelo de regresión lineal

Se construyó un modelo de regresión lineal simple utilizando la LST media del polígono glaciar como variable predictora del área glaciar. La ecuación obtenida fue $\text{Área} = 37,114 - 0,338 \times (\text{LST en el polígono})$, con un coeficiente de determinación de $R^2 = 0,1114$, lo que indica que la LST explica solo el 11,14 % de la variabilidad del área glaciar. El p-valor del modelo fue de 0,289, superior al umbral de significancia, confirmando que la LST anual no es un predictor estadísticamente significativo del área glaciar. Este resultado refuerza la hipótesis de una respuesta retardada del glaciar al calentamiento superficial.

4.5.3. Comparación térmica entre polígono y borde glaciar

Se aplicó una prueba t de Student para muestras independientes con el fin de comparar las LST medias anuales entre el polígono y borde glaciar. La LST media en el polígono fue de $-2,31^\circ\text{C}$, mientras que en el borde alcanzó los $9,50^\circ\text{C}$, con una diferencia de $11,81^\circ\text{C}$. La prueba arrojó un estadístico t de -12.466 con 20.166 grados de libertad y un p-valor de $6,191 \times 10^{-11}$, altamente significativo ($p < 0,001$). Este resultado confirma que el borde glaciar es sistemáticamente más cálido que el polígono, lo que explica por qué el retroceso glaciar se inicia y acelera en los márgenes.

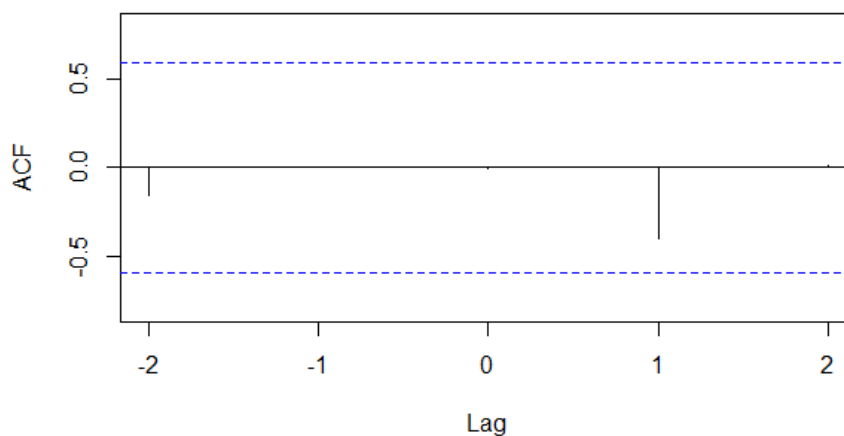
4.5.4. Correlación con desfase temporal

Para evaluar si la anomalía de LST precede al retroceso glaciar, se realizó un análisis de correlación cruzada entre la anomalía de LST en el borde glaciar y la tasa de retroceso anual (Figura 17), considerando desfases de hasta dos años (lag 0, lag 1 y lag 2).

Los resultados mostraron que la anomalía del borde glaciar presenta su correlación más fuerte en el desfase de un año (lag 1), alcanzando un valor de -0,399, mientras que en el mismo año (lag 0) la correlación es prácticamente nula (-0,003). Las correlaciones en los demás desfases (lag -2, -1 y 2) fueron bajas, cercanas a cero. Este hallazgo es fundamental, ya que demuestra que el glaciar no responde inmediatamente al calentamiento, sino con un retardo aproximado de 1 año. La correlación débil en el mismo año (lag 0) explica por qué las correlaciones anuales directas no fueron significativas.

Figura 17

Correlación cruzada entre anomalía de LST y tasa de retroceso



4.5.5. Anomalía acumulada y pérdida glaciar

Se analizó el efecto de la acumulación de anomalías térmicas positivas sobre la pérdida glaciar. La Tabla 10 muestra la relación entre la anomalía acumulada (suma de las anomalías de los dos años previos) y la pérdida glaciar en cada periodo.

Tabla 10*Relación entre anomalía acumulada y pérdida glaciar*

Periodo de pérdida	Anomalía acumulada	Pérdida glaciar
2013-2014	-7,74	0,69
2015-2016	-3,86	2,21
2019-2020	6,11	0,26
2021-2022	3,74	1,01
2022-2023	4,52	0,67
2023-2024	1,98	2,61

Los periodos con mayor anomalía acumulada positiva (2019-2020: 6,11 °C; 2022-2023: 4,52 °C) no produjeron pérdidas inmediatas grandes, sino que precedieron a las mayores pérdidas registradas (2,61 km² en 2023-2024). Esto refuerza la existencia de un efecto acumulativo y de respuesta retardada del glaciar al calentamiento superficial.

4.5.6. Contrastación de hipótesis

Con base en los resultados obtenidos, se procedió a contrastar las hipótesis planteadas, detalladas en la Tabla 11:

- Hipótesis nula (H_0): No existe una relación significativa entre el retroceso glaciar del Nevado Quelccaya y la variación de la Temperatura Superficial Terrestre (LST).
- Hipótesis alternativa (H_1): Sí existe una relación significativa entre el retroceso glaciar del Nevado Quelccaya y la variación de la Temperatura Superficial Terrestre (LST).

Tabla 11*Resumen de análisis realizados*

Análisis realizado	Resultado	Interpretación
Correlación de Pearson (área vs LST anual)	$r = -0,334$, $p = 0,289$ (no significativo)	No respalda H_1 de forma directa
Regresión lineal (LST como predictor)	$R^2 = 0,111$, $p = 0,289$ (no significativo)	No respalda H_1 de forma directa
Correlación cruzada (lag 1)	Correlación más fuerte en lag 1 ($-0,399$); lag 0 prácticamente nulo ($-0,003$)	Respalda H_1 (relación con retraso)
Anomalía acumulada	Periodos cálidos preceden a pérdidas mayores	Respalda H_1 (efecto acumulativo)
Diferencia térmica polígono vs borde	$11,81\text{ °C}$ ($p < 0,001$)	Evidencia condición favorable al retroceso

Si bien la relación lineal directa año a año no fue estadísticamente significativa, los análisis de correlación cruzada y anomalía acumulada demostraron que existe una relación significativa entre el retroceso glaciar y la variación de la LST, manifestada con un retardo aproximado de un año y con un efecto acumulativo del calentamiento sostenido. Por lo tanto, se acepta la hipótesis alternativa (H_1) y se rechaza la hipótesis nula (H_0), considerando la evidencia de respuesta retardada del glaciar.

4.6. Patrones de cambio glaciar y zonas con mayor susceptibilidad

4.6.1. Clasificación por periodos según tasa de retroceso glaciar

En función de la tasa de retroceso calculada en el objetivo b se clasificaron los periodos en cuatro categorías. Los periodos de retroceso extremo ($> 2 \text{ km}^2/\text{año}$) fueron 2015-2016 ($2,21 \text{ km}^2/\text{año}$) y 2023-2024 ($2,61 \text{ km}^2/\text{año}$). El periodo de retroceso alto ($1-2 \text{ km}^2/\text{año}$) fue 2021-2022 ($1,01 \text{ km}^2/\text{año}$). Los periodos de retroceso moderado ($0.5 - 1 \text{ km}^2/\text{año}$) incluyeron 2013-2014 ($0,69 \text{ km}^2/\text{año}$), 2016-2017 ($0,64 \text{ km}^2/\text{año}$) y 2022-2023 ($0,67 \text{ km}^2/\text{año}$). Finalmente, los periodos de retroceso bajo ($<0,5 \text{ km}^2/\text{año}$) fueron 2017-2018 ($0,01 \text{ km}^2/\text{año}$), 2018-2019 ($0,36 \text{ km}^2/\text{año}$) y 2019-2020 ($0,26 \text{ km}^2/\text{año}$).

Es importante destacar que los dos periodos de retroceso extremo ocurren después de acumulaciones de anomalías térmicas positivas, lo que confirma el comportamiento de respuesta retardada del glaciar documentado en el objetivo d.

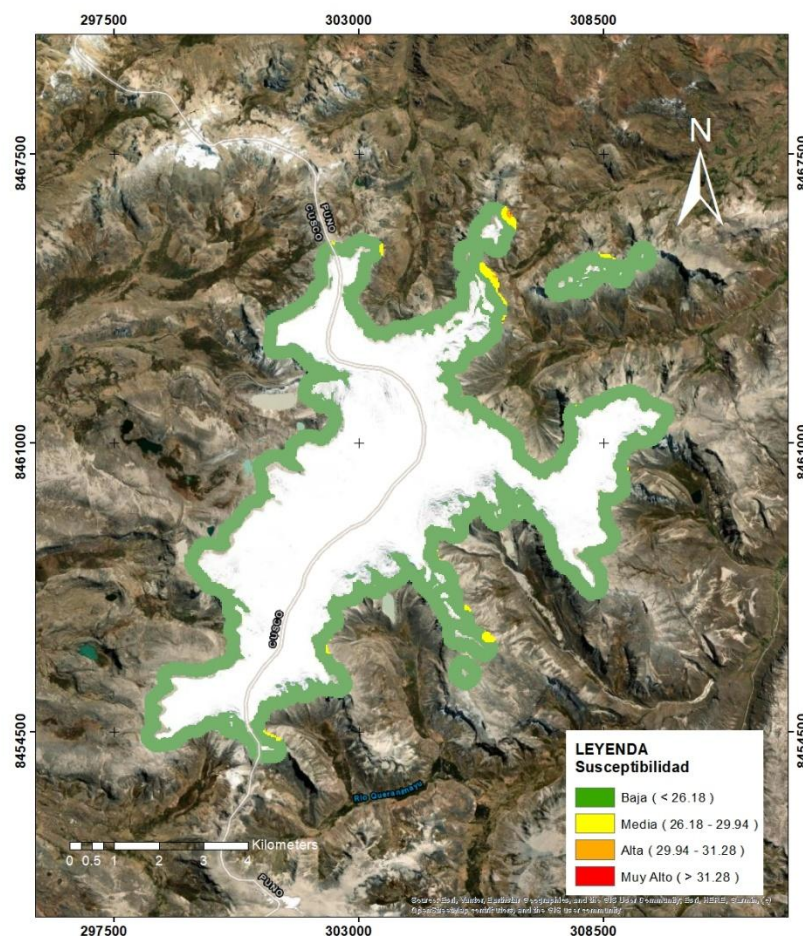
4.6.2. Susceptibilidad por zona térmica

Para identificar las zonas más susceptibles al retroceso, se analizaron los percentiles de la LST máxima registrada en el borde glaciar durante todo el periodo de estudio. Los resultados mostraron que el percentil 90 (P90) corresponde a $31,28^\circ\text{C}$, el percentil 75 (P75) a $29,94^\circ\text{C}$, y el percentil 25 (P25) a $26,18^\circ\text{C}$. Con base en estos valores, se establecieron cuatro categorías de susceptibilidad:

- Susceptibilidad muy alta ($> \text{P90}$): LST máxima $> 31,28^\circ\text{C}$. Corresponde a los bordes expuestos con orientación norte y noroeste.
- Susceptibilidad alta (P75 - P90): LST máxima entre $29,94^\circ\text{C}$ y $31,28^\circ\text{C}$. Corresponde a bordes con exposición solar directa.
- Susceptibilidad media (P25 - P75): LST máxima entre $26,18^\circ\text{C}$ y $29,94^\circ\text{C}$. Corresponde a zonas de transición.
- Susceptibilidad baja ($< \text{P25}$): LST máxima $< 26,18^\circ\text{C}$. Corresponde al núcleo glaciar protegido.

Figura 18

Mapa de susceptibilidad al retroceso glaciar del Nevado Quelccaya



SUSCEPTIBILIDAD AL RETROCESO GLACIAR DEL NEVADO QUELCCAYA						
	ELABORADO POR	PROYECCIÓN	FUENTE	ESCALA	FECHA	N° MAPA
	Karen Fernanda Huilca Ticona	WGS 1984-UTM 19 S	USGS Landsat 8 y 9 ArcMap	1:64.960	JUNIO 2026	12

En la Figura 18 se observa que las zonas de muy alta susceptibilidad (rojo) y alta (naranja) se localizan en pequeñas manchas en el sector norte. En el sector sur se aprecian áreas de susceptibilidad media (amarillo). La mayor parte del perímetro glaciar presenta susceptibilidad baja (verde).

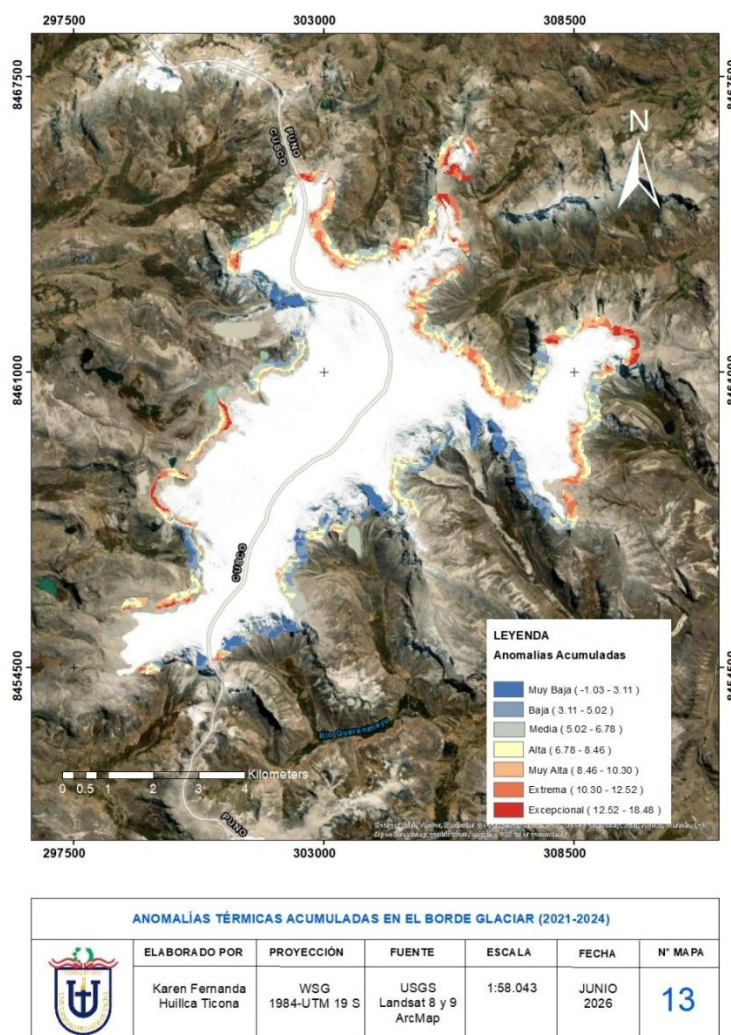
4.6.3. Mapa de anomalías acumuladas

La Figura 19 presenta el mapa de anomalías térmicas acumuladas para el periodo 2021-2024, que corresponde a los años previos a la mayor pérdida glaciar registrada en 2023-2024. Este mapa fue elaborado a partir de la suma de las anomalías anuales de LST en

el borde glaciar (LST año menos el promedio multianual de 9,50 °C), considerando los años 2021, 2022, 2023 y 2024.

Figura 19

Mapa de anomalías térmicas acumuladas (2021-2024)



En la Figura 19 se observa que las áreas con mayor acumulación de calor (tonos rojos y naranjas) se concentran en sectores específicos del borde glaciar, coincidiendo con las zonas de mayor susceptibilidad identificadas en la Figura 18. Las anomalías acumuladas alcanzan valores extremos ($> 12,52$ °C) en pequeños parches del sector norte, mientras que el sector sur presenta valores predominantemente medios a bajos. Este patrón confirma que el calentamiento sostenido durante los años previos a 2024 se ha concentrado en áreas puntuales, explicando por qué el retroceso acelerado observado en 2023-2024 no es homogéneo en todo el perímetro glaciar.

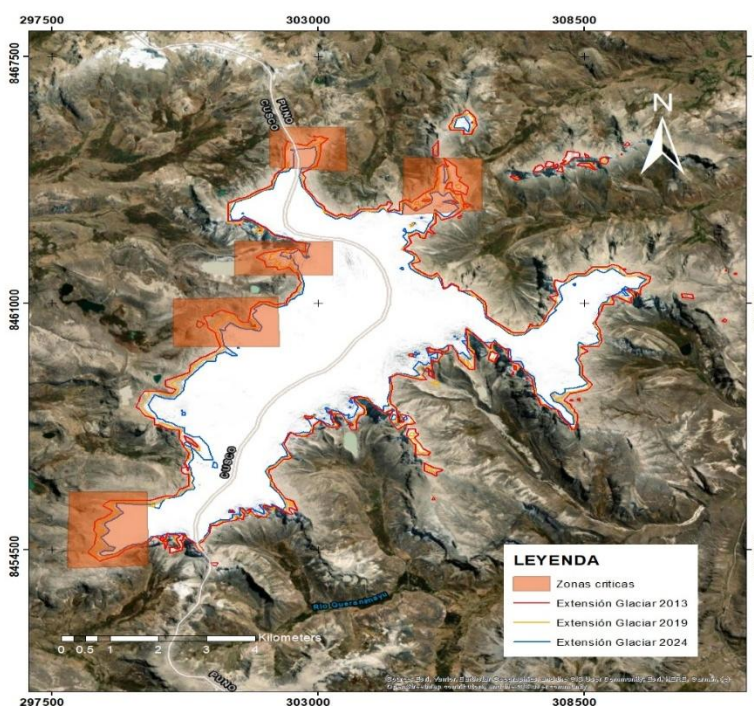
4.6.4. Patrones espaciales identificados

A partir del análisis de los mapas multitemporales de extensión glaciaria y los mapas de LST, se identificaron los siguientes patrones espaciales:

- Retroceso asimétrico: La mayor pérdida de superficie glaciaria se concentra en los sectores occidental y sur del Nevado Quelccaya, donde las LST máximas superan consistentemente los 28 °C.
- Estabilidad del núcleo: La zona central del glaciar se mantiene relativamente estable debido a que las LST mínimas se mantienen siempre por debajo de 0 °C.
- Fragmentación marginal: Se observa la aparición de lagunas glaciares en los bordes del glaciar como consecuencia del retroceso, con una pérdida acumulada de 6,90 km² en los 11 años de estudio.
- Aceleración post-2020: A partir del año 2020, la tasa de retroceso se acelera significativamente, incrementándose en un 95,83 % en comparación con el periodo 2013-2019.

Figura 20

Zonas críticas de retroceso glaciario en el Nevado Quelccaya



ZONAS CRÍTICAS DE RETROCESO GLACIARIO DEL NEVADO QUELCCAYA						
	ELABORADO POR	PROYECCIÓN	FUENTE	ESCALA	FECHA	N° MAPA
	Karen Fernanda Huilica Ticona	WGS 1984-UTM 19 S	USGS Landsat 8 y 9 ArcMap	1:75.758	JUNIO 2026	14

En la Figura 20 las zonas críticas están representadas en polígonos rojos semitransparentes, los cuales se localizan en los sectores occidental, sur y norte del glaciar, donde la separación entre los límites de la superficie glaciar de los años 2013, 2019 y 2024 es predominante, lo que evidencia un retroceso acelerado.

4.6.5. Zonas con mayor vulnerabilidad

La integración de los mapas de susceptibilidad (Figura 18), anomalías acumuladas (Figura 19) y zonas críticas (Figura 20) confirma que los sectores occidental y sur del Nevado Quelccaya son las áreas más vulnerables al retroceso. Estas zonas concentran las mayores LST máximas ($> 31^{\circ}\text{C}$), las anomalías acumuladas más altas (hasta $18,48^{\circ}\text{C}$ en el periodo 2021-2024) y la mayor pérdida histórica de superficie glaciar, evidenciada por la separación de los límites glaciares de 2013, 2019 y 2024. Por lo tanto, se recomienda su monitoreo prioritario ante nuevas anomalías térmicas positivas.

CAPÍTULO V: DISCUSIÓN

Los resultados obtenidos en la presente investigación confirman que el Nevado Quelccaya experimentó un retroceso glaciar sostenido durante el periodo 2013-2024, con una pérdida total de $6,90 \text{ km}^2$, equivalente al 17,06 % de su superficie inicial. Esta tendencia coincide con lo documentado por el Instituto Nacional de Investigación en Glaciares y Ecosistemas de Montaña (INAIGEM, 2025), que reportó una pérdida de 26 km^2 (41 % del área total) entre 1984 y 2024 para el mismo glaciar. La magnitud del retroceso se vuelve aún más evidente en el contexto histórico. INAIGEM (2022) señala que el Quelccaya ha sido objeto de Investigación científica desde la década de 1970 y que, entre 1976 y 2020, experimentó una reducción del 46 % de su superficie, lo que provocó que en 2020 perdiera el estatus de casquete glaciar tropical más grande del mundo, siendo superado por el nevado Coropuna. Asimismo, Huacani (2021) documentó pérdidas superiores al 15 % en la Cordillera Vilcanota durante la última década, mientras que Aguilar et al. (2019) encontraron tasas de retroceso similares en glaciares de la Cordillera Blanca, sugiriendo que los glaciares tropicales andinos comparten una respuesta común al calentamiento regional. A nivel global, Ghilardi Truffa et al. (2024) reportaron que el glaciar Alerce en los Andes Patagónicos perdió el 35 % de su superficie entre 1953 y 2020, evidenciando que el retroceso glaciar es un fenómeno generalizado en toda la cordillera de los Andes.

Un hallazgo relevante de este estudio fue la identificación de un punto de quiebre en el año 2020, a partir del cual la tasa de retroceso se aceleró significativamente, pasando de $-0,48 \text{ km}^2/\text{año}$ a $-0,94 \text{ km}^2/\text{año}$ (incremento del 95,83 %). Este patrón de aceleración es consistente con lo reportado por INAIGEM (2025), que documentó un incremento del 50 % en la tasa de retroceso del Quelccaya, pasando de $0,6 \text{ km}^2/\text{año}$ entre 1984-2012 a $0,9 \text{ km}^2/\text{año}$ entre 2012-2024. Este punto de quiebre coincide con los años de mayores anomalías térmicas positivas registradas en nuestro estudio (2018, 2021 y 2022). Investigaciones en otras regiones andinas han documentado comportamientos similares; McPhee y Mejías (2025) identificaron tres periodos distintos en la evolución del Glaciar Universidad en los Andes semiáridos de Chile, con una fase de pérdida significativa entre 1955-1971, equilibrio relativo entre

1971-2006, y una nueva fase de pérdida acelerada desde 2006 hasta 2020, asociada al aumento de las temperaturas y la mega sequía.

El análisis de punto de quiebre identificado en 2020 sugiere que el glaciar responde al calentamiento con un retardo de aproximadamente 1 a 2 años. Este comportamiento de respuesta retardada ha sido ampliamente documentado en la literatura glaciológica. Zekollari et al. (2020) estudiaron los glaciares de los Alpes europeos y encontraron tiempos de respuesta promedio de 50 ± 28 años, demostrando que la respuesta glaciar a los cambios climáticos no es inmediata sino que presenta una inercia significativa, controlada principalmente por la pendiente del glaciar y su rango altitudinal. Asimismo, Kargel (2013) señala que los glaciares presentan respuestas retardadas a los cambios climáticos debido a la inercia térmica de la masa de hielo, y que el régimen de peligros asociados a glaciares tiende a cambiar más rápidamente en el siglo XXI que en el siglo XX precisamente por estos efectos de rezago.

En cuanto a la Temperatura Superficial Terrestre, se encontró una diferencia térmica altamente significativa de 11,81 °C entre el polígono glaciar (-2,31 °C) y el borde glaciar (9,50 °C). Esta diferencia explica por qué el retroceso se inicia y acelera en los márgenes del glaciar, donde el hielo está en contacto con superficies más cálidas (roca expuesta, suelo desnudo). La prueba de Mann-Kendall reveló una tendencia positiva significativa de la LST en el polígono glaciar ($\tau = 0,45, p = 0,05$), confirmando un calentamiento superficial en el área de estudio durante el periodo analizado. Este calentamiento coincide con las mediciones del Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú (SENAMHI, 2025), que a través de sus estaciones automáticas en el Quelccaya (a 5600 m.s.n.m.) registra variables clave como temperatura del aire, radiación solar y altura de la capa de nieve, fundamentales para comprender la dinámica del retroceso glaciar.

Un aspecto central de esta investigación fue la contrastación de hipótesis. Aunque las correlaciones directas anuales entre el área glaciar y la LST no fueron estadísticamente significativas, el análisis de correlación cruzada demostró que la anomalía de LST en el borde glaciar se correlaciona con la tasa de retroceso del año siguiente (lag 1). Este hallazgo es consistente con la teoría de respuesta retardada de los glaciares. Kargel (2013) describe formalmente el tiempo de respuesta glaciar mediante la relación $\tau = b/h$, donde b es la tasa de ablación y h el espesor del glaciar, estableciendo que los glaciares ajustan su geometría a los cambios climáticos con un retardo que depende de

sus características físicas. Este comportamiento, junto con el análisis de anomalía acumulada (periodos cálidos preceden a pérdidas mayores), permitió aceptar la hipótesis alternativa (H_1), confirmando que existe una relación significativa entre el retroceso glaciar y la variación de la LST, aunque esta relación no es lineal directa, sino que se manifiesta con un retardo temporal.

En términos de susceptibilidad y zonas críticas, se identificaron los sectores occidental y sur del Nevado Quelccaya como las áreas de mayor vulnerabilidad al retroceso. INAIGEM (2025) confirma que los frentes oeste y sureste del Quelccaya son los que han sufrido los cambios más críticos entre 1984 y 2024, señalando que en el frente oeste, la combinación de pendientes moderadas y lagunas glaciares condiciona y acelera la pérdida de hielo; mientras que en el frente sureste, el nevado Jatun Quenamari muestra una reducción acelerada, dejando un conjunto de fragmentos glaciares o glaciaretos. En estas áreas, las LST máximas superan consistentemente los 31 °C (P90). Además, el retroceso glaciar ha dado lugar a la formación de numerosas lagunas de origen glaciar. INAIGEM (2025) identificó 40 lagunas glaciares en el entorno del Quelccaya (31 en Cusco y 9 en Puno), que almacenan un total de 22,5 millones de m^3 de agua dulce, siendo la laguna Qori Kalis la más importante con 9,1 millones de m^3 y una profundidad cercana a los 56 m. Estas lagunas, si bien constituyen reservas estratégicas de agua, también representan riesgos potenciales de desborde, como ocurrió con la laguna Phacu Cucho Alto en 2022, donde se liberaron aproximadamente 600 000 m^3 de agua y sedimentos (INAIGEM, 2025). Por lo tanto, se recomienda el monitoreo prioritario de estas zonas, tanto por su vulnerabilidad al retroceso como por los riesgos asociados a la formación de nuevas lagunas glaciares.

CONCLUSIONES

El Nevado Quelccaya perdió 6.90 km² de superficie glaciar entre 2013 y 2024, lo que representa una reducción del 17,06 % de su área inicial. El retroceso fue más pronunciado en los sectores occidental y sur del glaciar.

La tasa media de retroceso fue de 0,50 km²/año según el modelo de regresión lineal ($R^2 = 0,832, p < 0,001$). Se identificó una aceleración significativa a partir del año 2020, cuando la tasa aumentó a -0,94 km²/año, lo que representa un incremento del 95,83 % respecto al periodo 2013-2019.

La LST media en el polígono glaciar fue de -2,31 °C (DE = 1,94 °C), mientras que en el borde glaciar alcanzó los 9.50 °C (DE = 2,65 °C). La prueba de Mann-Kendall confirmó una tendencia positiva significativa de la LST en el polígono glaciar ($\tau = 0.45, p = 0.05$), evidenciando un calentamiento superficial durante el periodo de estudio.

Existe una diferencia térmica altamente significativa de 11,81 °C entre el polígono y el borde glaciar ($p < 0,001$), lo que explica por qué el retroceso se inicia y acelera en las márgenes del glaciar.

Respecto a la contrastación de hipótesis, se concluye que existe una relación significativa entre el retroceso glaciar y la variación de la LST, aceptando la hipótesis alternativa (H_1). Esta relación no es lineal directo año a año, sino que se manifiesta con un retardo aproximado de un año y con un efecto acumulativo del calentamiento sostenido, tal como lo evidencian el análisis de correlación cruzada (lag 1) y el estudio de anomalía acumulada.

Los sectores occidental y sur del Nevado Quelccaya presentan la mayor susceptibilidad al retroceso glaciar, con LST máximas que superan los 31 °C (percentil 90). Estas zonas requieren monitoreo prioritario ante nuevas anomalías térmicas positivas.

La integración de herramientas de teledetección (Landsat 8 y 9), SIG (ArcGIS) y análisis estadístico en R Studio permitió evaluar de manera rigurosa la relación entre el retroceso glaciar y la variación de la LST, demostrando que el aumento de la Temperatura superficial es un factor determinante en la dinámica de pérdida glaciar del Nevado Quelccaya, considerando la respuesta retardada del glaciar.

RECOMENDACIONES

Incorporar datos de estaciones meteorológicas in situ, si estuvieran disponibles, para validar y complementar las estimaciones de LST derivadas de sensores remotos.

Realizar un análisis de balance de masa (acumulación vs ablación) para comprender mejor los procesos físicos que controlan el retroceso glaciar.

Aplicar modelos de proyección climática para estimar el retroceso futuro del Nevado Quelccaya bajo diferentes escenarios de cambio climático.

Se sugiere que futuros estudios consideren explícitamente el análisis de correlación cruzada (lag) y anomalía acumulada, ya que este estudio demostró que la relación térmico-glaciar no es inmediata sino retardada.

Los resultados de esta investigación deben ser compartidos con las comunidades locales y autoridades regionales (Cusco y Puno) para sensibilizar sobre la vulnerabilidad del nevado y la importancia del agua de deshielo para las cuencas hidrográficas, para ello se anexa los mapas en formato A3 para mejor visualización (Anexo 2, 3 y 4).

Se recomienda replicar esta metodología en otros glaciares de la Cordillera Vilcanota para evaluar si presentan patrones de retroceso similares al Nevado Quelccaya.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Aguilar, J., et al. (2019). *Elevation-dependent warming of land surface temperatures in the Andes assessed using MODIS LST time series 2000–2017*. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, 77, 119–130. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2018.11.006>
- Cogley, J. G., et al. (2010). *Glossary of Glacier Mass Balance and Related Terms*. IHP-VI, Technical Documents in Hydrology, UNESCO / IACS.
- Coppin, P., Jonckheere, I., Nackaerts, K., Muys, B., y Lambin, E. (2004). Review Article: *Digital change detection methods in ecosystem monitoring: a review*. International Journal of Remote Sensing, 25(9), 1565-1596.
- Cuffey, K. M., y Paterson, W. S. B. (2010). *The physics of glaciers* (4th ed.). Academic Press.
- Cunza Robles, D. (2024). *Estimación del retroceso y predicción del tiempo de permanencia del nevado Ausangate mediante el análisis multitemporal años 1985-2020*, Cusco. Universidad Continental. <https://repositorio.continental.edu.pe/handle/20.500.12394/14573>
- Díaz Aguilar, R. D., Sanchez Larico, S. V., Lujano Laura, E., y Lujano Laura, A. (2017). *Análisis multi-temporal entre 1975 y 2015 sobre cambios de la cobertura glaciar en los nevados Allin Capac y Chichi Capac, Perú*. Revista de Investigaciones Altoandinas, 19(3), 265-274. <https://doi.org/10.18271/ria.2017.291>
- Díaz Matta, V y Bejarano Cárdenas, F. (2017). *Análisis multitemporal del retroceso glaciar del Volcán Nevado Cotopaxi - Ecuador entre los años 1998, 2007 y 2016*. Bogotá: Universidad de Ciencias Aplicadas y Ambientales, 2017. Disponible en: <https://repository.udca.edu.co/handle/11158/1426>
- Díaz R., Barros P. y Bustinza V. (2022). *Guía Rutas del Cambio climático y Geoparque del Glaciar Quelccaya*. Revista Instituto Nacional de Investigación en Glaciares y Ecosistemas de Montaña (INAIGEM)
- Fountain, A. G., y Leonard, K. C. (2003). *Map-based methods for estimating glacier equilibrium-line altitudes*. Journal of Glaciology, 49(166), 297–306. <https://doi.org/10.3189/172756503781830581>

- Francou, B. (2013). *El rápido retroceso de los glaciares en los Andes tropicales: Un desafío para el estudio de la dinámica de los ecosistemas de alta montaña*. Ecología en Bolivia, 48(2), 69-71.
- Gallegos Castro, Elvia, y otros. *Análisis de la variación temporal y espacial de la cobertura glaciar del nevado Cayambe, Ecuador, mediante fotografías aéreas e imágenes landsat*. Ecuador: GeoFocus (Artículos), 2018. ISSN: 1578-5157.
- Ghaderpour, E., Mazzanti, P., Bozzano, F., y Scarascia Mugnozza, G. (2024). Trend Analysis of MODIS Land Surface Temperature and Land Cover in Central Italy. *Land*, 13(6), 796. <https://doi.org/10.3390/land13060796>
- Ghilardi Truffa, J.; Ruiz, L.; Pitte, P.; Clavero, L. (2024). Recent fluctuations of the Alerce glacier (1953-2020), North Patagonian Andes. *Andean Geology* 51 (1): 247-267. doi: <https://dx.doi.org/10.5027/andgeoV51n1-3644>
- Gök, D. T., Scherler, D., y Wulf, H. (2024). Land surface temperature trends derived from Landsat imagery in the Swiss Alps. *The Cryosphere*, 18(11), 5259-5276. <https://doi.org/10.5194/tc-18-5259-2024>
- Hernández-Sampieri, R. y Mendoza, C (2018). *Metodología de la investigación. Las rutas cuantitativa, cualitativa y mixta*, Ciudad de México, México: Editorial Mc Graw Hill Education, Año de edición: 2018, ISBN: 978-1-4562-6096-5, 714 p.
- Huacani W. (2021). *Efectos del cambio climático en la desglaciación del Nevado Ampay-Apurímac, periodo 2000-2019*. (Tesis para optar título de ingeniero ambiental). Universidad Nacional del Altiplano Puno.
- Instituto Nacional de Investigación en Glaciares y Ecosistemas de Montaña (INAIGEM). (2025). *Quelccaya: Laboratorio natural para la ciencia y la humanidad*.
- Instituto Nacional de Investigación en Glaciares y Ecosistemas de Montaña. (2022). *Rutas del Cambio Climático y Geoparque del Glaciar Quelccaya*. <https://hdl.handle.net/20.500.12748/428>
- Jiménez, J. C., Cristóbal, J., Sobrino, J. A., Soria, G., Ninyerola, M., y Pons, X. (2009). Revision of the single-channel algorithm for land surface temperature retrieval from Landsat thermal-infrared data. *Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 47(1), 339–349. <https://doi.org/10.1109/TGRS.2008.2007125>
- Kargel, J. S. (2013). *Changing climate drives lagging and accelerating glacier responses and accelerating adjustments of the hazard regime*. Geophysical Research Abstracts, 15, EGU2013-11464.

- Lamantia, K. A., Larocca, L. J., Thompson, L. G., y Mark, B. G. (2024). *El Niño enhances snow-line rise and ice loss on the Quelccaya Ice Cap, Peru*. *The Cryosphere*, 18, 4633–4649. <https://doi.org/10.5194/tc-18-4633-2024>
- Li, X., Yao, T., Ding, Y., y Shi, Y. (2024). *Greenland-Ice-Sheet Surface Temperature and Melt Extent from 2000 to 2020 and Implications for Mass Balance*. *Remote Sensing*, 15(4), 1149. <https://doi.org/10.3390/rs15041149>
- Luque Gonzales, C. V. A. (2024). *Retroceso de la cobertura glaciar del nevado Quelccaya de la cordillera Vilcanota causado por la influencia de los elementos climáticos, período 2010 - 2022*.
- Malakar, N. K., Hulley, G. C., Hook, S. J., Laraby, K., Cook, M., y Schott, J. R. (2018). *An operational land surface temperature product for Landsat thermal data: methodology and validation*. *Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 56(10), 5717–5735. <https://doi.org/10.1109/TGRS.2018.2824828>
- Malone, A. G. O. (2022). *The evolution of the two largest tropical ice masses since...* *Geosciences*, 12(10), 365. <https://doi.org/10.3390/geosciences12100365>
- Mejías A, McPhee J, Mahmoud H, Farías-Barahona D, Kinnard C, MacDonell S, Montserrat S, Somos-Valenzuela M. y Fernandez A. (2025). *Multidecadal estimation of hydrological contribution and glacier mass balance in the semi-arid Andes based on physically based modeling and geodetic mass balance*. *Front. Earth Sci.* 13:1517081. doi: 10.3389/feart.2025.1517081
- Ministerio del Ambiente. (2019). *Decreto Supremo N°. 012-2019-MINAM*. Lima <https://sinia.minam.gob.pe/normas/decreto-supremo-que-establece-area-conservacion-regional-ausangate>
- Molnia, B. F. (2004). *Glossary of glacier terminology: A glossary of terms providing a vocabulary of modern glacier environment*. U.S. Geological Survey
- Olaya, V. (2014). *Sistemas de Información Geográfica*. Creative Common Attribution.
- Quentin Demarquet, Sébastien Rapinel, Simon Dufour, Laurence Hubert-Moy. *Long-Term Wetland Monitoring Using the Landsat Archive: A Review*. *Remote Sensing*, 2023, 15 (3), pp.820. (10.3390/rs15030820). (hal-03976320)
- Rivera A., Bown F., Napoleoni F., Muñoz C. y Vuille M. (2016). *Balance de Masa Glaciar*. Ediciones Valdivia. Chile.
- Salas Pérez, C., y Duarte Gómez, K. D. (2018). *Análisis del retroceso glaciar del volcán nevado del Ruíz, mediante un estudio multitemporal de imágenes satelitales del*

- periodo 1999-2016. *Revista de Topografía AZIMUT*, 9(1), 9–16.
<https://revistas.udistrital.edu.co/index.php/azimut/article/view/13214>
- Salzmann, N., Huggel, C., Rohrer, M., y Stoffel, M. (2013). *Glacier response to climate change in the Central Andes*. *Global and Planetary Change*, 108, 159-170.
- Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú (SENAMHI). (2025). *Monitoreo climático en los nevados Quelccaya y Quisoquipina*. AGROPERÚ Informa.
- Slaymaker, O. (2001). The role of remote sensing in geomorphology and terrain analysis in the Canadian Cordillera. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 3(1), 11-17. [https://doi.org/10.1016/S0303-2434\(01\)85016-9](https://doi.org/10.1016/S0303-2434(01)85016-9)
- Thompson, L. G., Davis, M. E., Mosley-Thompson, E., Porter, S. E., Corrales, G. V., Shuman, C. A., & Tucker, C. J. (2021). *The impacts of warming on rapidly retreating high-altitude, low-latitude glaciers and ice core-derived climate records*. *Global and Planetary Change*, 203, 103538. <https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2021.103538>
- Hanshaw, M. N., y Bookhagen, B. (2014). *Glacial areas, lake areas, and snow lines from 1975 to 2012: Status of the Cordillera Vilcanota, including the Quelccaya Ice Cap, northern central Andes, Peru*. *The Cryosphere*, 8(2), 359-376. <https://doi.org/10.5194/tc-8-359-2014>
- Wang, W., Sun, M., Che, Y., Yao, X., Zhang, M., y Niu, S. (2023). *Micrometeorological Analysis and Glacier Ablation Simulation in East Kunlun*. *Water*, 15(19), 3517. <https://doi.org/10.3390/w15193517>
- Wang, S., Liu, J., Pritchard, H. D., Ke, L., Qiao, X., Chen, J., Zhang, J., Xiao, W., y Zhou, Y. (2023). *Characterizing 4 decades of accelerated glacial mass loss in the west Nyainqentanglha Range of the Tibetan Plateau*. *Hydrology and Earth System Sciences*, 27, 933–952. <https://doi.org/10.5194/hess-27-933-2023>
- Wood, J. L., Harrison, S., Wilson, R., Emmer, A., Yarleque, C., Glasser, N. F., Torres, J. C., Caballero, A., Araujo, J., Bennett, G. L., Diaz-Moreno, A., Garay, D., Jara, H., Poma, C., Reynolds, J. M., Riveros, C. A., Romero, E., Shannon, S., Tinoco, T., ... Villafane, H. (2021). *Contemporary glacial lakes in the Peruvian Andes*. *Global and Planetary Change*, 204(103574), 103574. <https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2021.103574>
- Zamora Martínez, Marisela Cristina. (2015). *Cambio climático. Revista mexicana de ciencias forestales*, 6(31), 04-07.

http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttextpid=S2007-11322015000500001yIng=esytIng=es.

- Zemp, M., Huss, M., Thibert, E., Eckert, N., McNabb, R., Huber, J., ... y Paul, F. (2019). *Global glacier mass changes and their contributions to sea-level rise from 1961 to 2016*. Nature, 568(7752), 382–386. <https://doi.org/10.1038/s41586-019-1071-0>.
- Zekollari, H., Huss, M., y Farin Otti, D. (2020). *On the Imbalance and Response Time of Glaciers in the European Alps*. Geophysical Research Letters, 47(2), e2019GL085578. <https://doi.org/10.1029/2019GL085578>
- Zhang, H., Zhang, F., Zhang, G., Ma, Y., Yang, K., y Ye, M. (2018). *Daily air temperature estimation on glacier surfaces in the Tibetan Plateau using MODIS LST data*. Journal of Glaciology, 64(243), 132-147. <https://doi.org/10.1017/jog.2018.6>

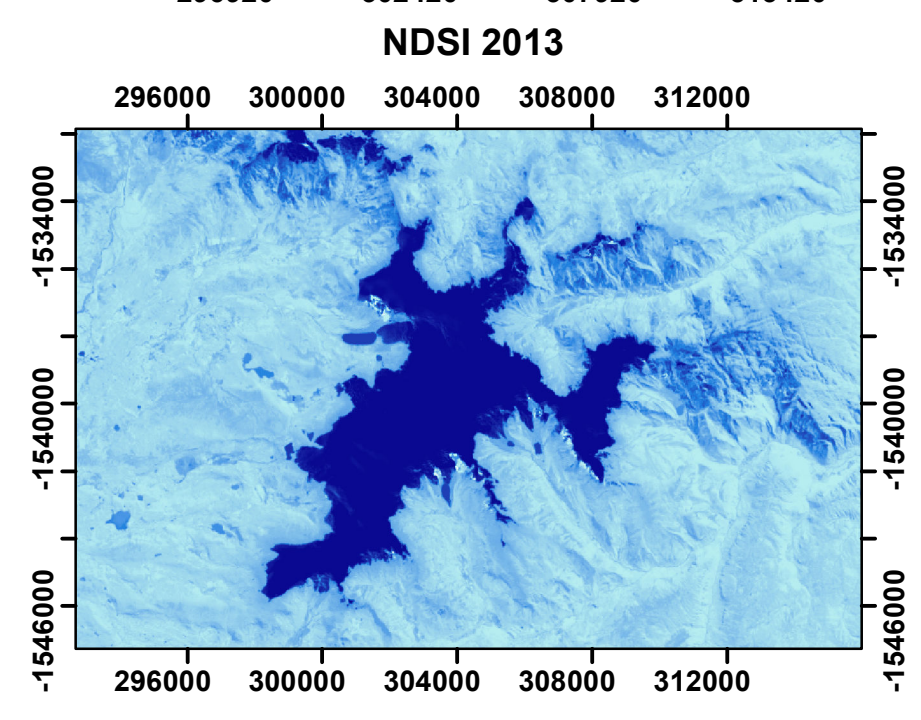
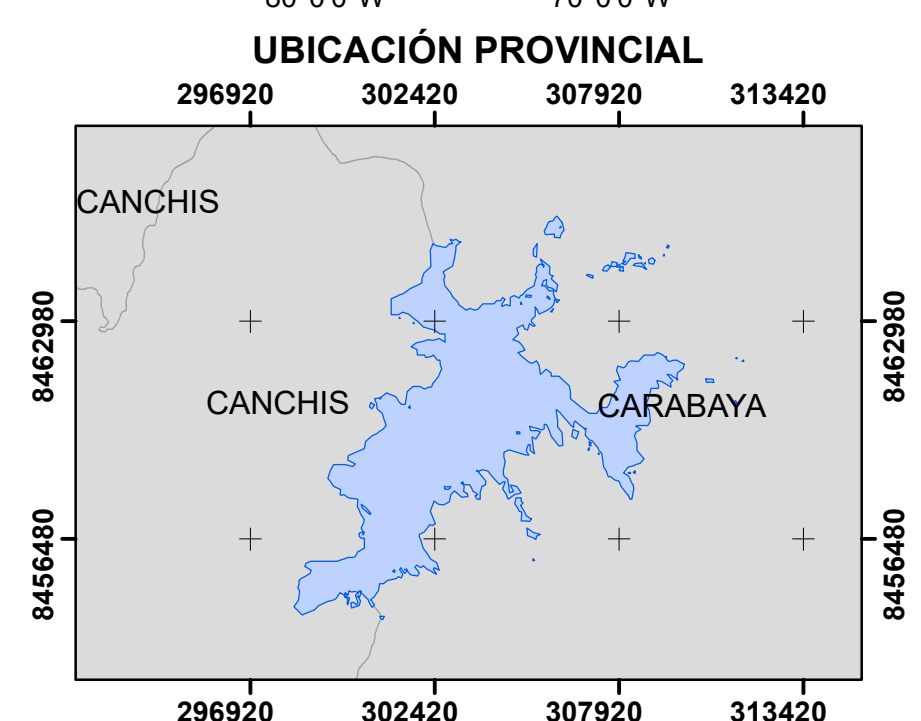
ANEXOS

Anexo 1. Matriz de consistencia

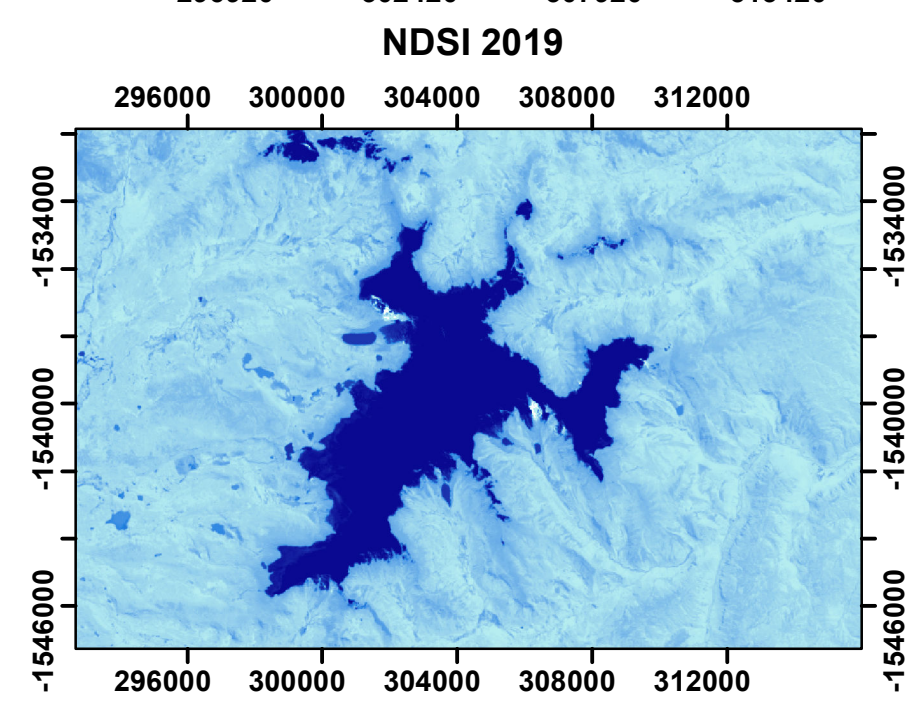
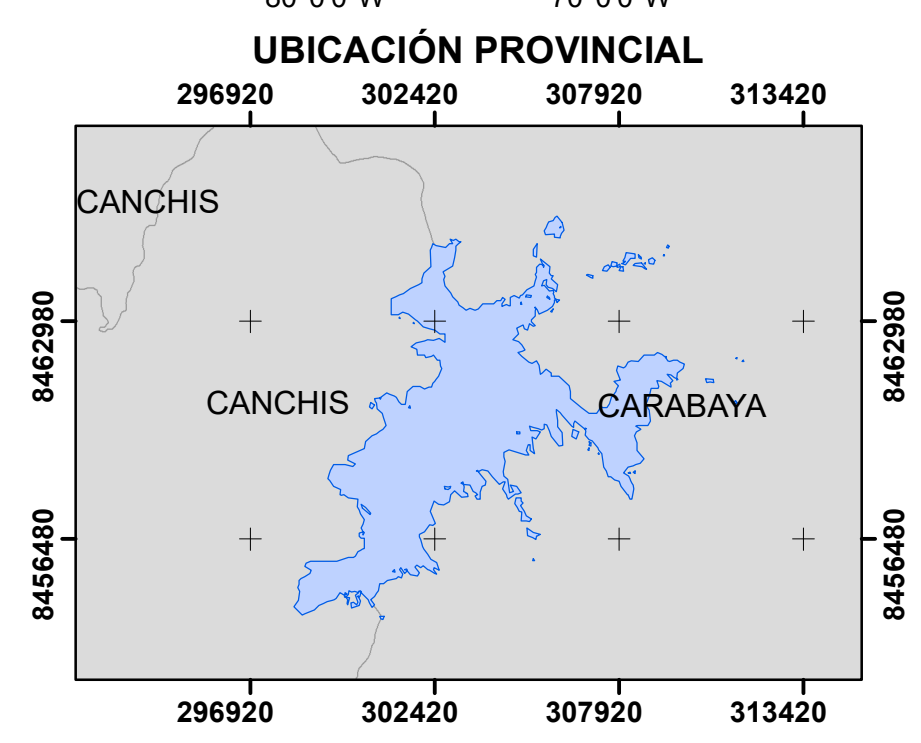
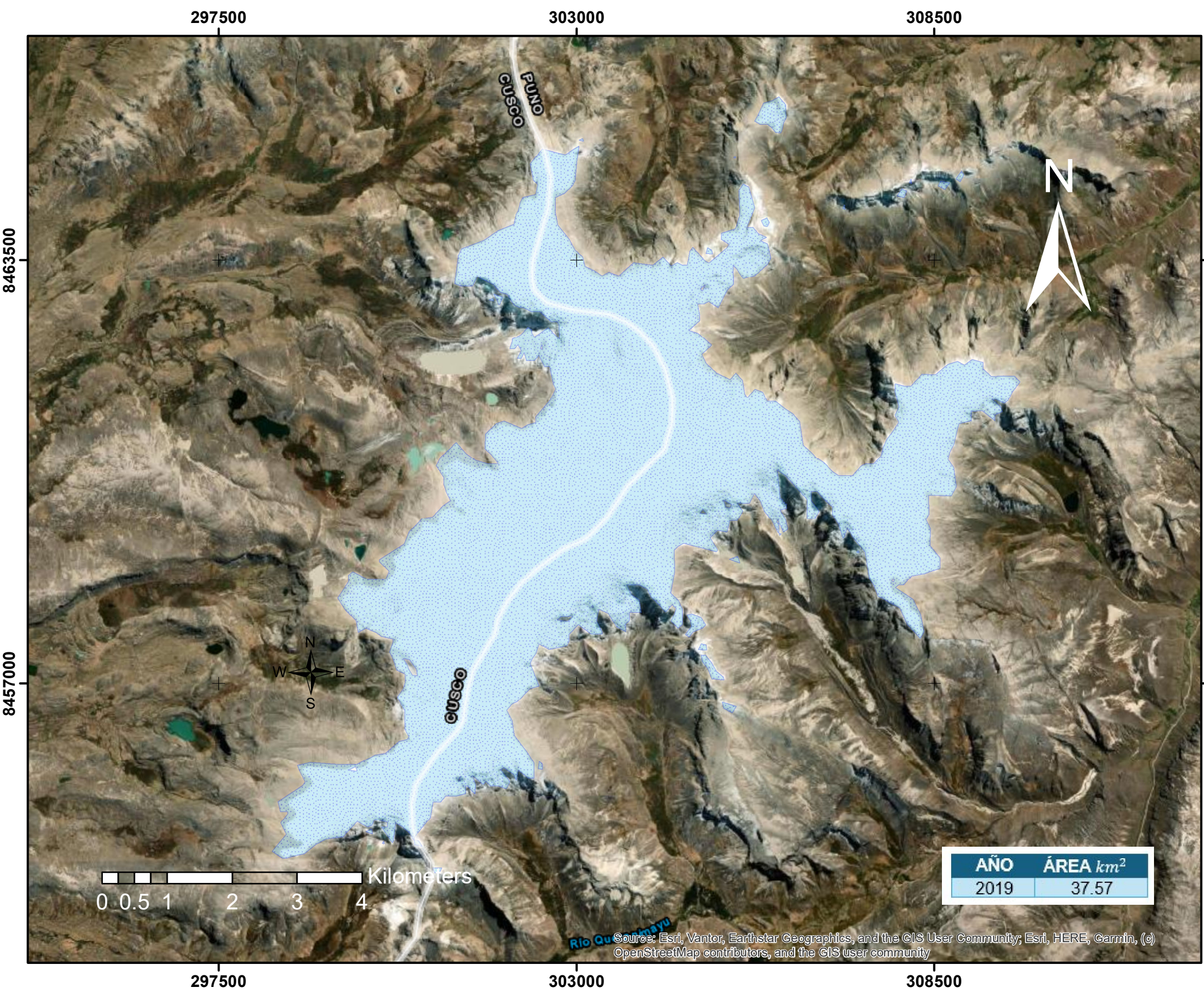
Problema	Objetivos	Hipótesis	Variables	Indicador	Metodología
Problema general ¿Cuál es la relación entre el retroceso glaciar multitemporal y la variación de la temperatura superficial terrestre del Nevado Quelccaya, Cordillera Vilcanota?	Objetivo general Evaluar el retroceso glaciar multitemporal y su relación con la variación de la Temperatura Superficial Terrestre en el Nevado Quelccaya, Cordillera Vilcanota.	Hipótesis H0: No existe una relación significativa entre el retroceso glaciar del Nevado Quelccaya y la variación de la Temperatura Superficial Terrestre (LST). H1: Si existe una relación significativa entre el retroceso glaciar del Nevado Quelccaya y la variación de la temperatura superficial terrestre (LST).	Variable independiente -Temperatura Superficial Terrestre (LST)	- LST promedio (°C). -LST máxima y mínima. -Tendencia térmica (°C).	Tipo de investigación: - Investigación aplicada. Nivel de investigación: - Descriptivo - Correlacional
Problemas específicos a. ¿Cuál es la extensión espacial del glaciar en diferentes periodos, mediante la delimitación espectral usando el Índice de Nieve Normalizado (NDSI), en imágenes satelitales multitemporales del Nevado Quelccaya Cordillera Vilcanota?	Objetivos específicos a. Identificar la extensión espacial del glaciar en diferentes periodos, mediante la delimitación espectral usando el Índice de Nieve Normalizado (NDSI), en imágenes satelitales multitemporales del Nevado Quelccaya Cordillera Vilcanota.		Variable dependiente -Retroceso glaciar del Nevado Quelccaya Variable interviniente - Nubosidad.	- Área cubierta por el glaciar (km ²) en series temporales. - Pérdida o incrementación de área cubierta por el glaciar.	Diseño de investigación - No experimental. - Longitudinal.

b. ¿Cómo varía la superficie glaciar correspondiente a cada año de estudio para determinar la magnitud y la tasa de retroceso del Nevado Quelccaya Cordillera Vilcanota? c. ¿Cuál es la Temperatura Superficial Terrestre (LST) a partir de bandas térmicas satelitales y generar mapas multitemporales que describan su variación espacial en el entorno del Nevado Quelccaya Cordillera Vilcanota? d. ¿Qué relación espacial y temporal entre el retroceso glaciar y la variación de la LST mediante herramientas estadísticas y geoespaciales del Nevado Quelccaya Cordillera Vilcanota? e. ¿Cuáles son los patrones de cambio glaciar e identificar las zonas con mayor susceptibilidad al retroceso en función de la tendencia de la temperatura superficial terrestre del Nevado Quelccaya Cordillera Vilcanota?	b. Comparar la superficie glaciar correspondiente a cada año de estudio para determinar la magnitud y la tasa de retroceso del Nevado Quelccaya Cordillera Vilcanota. c. Calcular la Temperatura Superficial Terrestre (LST) a partir de bandas térmicas satelitales y generar mapas multitemporales que describan su variación espacial en el entorno del Nevado Quelccaya Cordillera Vilcanota. d. Analizar la relación espacial y temporal entre el retroceso glaciar y la variación de la LST mediante herramientas estadísticas y geoespaciales del Nevado Quelccaya Cordillera Vilcanota. e. Evaluar los patrones de cambio glaciar e identificar las zonas con mayor susceptibilidad al retroceso en función de la tendencia de la temperatura superficial terrestre del Nevado Quelccaya Cordillera Vilcanota.		-Condiciones climáticas (estación seca).		
--	--	--	---	--	--

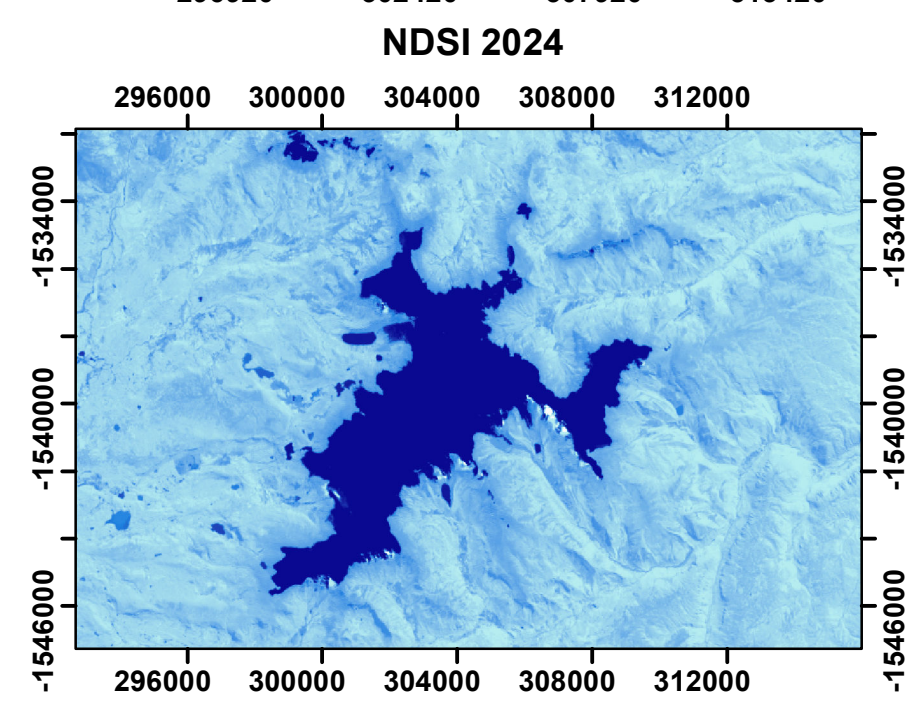
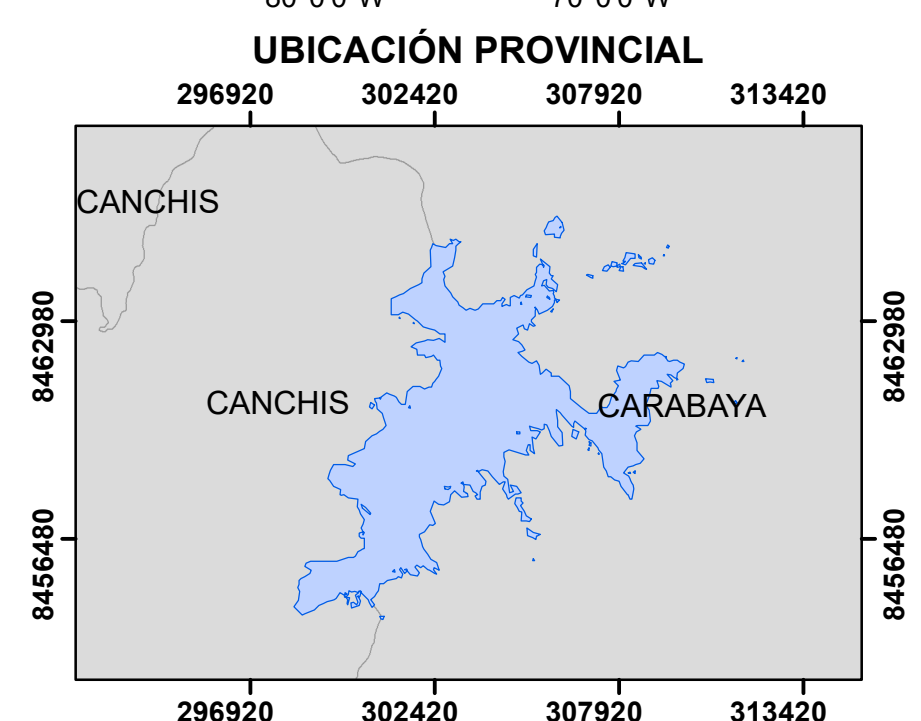
Anexo 2. Mapas de extensión glaciár en formato A3



EXTENSIÓN GLACIAR DEL NEVADO QUELCCAYA - AÑO 2013						
	ELABORADO POR	PROYECCIÓN	FUENTE	ESCALA	FECHA	N° MAPA
	Karen Fernanda Huillca Ticona	WSG 1984-UTM 19 S	USGS Landsat 8 y 9 ArcMap	1:100.000	Junio 2026	05

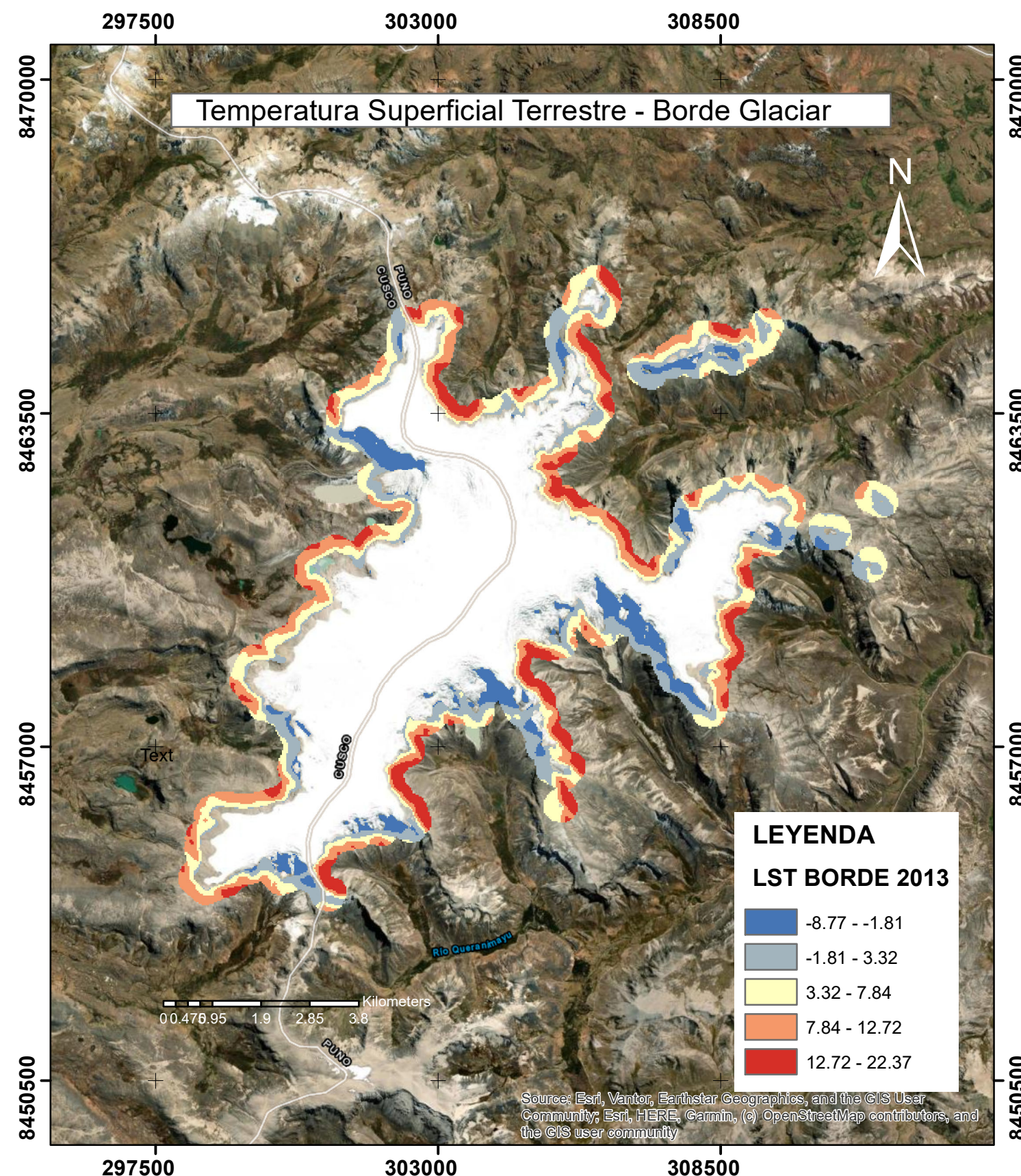
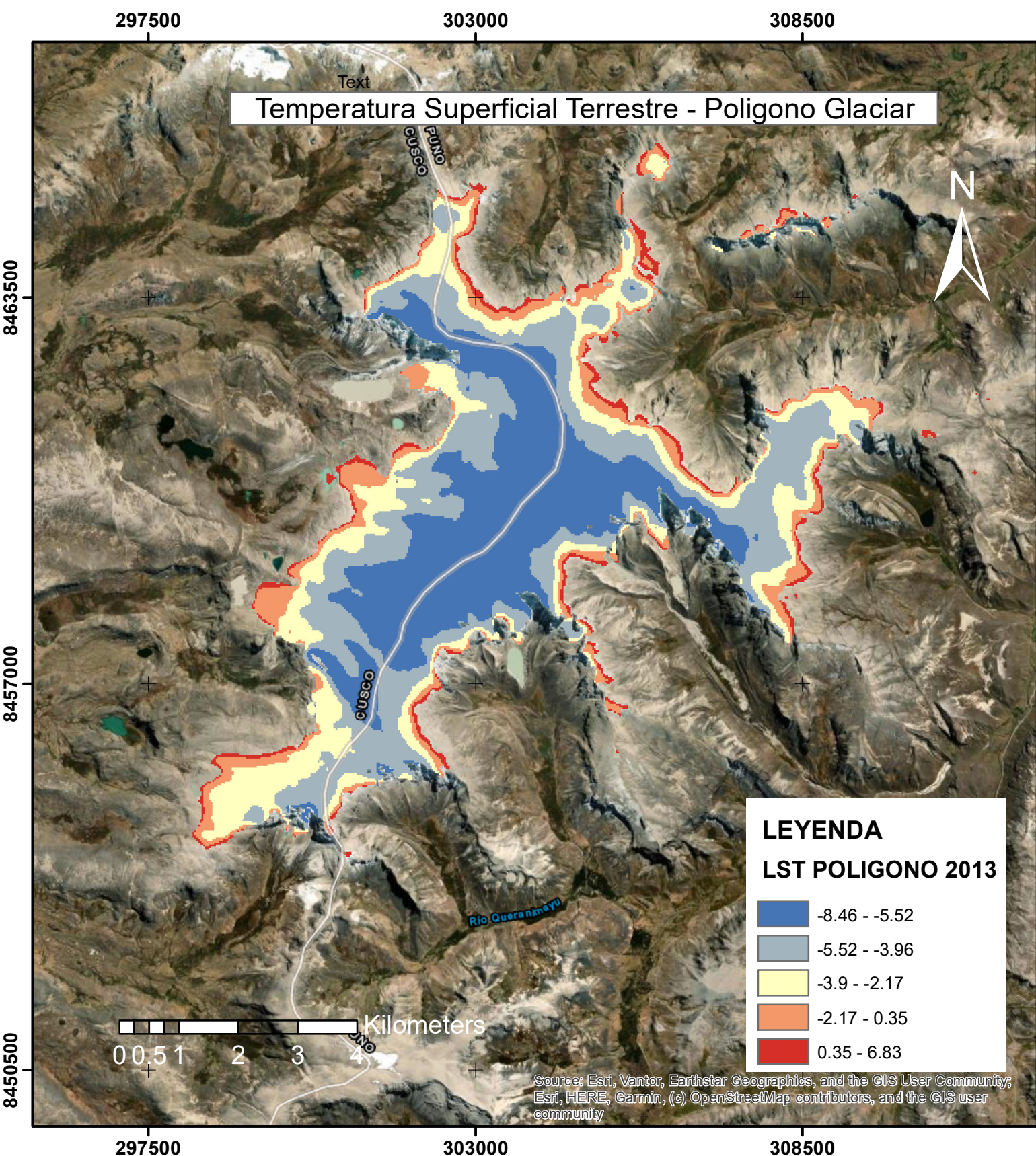


EXTENSIÓN GLACIAR DEL NEVADO QUELCCAYA - AÑO 2019						
	ELABORADO POR	PROYECCIÓN	FUENTE	ESCALA	FECHA	N° MAPA
	Karen Fernanda Huillca Ticona	WSG 1984-UTM 19 S	USGS Landsat 8 y 9 ArcMap	1:66.783	Junio 2026	07

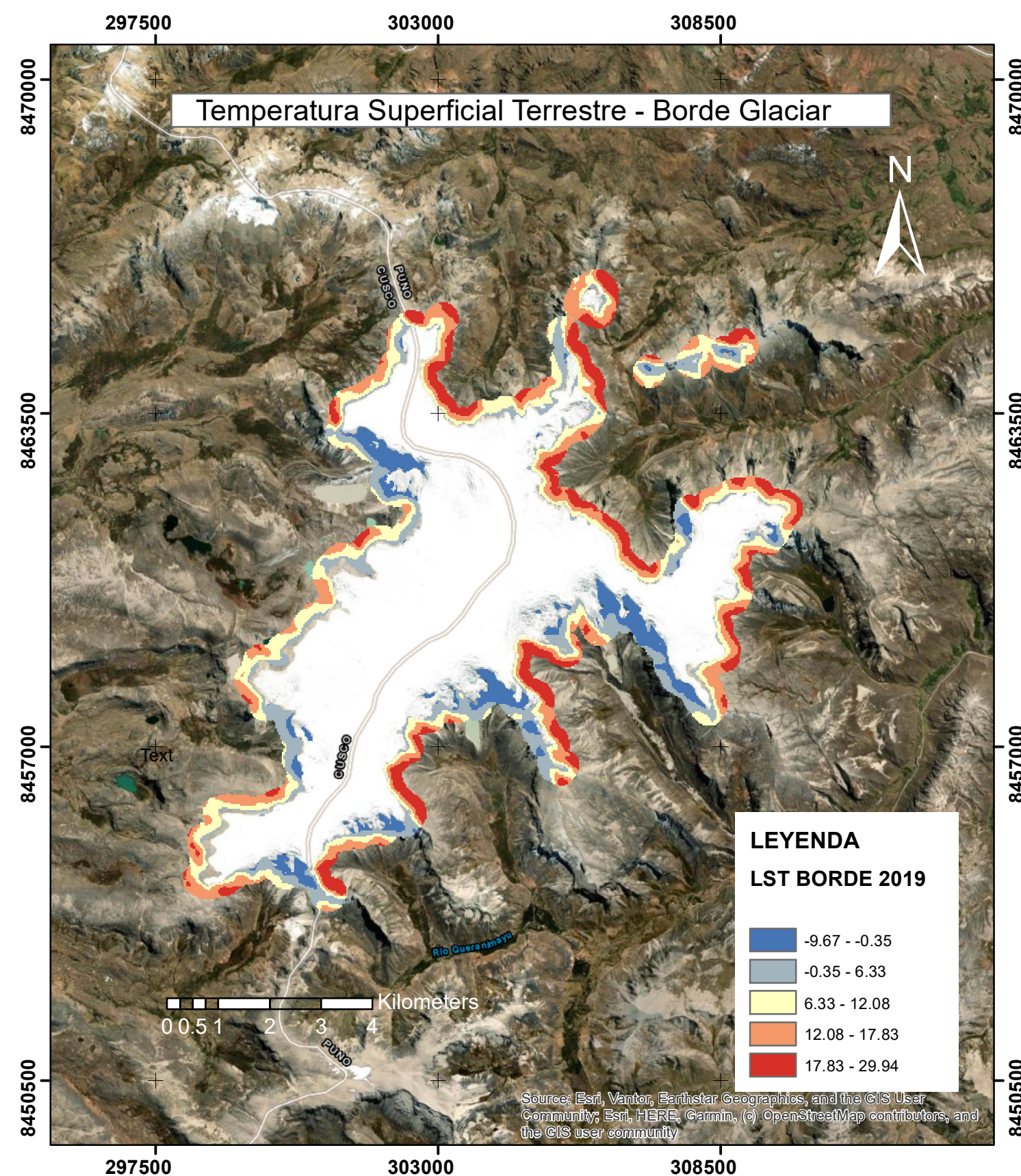
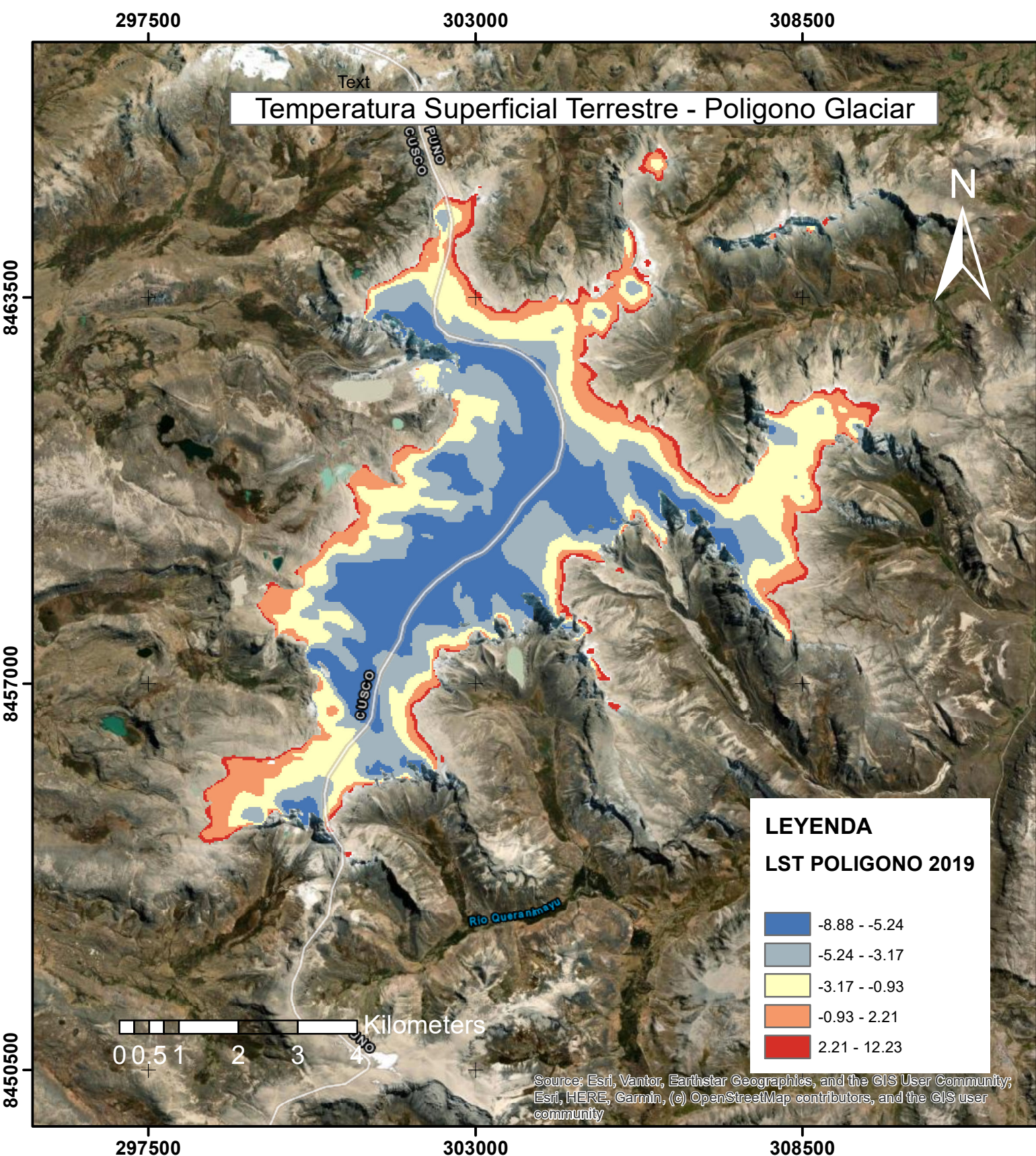


EXTENSIÓN GLACIAR DEL NEVADO QUELCCAYA - AÑO 2024						
	ELABORADO POR	PROYECCIÓN	FUENTE	ESCALA	FECHA	N° MAPA
	Karen Fernanda Huillca Ticona	WSG 1984-UTM 19 S	USGS Landsat 8 y 9 ArcMap	1:66.783	Junio 2026	08

Anexo 3. Mapas de la LST en formato A3

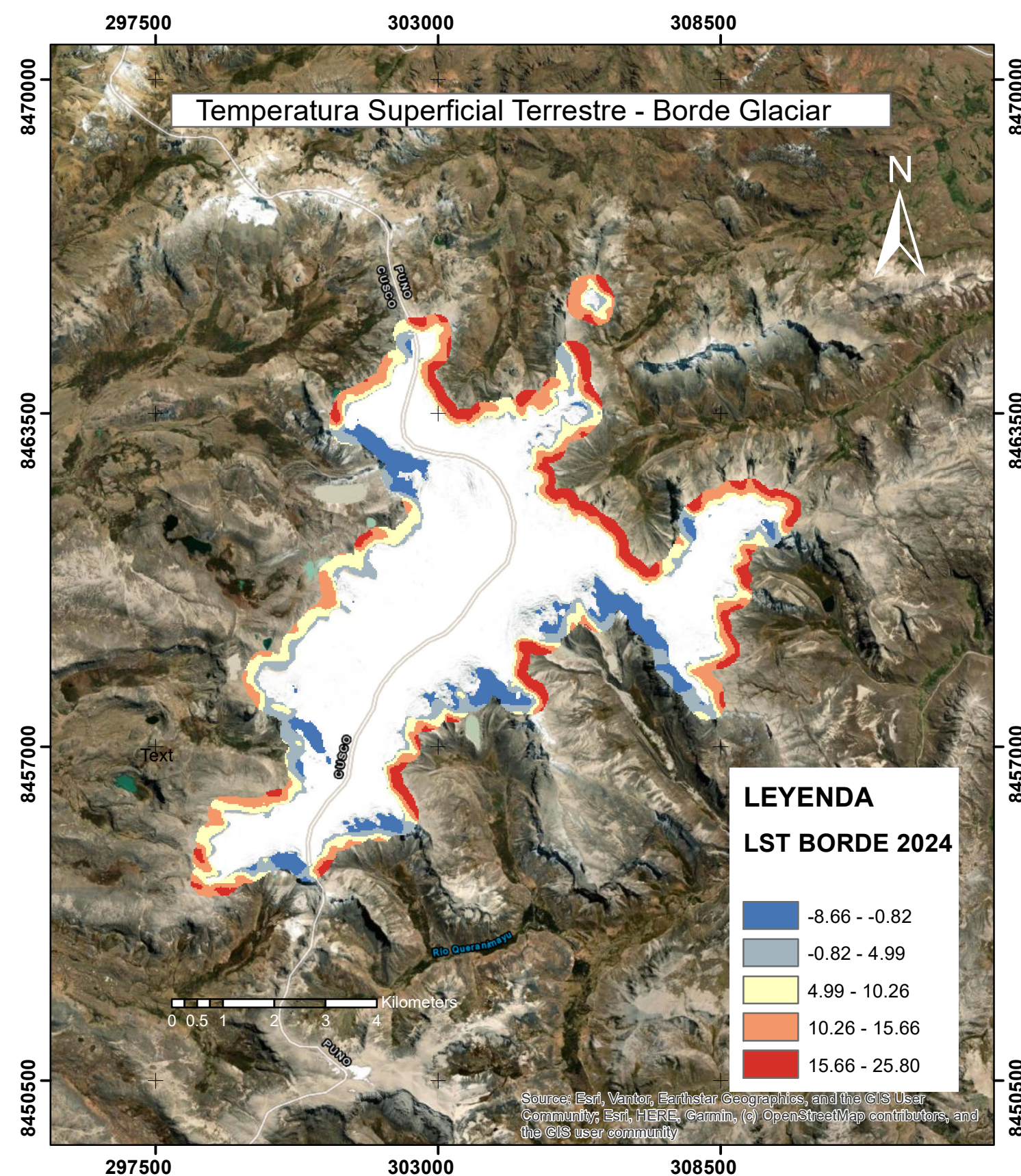
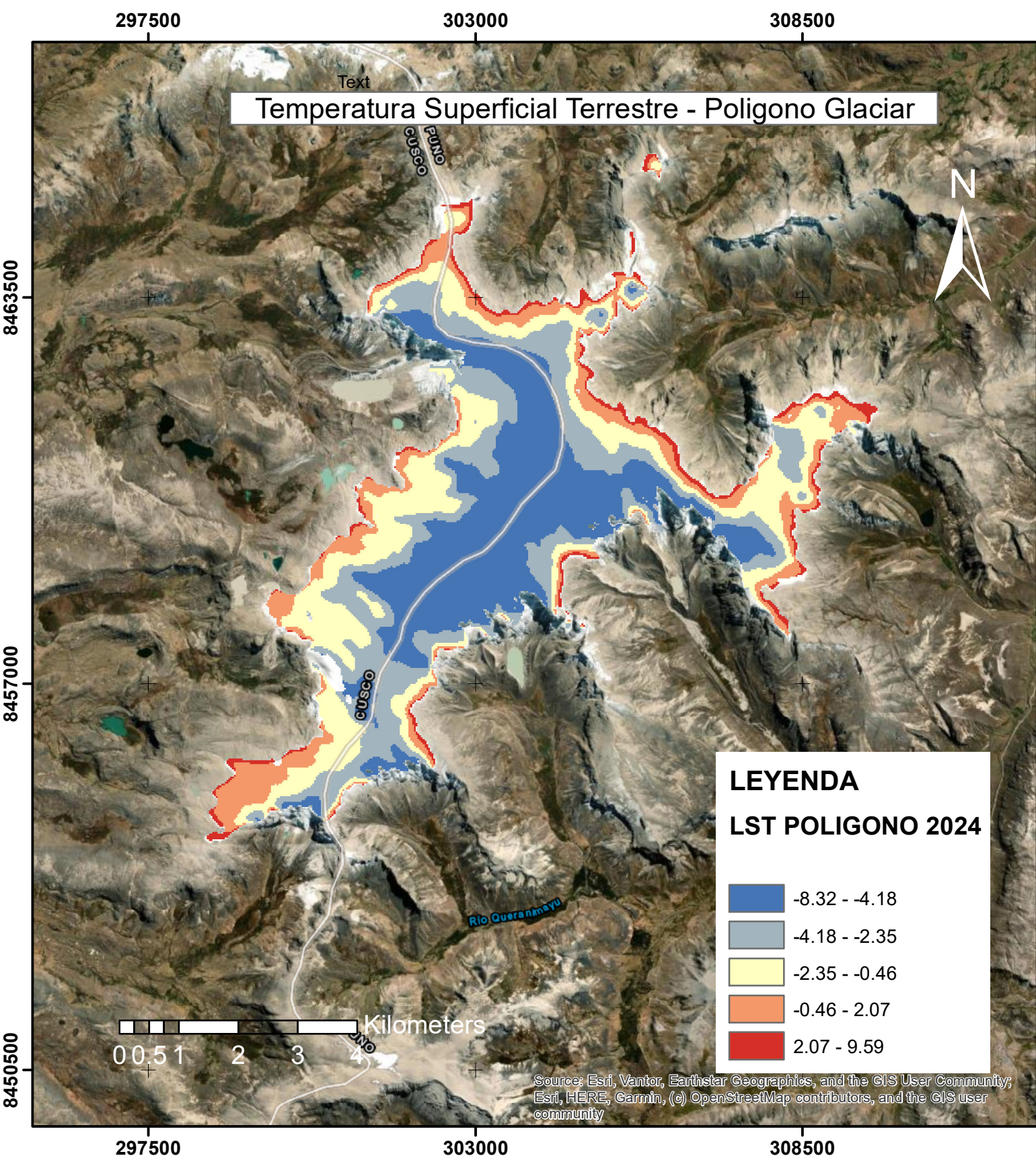


DISTRIBUCIÓN ESPACIAL DE LA LST EN EL POLIGONO Y BORDE DEL NEVADO QUELCCAYA 2013								
	ELABORADO POR	PROYECCIÓN	FUENTE	ESCALA	ESTADISTICA POLIGONO GLACIAR	ESTADISTICA BORDE GLACIAR	FECHA	N° MAPA
	Karen Fernanda Huillca Ticona	WSG 1984-UTM 19 S	USGS Landsat 8 y 9 ArcMap	1:100.000	Media: -4.26 Máx: 6.83 Min: -8.46	Media: 5.64 Máx: 22.37 Min: -8.77	Junio 2026	09

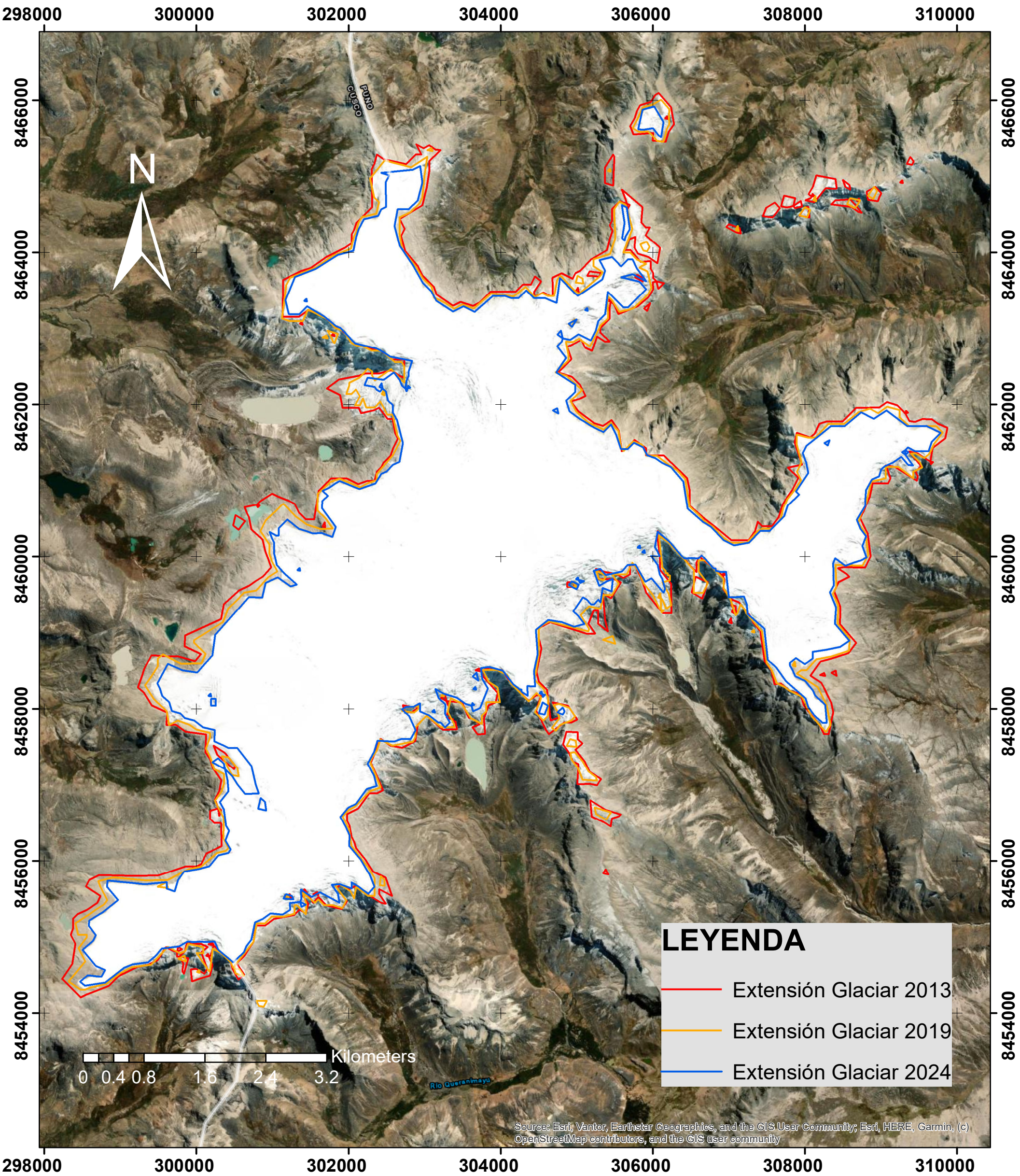


DISTRIBUCIÓN ESPACIAL DE LA LST EN EL POLIGONO Y BORDE DEL NEVADO QUELCCAYA 2019

	ELABORADO POR	PROYECCIÓN	FUENTE	ESCALA	ESTADISTICA POLIGONO GLACIAR	ESTADISTICA BORDE GLACIAR	FECHA	N° MAPA
	Karen Fernanda Huillca Ticona	WSG 1984-UTM 19 S	USGS Landsat 8 y 9 ArcMap	1:100.000	Media: -3.24 Máx: 12.23 Min: -8.88	Media: 9.88 Máx: 29.94 Min: -9.67	Junio 2026	10



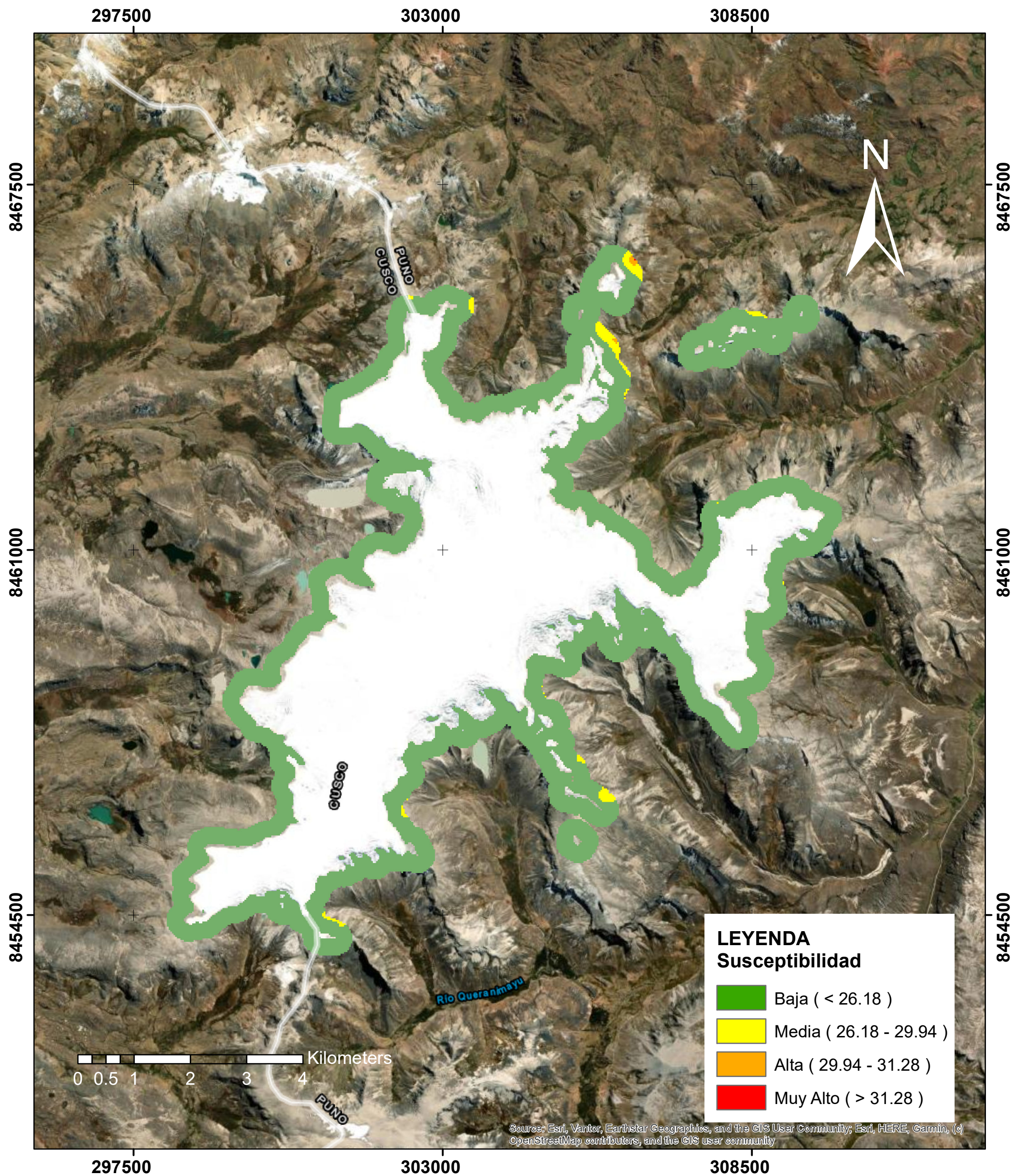
DISTRIBUCIÓN ESPACIAL DE LA LST EN EL POLIGONO Y BORDE DEL NEVADO QUELCCAYA 2024								
	ELABORADO POR	PROYECCIÓN	FUENTE	ESCALA	ESTADISTICA POLIGONO GLACIAR	ESTADISTICA BORDE GLACIAR	FECHA	N° MAPA
	Karen Fernanda Huillca Ticona	WSG 1984-UTM 19 S	USGS Landsat 8 y 9 ArcMap	1:100.000	Media: -2.59 Máx: 9.59 Min: -8.32	Media: 7.83 Máx: 25.80 Min: -8.66	Junio 2026	11



SUPERPOSICIÓN MULTITEMPORAL DEL RETROCESO GLACIAR - NEVADO QUELCCAYA (2013-2024)

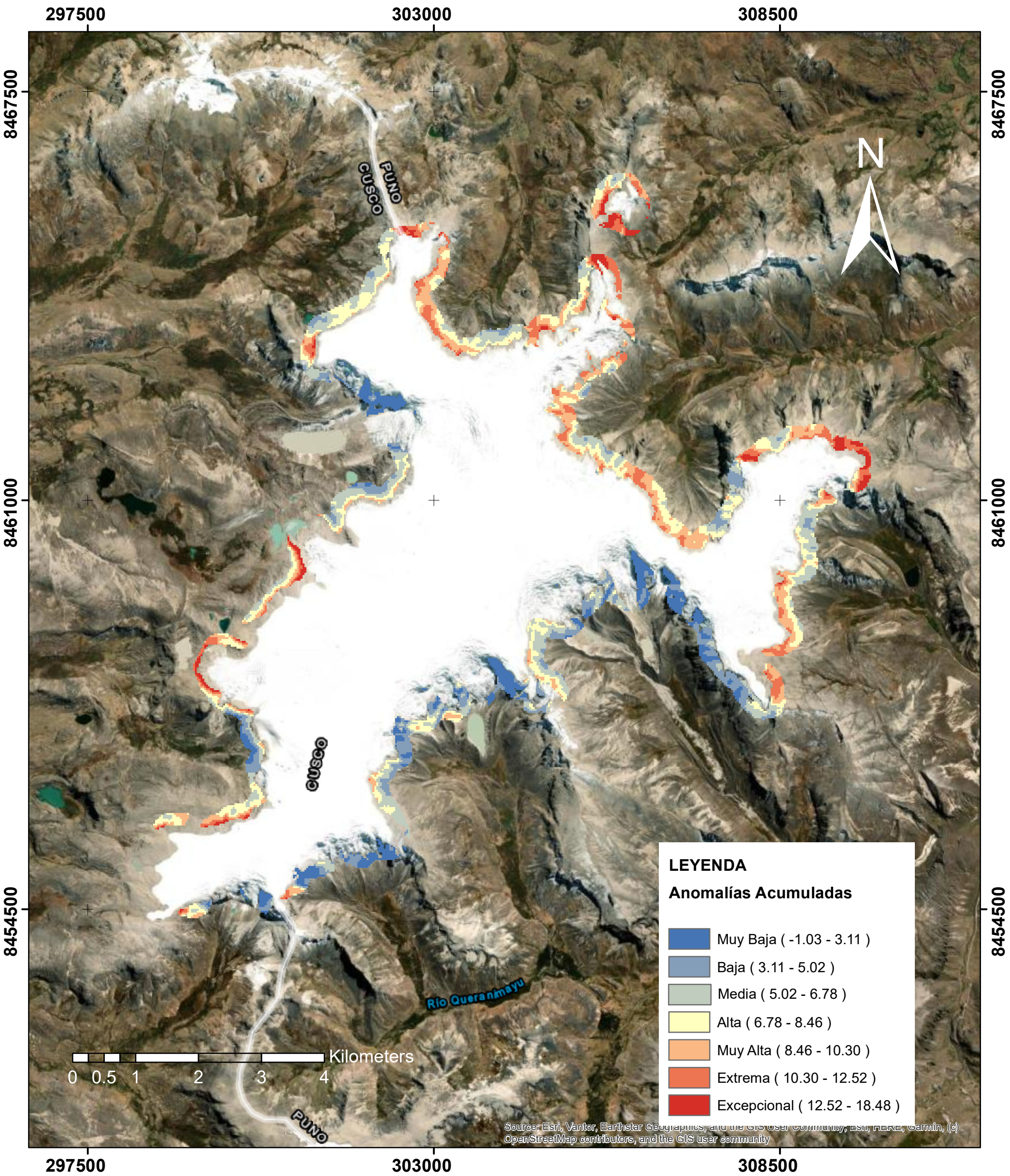
	ELABORADO POR	PROYECCIÓN	FUENTE	ESCALA	FECHA	N° MAPA
	Karen Fernanda Huilca Ticona	WSG 1984-UTM 19 S	USGS Landsat 8 y 9 ArcMap	1:47.991	JUNIO 2026	08

Anexo 4. Mapas de patrones y susceptibilidad en formato A3

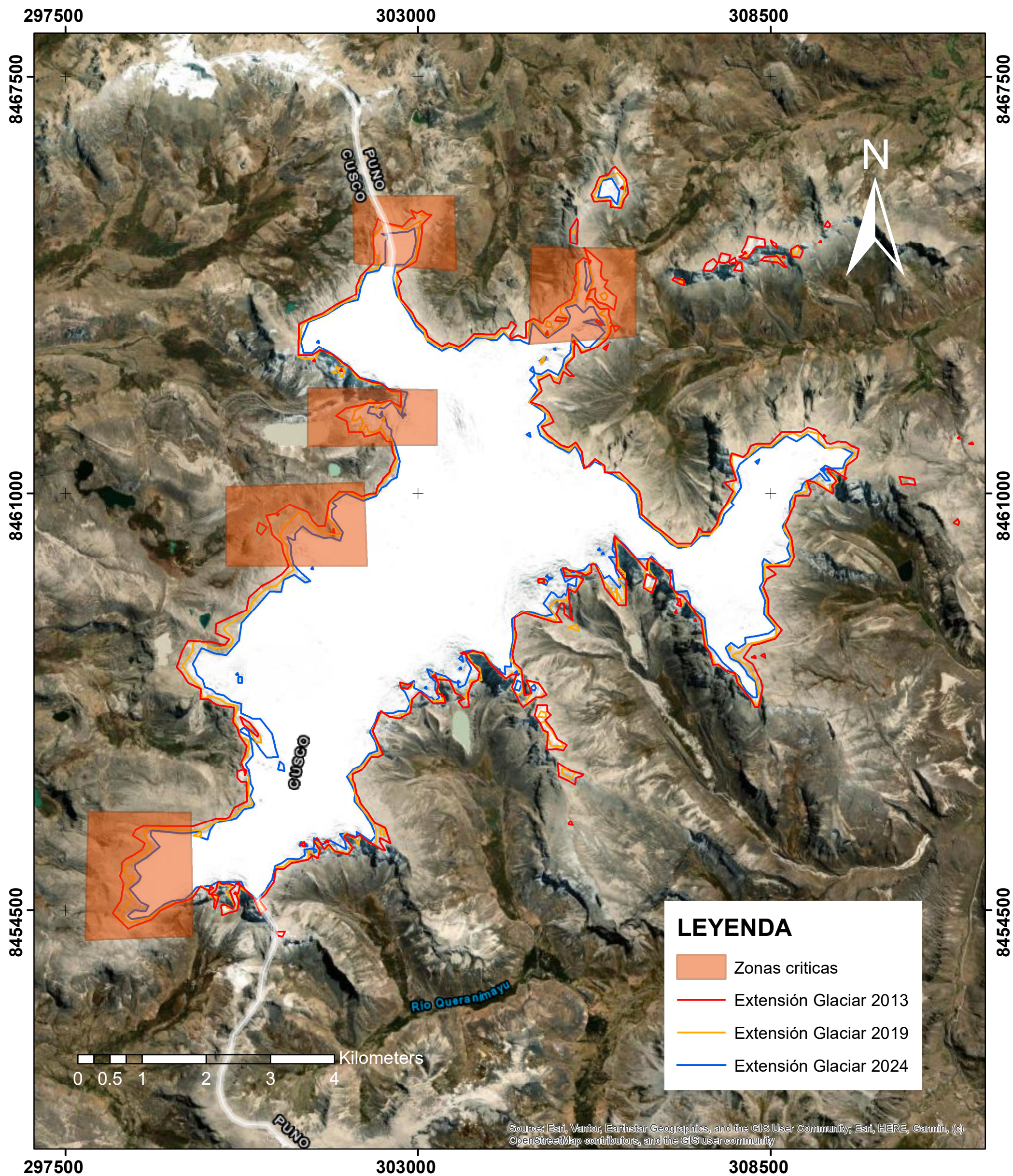


SUSCEPTIBILIDAD AL RETROCESO GLACIAR DEL NEVADO QUELCCAYA

	ELABORADO POR	PROYECCIÓN	FUENTE	ESCALA	FECHA	N° MAPA
	Karen Fernanda Huillca Ticona	WSG 1984-UTM 19 S	USGS Landsat 8 y 9 ArcMap	1:64.960	JUNIO 2026	12



ANOMALÍAS TÉRMICAS ACUMULADAS EN EL BORDE GLACIAR (2021-2024)						
	ELABORADO POR	PROYECCIÓN	FUENTE	ESCALA	FECHA	N° MAPA
	Karen Fernanda Huilca Ticona	WSG 1984-UTM 19 S	USGS Landsat 8 y 9 ArcMap	1:58.043	JUNIO 2026	13



ZONAS CRÍTICAS DE RETROCESO GLACIAR DEL NEVADO QUELCCAYA						
	ELABORADO POR	PROYECCIÓN	FUENTE	ESCALA	FECHA	N° MAPA
	Karen Fernanda Huillca Ticona	WSG 1984-UTM 19 S	USGS Landsat 8 y 9 ArcMap	1:75.758	JUNIO 2026	14