

DIRECCIÓN DE INVESTIGACIÓN EN GLACIARES
SUBDIRECCIÓN DE INVESTIGACIÓN GLACIOLÓGICA

INFORME DEL BALANCE DE MASA DEL GLACIAR GUESHGUE POR MÉTODO GEODÉSICO 2019-2022

Provincia de Recuay, Áncash



PERÚ

Ministerio
del Ambiente

10 AÑOS **INAIGEM**
INSTITUTO NACIONAL DE
INVESTIGACIÓN EN GLACIARES Y
ECOSISTEMAS DE MONTAÑA

Título: INFORME DEL BALANCE DE MASA DEL GLACIAR GUESHGUE POR MÉTODO GEODÉSICO
2019-2022

Autor: Alexzander Santiago Martel

Editado por el Instituto Nacional de Investigación en Glaciares y Ecosistemas de Montaña -
INAIGEM

Dirección de Investigación en Glaciares

Subdirección de Riesgos Asociados a Glaciares

Av. Centenario 2656 - Sector Palmira, Independencia, Huaraz, Áncash, Perú

Teléfono: +51 (043) 643460

Web: <https://www.gob.pe/inaigem>

Junio, 2025.

DEPÓSITO LEGAL N° 2025-07230

ÍNDICE

I. INTRODUCCIÓN	5
II. OBJETIVOS	5
III. ÁREA DE ESTUDIO	6
IV. METODOLOGÍA	6
4.1. Generación del Modelo digital de Superficie	6
4.2. Generación de cartografía base	7
4.2.1. Obtención de área Glaciar	7
4.2.2. Georreferenciación de información Raster	9
4.3. Corrección del modelo digital de terreno	10
4.4. Co-registro	11
4.5. Balance de masa	12
V. RESULTADOS	13
5.1. Análisis de cambios de manera puntual	13
5.1.1. Co-registro	13
5.1.2. Estimación de pérdida de volumen Glaciar.....	14
5.2. Análisis a nivel general del Glaciar Gueshgue	15
5.2.1. Periodo de análisis 2020-2022	16
VI. CONCLUSIÓN	19
VII. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	20

Lista de figuras

Figura 1. Secuencia para la obtención del DSM y ortofotografía, haciendo uso del software fotogramétrico.	7
Figura 2. Resultados esperados mediante la secuencia de obtención de productos (a) DSM y (b) Ortofotografía.....	7
Figura 3. En la imagen a) se observa el proceso de búsqueda y descarga de imagen satelital de la plataforma EO Browser, mientras que en la imagen b) se aprecia la combinación de bandas SWIR.....	8
Figura 4. Se aprecia el proceso de obtención de la cobertura de glaciares en formato vectorial (b), mientras que en la imagen a) se aprecia la obtención de información mediante la clasificación automática de información y en la imagen c) se observa el área glaciar depurado..	8
Figura 5. Digitalización de las áreas glaciares según registro fotogramétrico realizado.	9
Figura 6. Georreferenciación de los productos fotogramétricos, en la figura a) se muestra la ortofoto patrón del año 2018, mientras que la figura b) muestra la información del periodo 2024 donde se aprecia el desplazamiento del marcador verde evidenciando así el desplazamiento de la información, mientras que en la figura c) se muestra la información 2024 posicionado donde se aprecia el marcado verde correctamente ubicado.....	10
Figura 7. En la imagen de la izquierda se muestra el randomizado de puntos en la zona de no movimiento (izquierda), mientras que en la derecha se aprecia el proceso de co-registro.	10
Figura 8. Ilustración de la ecuación en relación a (dh , α y Ψ).	12
Figura 9. En la imagen se muestra el co-registro (ajuste planimétrico) de la información raster del periodo 2020.....	14
Figura 10. En la imagen izquierda se aprecia la pérdida de espesor glaciar en el periodo 2018 – 2022 4 años de análisis, mientras que en la figura de la derecha se muestran los resultados del periodo 2018 – 2024 (6 años de análisis).....	15
Figura 11. Generación de la ecuación lineal en base al análisis de cotas respecto a la variación del espesor glaciar.	16

Lista de ecuaciones

Ecuación 1. Balance geodésico, para la estimación de la pérdida de masa glaciaria..... 12

Lista de Mapa

Mapa 1. Ubicación del área de estudio..... 6

Lista de Tabla

Tabla 1. Reconstrucción de variación de espesor en función a las cuotas. 16

I. INTRODUCCIÓN

El Perú posee el 68 % de glaciares tropicales del mundo, los cuales están experimentando un retroceso acelerado, como lo evidencian los datos del INAIGEM (2023) basados en el Inventario Nacional de Glaciares y Lagunas de Origen Glaciar (INGLOG). Según este inventario, los glaciares tropicales del Perú han perdido 1348.75 km² (56%) de su superficie en los últimos 58 años, tomando como referencia el estudio realizado por Hidrandina en 1989.

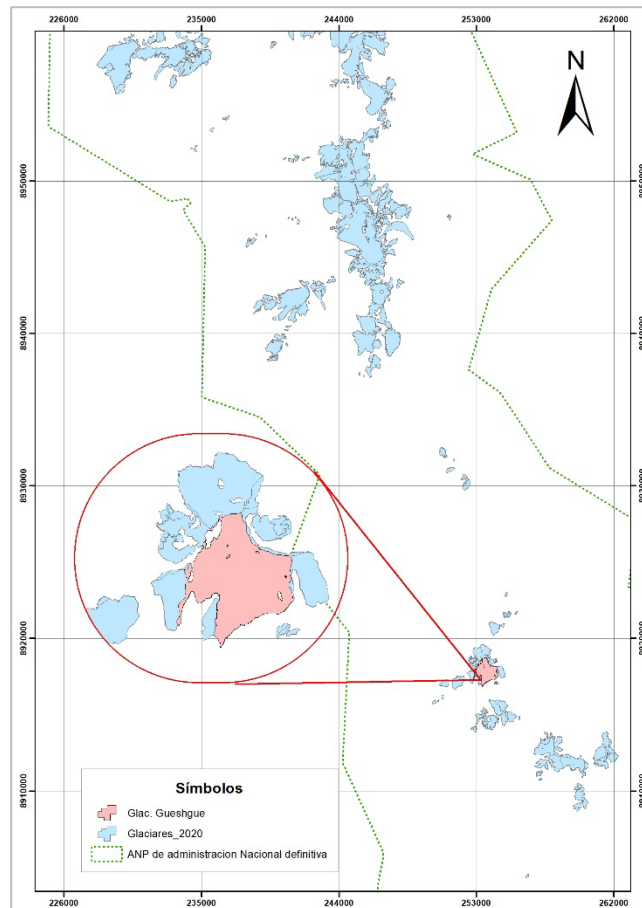
Para analizar el comportamiento y los cambios de los glaciares a consecuencia del cambio climático, el INAIGEM realiza estudios en el glaciar con el método directo el cual consta de medición topográfica por el método convencional, instalación de balizas y medición de pozos. Mediante este método se estima el balance de masa realizando interpolaciones con los datos de las balizas colectados en campo. No obstante, este método es el propuesto por estudios desarrollados por (Francou & Pouyaud, 2004). No obstante, el INAIGEM propone desarrollar el estudio por el método indirecto mediante la topografía de precisión haciendo el uso de Tecnología de Sistema de Aeronave Pilotado Remotamente (siglas en inglés RPAS). Para lo cual, desde el año 2018 el INAIGEM realiza los primeros registros fotogramétricos del glaciar Gueshgue liderado por la subdirección de Investigación Glaciológica, generando así información de gran precisión y resolución espacial para así reconstruir la superficie glaciar y estimar la pérdida de volumen glaciar del área de estudio y así innovar y cambiar el método de las balizas por el fotogramétrico.

II. OBJETIVOS

- Estimar la pérdida y/o ganancia de volumen del glaciar Gueshgue, durante el periodo de estudio 2019- 2022.
- Analizar la pérdida del área glaciar durante el periodo 2019-2022 y la tendencia por rango altitudinal.

III. **ÁREA DE ESTUDIO**

El glaciar Gueshgue, ubicado en la cordillera Blanca en las coordenadas 08°46 '56.58"S y 77°14 '45.71"W, cuyas aguas drenan hacia la subcuenca de Yanayacu principal tributario de la cuenca del Santa, estos guas luego discurren al Pacífico. Políticamente se ubica en el Departamento de Ancash, provincia de Recuay distrito de Catac.



Mapa 1. Ubicación del área de estudio.

IV. **METODOLOGÍA**

4.1. **Generación del Modelo digital de Superficie**

La generación de los modelos digitales de superficie se desarrolló siguiendo los criterios de la reconstrucción fotogramétrica como se describe a continuación.

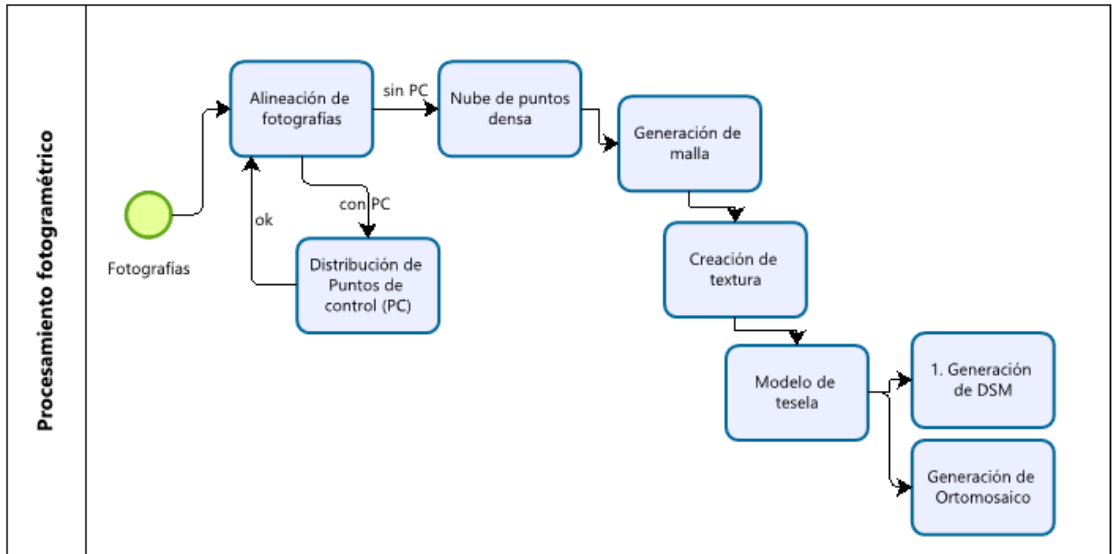


Figura 1. Secuencia para la obtención del DSM y ortofotografía, haciendo uso del software fotogramétrico.

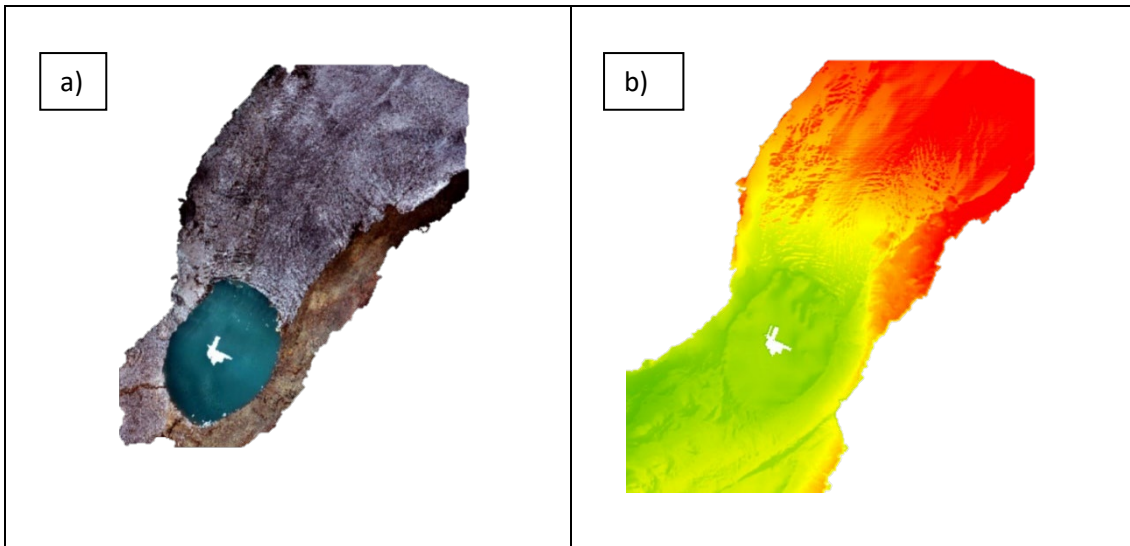


Figura 2. Resultados esperados mediante la secuencia de obtención de productos (a) DSM y (b) Ortofotografía

4.2. Generación de cartografía base

4.2.1. Obtención de área Glaciar

Para la obtención del área glaciar, se usó como base las imágenes satelitales Sentinel-2 de resolución espacial 10 metros. Estas imágenes satelitales fueron adquiridas del portal web EO Browser, plataforma donde se encuentran almacenadas las imágenes satelitales de la misión Sentinel. Para elaborar la estructura de información geoespacial se buscó data del Sentinel-2 la cual provee imágenes con buena resolución de la cobertura glaciar, se descargaron todas las imágenes satelitales necesarias con respecto a los

glaciares y años correspondientes a ser estudiados, los cuales fueron después almacenadas para su posterior análisis. En este proceso de búsqueda de información la plataforma nos permite descargar imágenes en diferentes combinaciones de bandas siendo una de ellas el SWIR el cual nos identifica la cobertura glaciar, además complementario a ello se descargó la imagen raster del NDSI, información que nos permitió generar de manera rápida la cobertura glaciar por cada año de estudio.

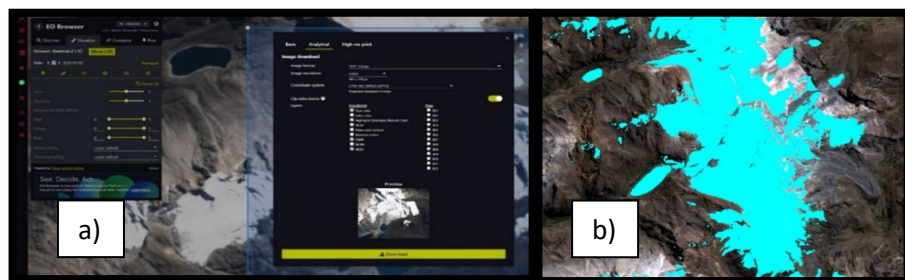


Figura 3. En la imagen a) se observa el proceso de búsqueda y descarga de imagen satelital de la plataforma EO Browser, mientras que en la imagen b) se aprecia la combinación de bandas SWIR.

La imagen NDSI y/o SWIR, se realizó la clasificación automática, obteniendo así el área glaciar para los periodos de estudio, este procesamiento de datos se generó en la plataforma de sistema de información geográfica, obteniendo así los polígonos de áreas glaciares respectivamente.

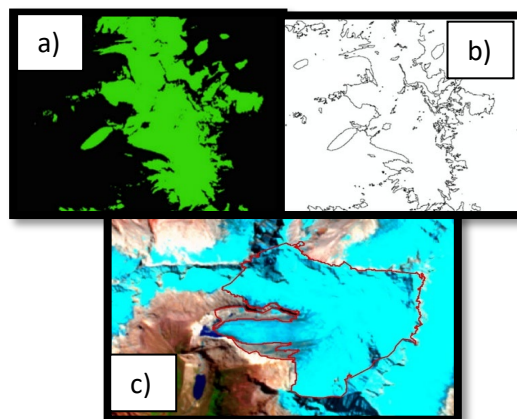


Figura 4. Se aprecia el proceso de obtención de la cobertura de glaciares en formato vectorial (b), mientras que en la imagen a) se aprecia la obtención de información mediante la clasificación automática de información y en la imagen c) se observa el área glaciar depurado.

Para la segmentación de los polígonos se usó como base la información vectorial del INAIGEM publicado en el geoportal (<https://visor.inaigem.gob.pe>).

Para las áreas de estudio, se posee ortofotografías que nos brinda mayor información respecto a las dimensiones y extensiones de los glaciares, mediante la cual se realizó la digitalización de manera visual de los datos, los cuales complementarán la información geoespacial obtenida con imagen satelital Sentinel-2, definiendo mejor el área glaciar en la zona de fusión glaciar.

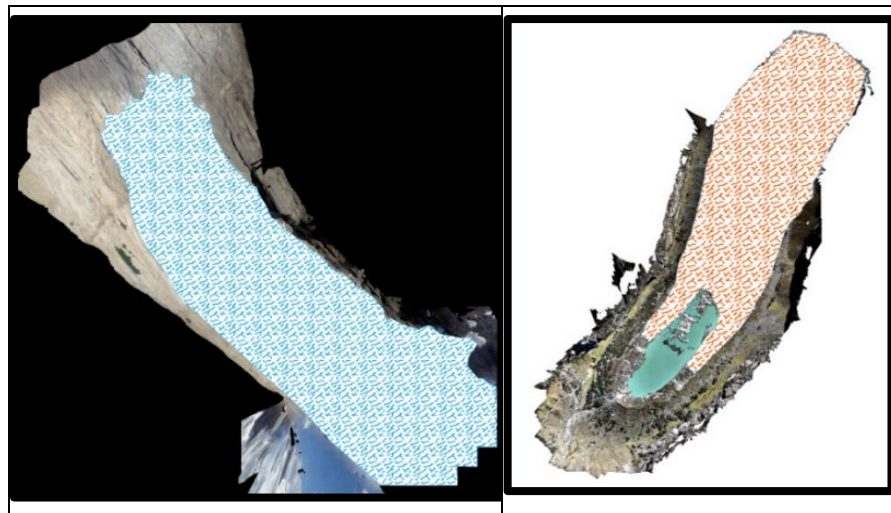


Figura 5. Digitalización de las áreas glaciares según registro fotogramétrico realizado.

4.2.2. Georreferenciación de información Raster

El proceso de georreferenciación se realizó el posicionamiento de la información ráster en base a un año patrón, este proceso se realiza con el objetivo de poseer el menor sesgo de error espacial en x, y. La georreferenciación se realizó en base al uso de sistema de información geográfica mediante la identificación de puntos en común en las áreas de no movimiento, este proceso se realiza debido al desplazamiento que se genera en el procesamiento fotogramétrico. El producto final tendrá una similitud espacial entre los periodos de estudio y así evitar iteraciones excesivas en el proceso de co-registro.



Figura 6. Georreferenciación de los productos fotogramétricos, en la figura a) se muestra la ortofoto patrón del año 2019, mientras que la figura b) muestra la información del periodo 2022 donde se aprecia el desplazamiento del marcador verde evidenciando así el desplazamiento de la información, mientras que en la figura c) se muestra la información 2024 posicionado donde se aprecia el marcado verde correctamente ubicado.

4.3. Corrección del modelo digital de terreno

La corrección del DEM, es empleado para el balance de masa a nivel de todo el glaciar, que contempla la zona de ablación y acumulación, este proceso de reconstrucción se realiza para obtener datos de la zona de acumulación debido que la información fotogramétrica, no abarca todo el sistema glaciar por las limitaciones de la tecnología RPAS. Para mejorar la información general (DEM), se realizó en 2 etapas: Etapa 1) análisis de la zona de no movimiento, donde la información proporcionada por CONIDA que corresponde al DEM de SPOT, debería tener la misma altitud respecto al DSM del INAIGEM que se trabajó para el año 2018, para mejorar la precisión en vertical se realizó el ajuste mediante el corregistro, tomando como patrón base la zona de no movimiento de la ortofotografía.

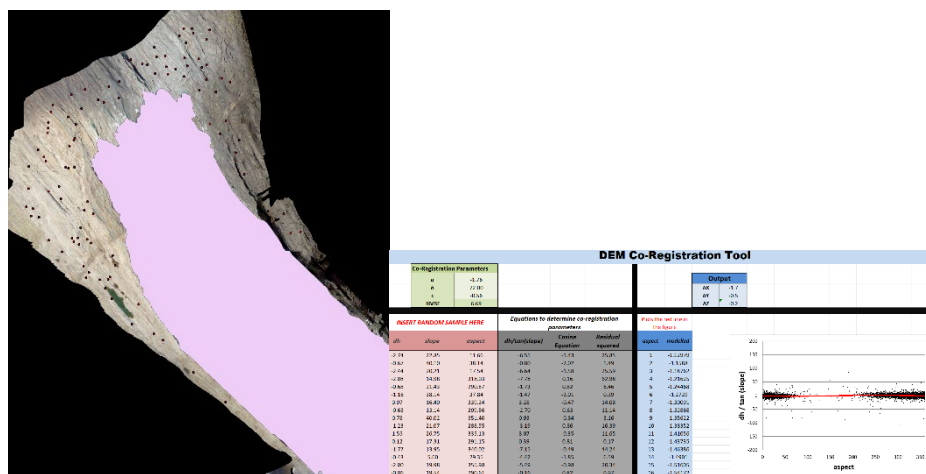


Figura 7. En la imagen de la izquierda se muestra el randomizado de puntos en la zona de no movimiento (izquierda), mientras que en la derecha se aprecia el proceso de co-registro.

En esta etapa, se logró disminuir el sesgo de error en planimetría de x: -10.3, y: 3.6 y z: -4.4 a un total de error de x: -1.7, y: -0.5, z: -0.2, esto en el co-registro 2. Con ello determinando que los valores en zona de movimiento lleguen a 0.

Etapa 2) En esta etapa se realizó el ajuste de la zona glaciar en base al registro de los valores altitudinales del DSM, mediante el co-registro como en la etapa 1, donde se simulará que la zona glaciar es el área de no movimiento, para obtener resultados del sector glaciar.

Para el caso de estudio se usará el DEM SPOT7 proporcionado por la CONIDA de 5 metros de resolución espacial, que será trabajado en base a la información del DSM obtenido con tecnología RPAS.

4.4. Co-registro

Es usado para posicionar espacialmente dos modelos digitales de terreno (siglas en inglés DEM) o superficie, cuando se identifican incongruencias espaciales de la misma área de interés, donde los dos DEM o DSM no poseen una alineación perfecta en horizontal como en vertical. El co-registro analiza el desplazamiento espacial en relación con la pendiente y orientación del terreno. Es así que cualquier desplazamiento en el plano horizontal y vertical existente entre dos Modelos de Elevación Digital (DEM) utilizados para calcular un balance de masa geodésico puede resultar en sesgos o desvíos en las diferencias de elevación entre los mismos en función de la orientación y la pendiente (Nuth & Kääb, 2011). El proceso de co-registro está basado en la relación de la diferencia de elevación (dh) respecto a la pendiente del terreno (α) y la orientación (Ψ), el cual es representado mediante la siguiente fórmula:

$$\frac{dh}{\tan \tan \alpha} = a * \cos \cos (b - \Psi) + c$$

Donde:

$$c = \frac{d_h}{\tan \tan \alpha}$$

“a” es la magnitud de desplazamiento, “b” es la dirección del vector de desplazamiento y “c” es el sesgo de elevación media dividido por la tangente de la pendiente media de la muestra (Figura 3).

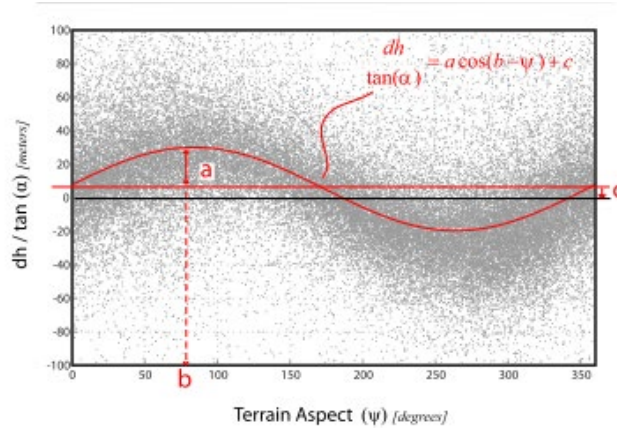


Figura 8. Ilustración de la ecuación en relación a (dh , α y Ψ).

Nota. Fuente (Nuth & Kääb, 2011, p. 5).

La información de entrada (dh , α y Ψ) proviene del área que no sufre variaciones en los dos periodos de análisis (zona de no movimiento, fuera del área glaciar), el cual posee información variable de la pendiente y orientación.

4.5. Balance de masa

La cuantificación del balance de masa para el área de estudio fue desarrollada mediante la Ecuación 1, que consiste en la diferencia de los dos DSM correspondiente al periodo de estudio. Este cambio de elevación es transformado a cambio de volumen que puede ser ganancia o pérdida. Para esta conversión es necesario conocer la densidad promedio ρ , tamaño de píxel r , cambio de superficie Δh_n y el promedio del área de estudio S , los cuales figuran en la Ecuación 1.

$$B_{geod}(Mes1-mes2) = \frac{\rho \times r^2 \times \sum_{i=1}^n \Delta h_n}{S}$$

Ecuación 1. Balance geodésico, para la estimación de la pérdida de masa glaciar.

Donde:

ρ = Densidad promedio de cambio de volumen.

r = Tamaño de píxel.

Δh_n = Cambio en la superficie de elevación por cada pixel.

n = Número de píxeles que cubren el glaciar en estudio

S = Área promedio de los glaciares durante el periodo de estudio (mes de agosto – mes de noviembre)

V. RESULTADOS

Los resultados serán mostrados en 2 nivel de análisis; (1) en forma puntual se analizarán los cambios en la zona de registro de información con tecnología RPAS y (2) el análisis de manera más general a nivel de todo el glaciar en base a la reconstrucción del DEM, teniendo como base el DEM SPOT 7 de la CONIDA.

5.1. Análisis de cambios de manera puntual.

5.1.1. Co-registro

El proceso de corrección de información se desarrolló para los periodos del 2019 al 2022, para el estudio se considera como año patrón al periodo 2022, respecto al cual se corrigió la información del periodo 2020, haciendo el uso del co-registro propuesto por (Nuth & Kääb, 2011); en este caso se realizó el co-registro mediante programación, siguiendo las siguientes líneas de código (*dem_align.py DEM_REF_for_ASP.tif DEM_20030713.tif -slope_lim 0.5 30 -mask glaciers -outdir coreg_SRTM_ASTER2003_5*), mediante la cual se realizó la corrección planimétrica y se redujo el sesgo de error en vertical (z), considerando la zona de no movimiento como se describe en el capítulo 4.4.

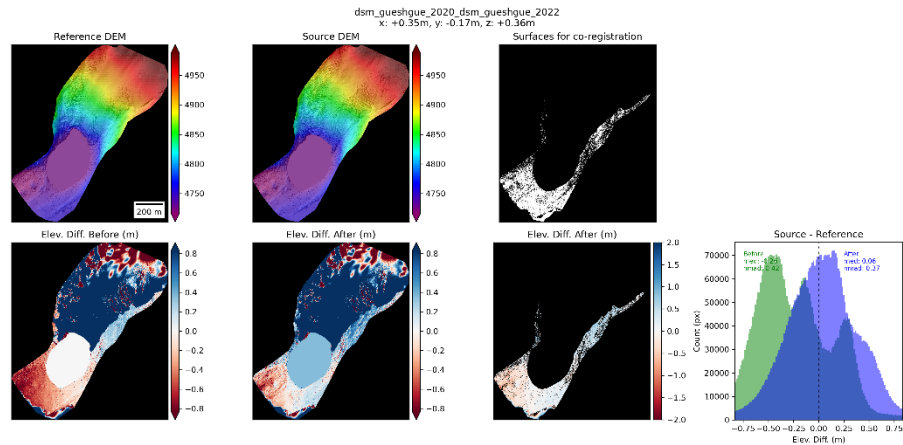


Figura 9. En la imagen se muestra el co-registro (ajuste planimétrico) de la información raster del periodo 2022.

5.1.2. Estimación de pérdida de volumen Glaciar

Una vez realizada la corrección del DSM mediante el co-registro, la información es analizada para los periodos del 2020 - 2022, obteniendo los siguientes resultados.

Gueshgue (zona de ablación) 2019 -2022	
$\rho =$	0.87 gr cm ⁻³
$r =$	0.04 m ²
$\sum \Delta h_n =$	-36915625.9 m
$\Delta V = r^2 \times \sum_{i=1}^n \Delta h_n$	-1476625.04 m ³ hielo
m3 agua	-1284663.782 m ³
$s =$	403104.454 m ²

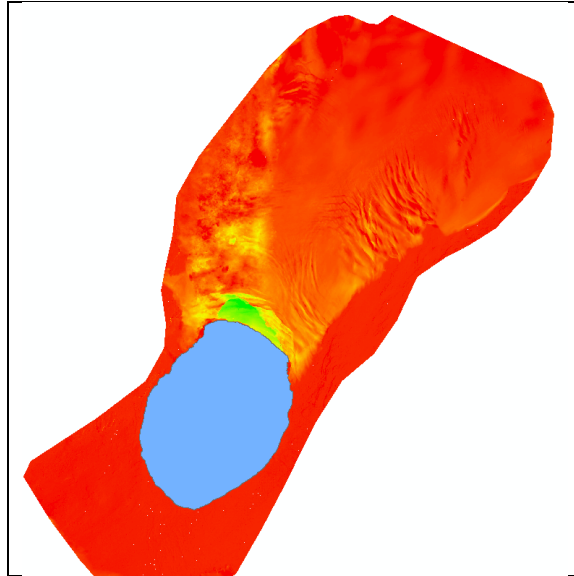


Figura 10. En la imagen se aprecia la pérdida de espesor glaciar en el periodo 2020 – 2022 QUE corresponde a 2 años de análisis.

En el periodo de análisis del 2020 al 2022, el glaciar Gueshgue perdió un volumen de $-1\,476\,625.04\text{ m}^3$ de hielo, lo cual equivale a $-1\,284\,663.782\text{ m}^3$ de agua, en el periodo de estudio no se presenta ganancia en el área de estudio, lo cual representa una gran pérdida de masa glaciar.

La mayor pérdida de masa glaciar se evidencia en la parte frontal, donde el glaciar se encuentra en contacto con la laguna de formación, en este sector se presentó más de 50 metros de pérdida de espesor glaciar, dando así origen a la laguna que aún se encuentra en contacto con la masa de hielo.

5.2. Análisis a nivel general del Glaciar Gueshgue

El análisis se realizó teniendo como insumo el DEM SPOT que se reconstruyó en base a la información fotogramétrica que se posee de la zona de fusión, para lo cual se analizó la pérdida de área glaciar, generando así DEM para el periodo 2020 y 2022, para este proceso se realizó el co-registro de la información del año 2020 usando como patrón el periodo 2022 patrón, mediante la cual se corrigieron los DEMS.

5.2.1. Periodo de análisis 2020-2022

En el estudio desarrollado para el periodo de análisis, correspondiente al periodo en mención, se realizó el ajuste de la información DEM SPOT, en base al análisis de la variación de espesor glaciar en el periodo 2020-2022, respecto al cual se generó la ecuación lineal de ajuste. Haciendo el uso de la ecuación lineal, se corrigió el DEM SPOT, logrando un nivel de ajuste con R2 de 0.93. EL cual nos indica que los valores de altitud respecto a las cuotas poseen una relación.

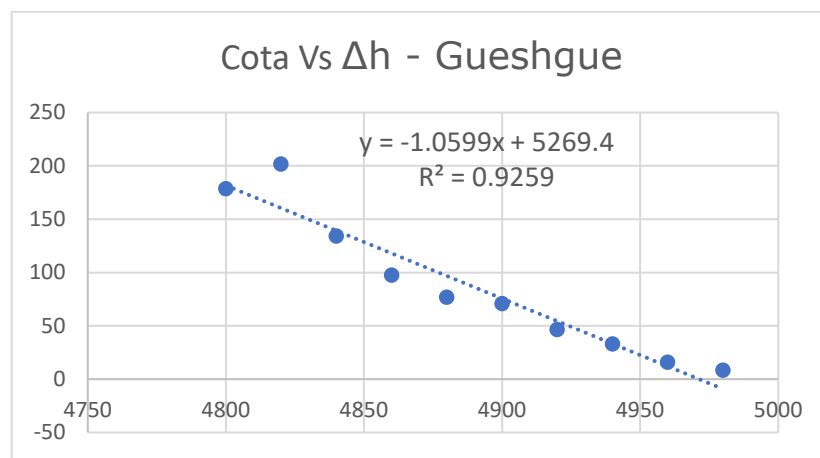


Figura 11. Generación de la ecuación lineal en base al análisis de cotas respecto a la variación del espesor glaciar.

Según los datos obtenidos, en base a la reconstrucción de la Δh , considerando la ecuación de la Figura 11, se obtuvo que en la cuota de 4980 es donde la masa glaciar empieza a ganar volumen mediante la acumulación

Tabla 1. Reconstrucción de variación de espesor en función a las cuotas.

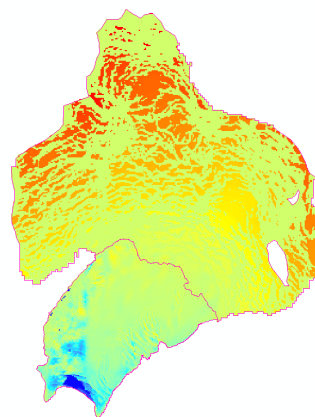
Cota	Δh	Δh reconstruido	Δh reconstruido - ZA
4800	178.572396	181.88	
4820	201.506153	160.682	
4840	134.042543	139.484	
4860	97.3555182	118.286	
4880	76.695368	97.088	
4900	70.594188	75.89	
4920	46.3338525	54.692	

4940	32.9330219	33.494	
4960	15.68647	12.296	
4980	8.30809073	-8.902	-0.4451

Una vez realizado el análisis, de la variación de espesor glaciar en la zona de fusión, se procede a analizar a nivel de todo el glaciar, para comprender cual es la dinámica propia, para ello a los valores de la zona de acumulación se realizará la multiplicación por una constante de 0.05, para que así se ajuste el modelo a los patrones de acumulación que fueron mencionados por estudios anteriores como los desarrollados por el INAIGEM, (2023) que identificó que en el pozo 1 se encontró una acumulación de 4 metros y en el pozo 2, se identificó la acumulación de 0.9 m. En el estudio sobre los Métodos de observación de glaciares en los Andes Tropicales, realizado por Francou et al., 1995, mencionan que la acumulación registrada sobre los 5000 msnm corresponde a 1000 mm (1 m), en base a estaciones meteorológicas instaladas en el Artesonraju. Así mismo, en el año 2024 en la expedición realizada por el INAIGEM en el glaciar Gueshgue se registró una acumulación de 0.5 metros, lo cual esto puede ir incrementándose conforme a la altitud del glaciar,

Para el presente estudio se consideró la densidad de 0.53 para la nieve y para el glaciar de 0.87 gr/cm³. Estos valores deberán ser registrados en estudios de medición directa en campañas de campo.

Gueshgue 2020-2022		
ZONA DE FUSIÓN		
$\rho =$	0.87	gr cm ⁻³
$r =$	25	m ²
$\sum \Delta h_n =$	-59991.29	m
$\Delta V = r^2 \times \sum_{i=1}^n \Delta h_n$	-1499782.25	m ³ hielo
m3 agua	-1304810.558	m ³
ZONA DE ACUMULACION		
$\rho =$	0.53	gr cm ⁻³
$r =$	25	m ²
$\sum \Delta h_n =$	230122.849	m
$\Delta V = r^2 \times \sum_{i=1}^n \Delta h_n$	5753071.23	m ³ hielo
m3 agua	3049127.75	m ³



El proceso de reconstrucción de la zona de acumulación del glaciar Guehgue no dio buenos resultados, con ello reafirmando que el método Geodésico debe ser complementado con el método directo en las zonas de acumulación y/o en su defecto realizar estos estudios en base a información aérea en cooperación con la CONIDA para obtener modelos de elevación digital de toda el área de estudio, no obstante para el análisis de pérdida de espesor glaciar en la zona de fusión el método geodésico empleando tecnología RPAS brinda buenos resultados.

En la zona de acumulación se debe usar el método clásico de especialización de datos, para obtener la acumulación total del área. La pérdida de volumen glaciar en la zona de fusión corresponde a -1 304 810.558m³ de agua, el cual corresponde a un área de 366137.179 m². Mientras que el área de acumulación (1237974.130 m²) se identificó una ganancia de 3 049 127.75

m³ de agua, estos resultados reflejan a una ganancia del sistema glaciar de 1 744 317.192 m³ de agua en toda el área glaciar en 2 años de estudio.

VI. CONCLUSIÓN

- Para mejorar el estudio glaciológico, tanto por el método directo como por el indirecto, es crucial complementar ambas metodologías. El método indirecto ofrece resultados excelentes en áreas con cobertura aérea o satelital. Sin embargo, en zonas sin datos disponibles, es necesario recurrir a la medición directa. De esta forma, se pueden obtener datos específicos y luego combinarlos con los obtenidos por métodos indirectos. Además, para estudios de balance de masa glaciar, se requieren datos de campo como la densidad del hielo y la nieve. Estos datos son esenciales para obtener resultados más precisos en el análisis y los cálculos.
- En el estudio realizado en el glaciar Gueshgue, se utilizaron datos previos, y se considera necesario realizar trabajos fotogramétricos para períodos posteriores. Esto permitirá comprender la pérdida de masa glaciar tanto en la zona de fusión como a nivel del sistema glaciar completo. Los resultados preliminares, basados en dos años de análisis, indican que el glaciar perdió -1 284 663.782 m³ de agua únicamente en la zona de fusión, que abarca un área de 366,137.179 m².

VII. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Francou, B., & Pouyaud, B. (2004). Métodos de observación de glaciares en los Andes Tropicales. Mediciones de terreno y procesamiento de datos. *Great Ice, IRD*, 1(May). <https://doi.org/10.13140/RG.2.1.4220.8164>

Francou, B., Ribstein, P., Saravia, R., & Tiriau, E. (1995). Monthly balance and water discharge of an inter-tropical glacier: Zongo Glacier, Cordillera Real, Bolivia, 16°S. *Journal of Glaciology*, 41(137), 61–67.

<https://doi.org/10.1017/S0022143000017767>

INAIGEM. (2023). BALANCE DE MASA DEL GLACIAR HUILLCA PERIODO HIDROLOGICO SET 2022 - OCT 2023. In *Informe*.

Instituto Nacional de Investigación en Glaciares y Ecosistemas de Montaña. (2023). *Inventario Nacional de Glaciares y Lagunas de Origen Glaciar 2023*.

<https://doi.org/10.36580/inaigem.document17>

Nuth, C., & Kääb, A. (2011). Co-registration and bias corrections of satellite elevation data sets for quantifying glacier thickness change. *The Cryosphere*, 5, 271 - 290, 5(1), 271–290. <https://doi.org/10.5194/tc-5-271-2011>