

DIRECCIÓN DE INVESTIGACIÓN EN GLACIARES
SUBDIRECCIÓN DE INVESTIGACIÓN GLACIOLÓGICA

INFORME DEL BALANCE DE MASA DEL GLACIAR HUILLCA POR MÉTODO GEODÉSICO 2018-2024

Provincia de Huaylas, Áncash



PERÚ

Ministerio
del Ambiente



INAIGEM

INSTITUTO NACIONAL DE
INVESTIGACIÓN EN GLACIARES Y
ECOSISTEMAS DE MONTAÑA

Título: INFORME DEL BALANCE DE MASA DEL GLACIAR HUILLCA POR MÉTODO GEODÉSICO
2018-2024
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° 2025-07231

INDICE

<i>I. INTRODUCCIÓN</i>	5
<i>II. OBJETIVOS</i>	6
<i>III. ÁREA DE ESTUDIO</i>	6
<i>IV. METODOLOGÍA</i>	7
4.1. Generación del Modelo digital de Superficie.....	7
4.2. Generación de cartografía base	7
4.2.1. Obtención de área Glaciar.....	7
4.2.2. Georreferenciación de información Raster.....	10
4.3. Corrección del modelo digital de terreno	10
4.4. Co-registro.....	12
4.5. Balance de masa.....	13
<i>V. RESULTADOS</i>	13
5.1. Análisis de cambios de manera puntual.	14
5.1.1. Co-registro.....	14
5.1.2. Estimación de pérdida de volumen Glaciar	14
5.2. Análisis a nivel del Glaciar Huilca	16
5.2.1. Periodo de análisis 2018-2022	16
5.2.2. Periodo de análisis 2018 – 2024.....	18
<i>VI. CONCLUSION</i>	22
<i>VII. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS</i>	24

Lista de figuras

Figura 1. Secuencia para la obtención del DSM y ortofotografía, haciendo uso del software fotogramétrico.	6
Figura 2. Resultados esperados mediante la secuencia de obtención de productos (a) DSM y (b) Ortofotografía	6
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.	7
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.	7
Figura 5. Digitalización de las áreas glaciares según registro fotogramétrico realizado.	8
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.	9
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.	9
Figura 8. Ilustración de la ecuación en relación a (dh , α y Ψ).	11
Figura 9. En las imágenes se muestran, a la izquierda, co-registro del periodo 2022 y derecha el co-registro del periodo 2024	12
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)	13
Figura 11. Generación de la ecuación lineal en base al análisis de cotas respecto a la variación del espesor glaciar.	14
Figura 12. Identificación del ELA, en base a las curvas de nivel obtenidos con el DEM SPOT, donde nos brinda la ubicación del ELA, lo cual tiene relación con la visualización de la zona de acumulación en campo registrado en la expedición realizada.	18
Figura 13. Como se aprecia en la fotografía de campo, el SLA se encuentra aproximadamente a la cota señalada, en base a la referencia de la saliente de roca que se visualiza en el círculo amarillo que repite al igual en la imagen satelital.	18
Figura 14. Análisis de la relación entre pérdida de espesor vs cota y la obtención de la ecuación, para la reconstrucción del DEM, en base a la variación de pérdida de espesor por rango altitudinal.	19
Figura 15. Análisis de la variación de volumen del glaciar Huillca durante el periodo 2018-2024.	20

Lista de ecuaciones

Ecuación 1. Balance geodésico, para la estimación de la pérdida de masa glaciar.	11
--	----

Lista de Mapa

Mapa 1. Ubicación del área de estudio.	5
--	---

Lista de tabla

Tabla 1. Análisis de la variación de espesor glaciar, respecto a las cotas del DEM SPOT.	15
Tabla 2. Datos analizados en base a la información de pérdida de espesor del glaciar (Δh) en la zona de fusión para el periodo 2018 – 2024 y el reconstruido para el periodo 2024.	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 Instituto Nacional de Investigación en Glaciares y Ecosistemas de Montaña (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.

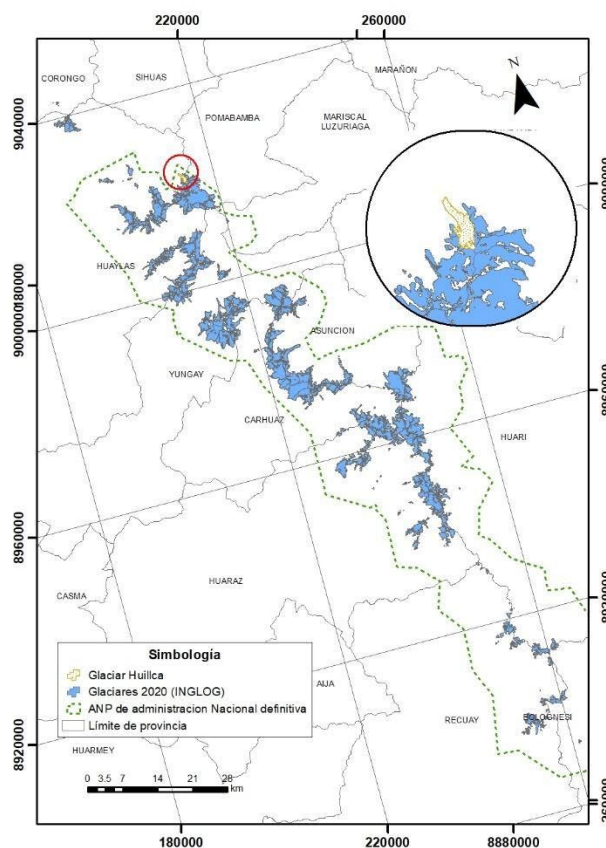
Para analizar el comportamiento y los cambios de los glaciares a consecuencia del cambio climático, el INAIGEM realiza estudios en el glaciar con el método directo el cual consta de medición topográfica por el método convencional, instalación de una red de balizas y medición de pozos de acumulación. Mediante este método se estima el balance de masa realizando interpolaciones con los datos colectados de la red de las balizas instaladas 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 Huilca 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 de agua de fusión del glaciar Huillca, durante el periodo de estudio 2018- 2024.
- Analizar la pérdida del área glaciar durante el periodo 2018-2024.

III. ÁREA DE ESTUDIO

El glaciar Huillca, ubicado en la cordillera Blanca en las coordenadas $08^{\circ}49'55.85''S$ y $77^{\circ}36'20.70''W$, cuyas aguas drenan hacia la cuenca del Quitaraca para luego desembocar en el Pacífico. Políticamente se ubica en el Departamento de Ancash, provincia de Huaylas distrito de Yuracmarca. El flujo que proviene del glaciar Huillca es de importancia para la central hidroeléctrica de Quitaraca.



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.

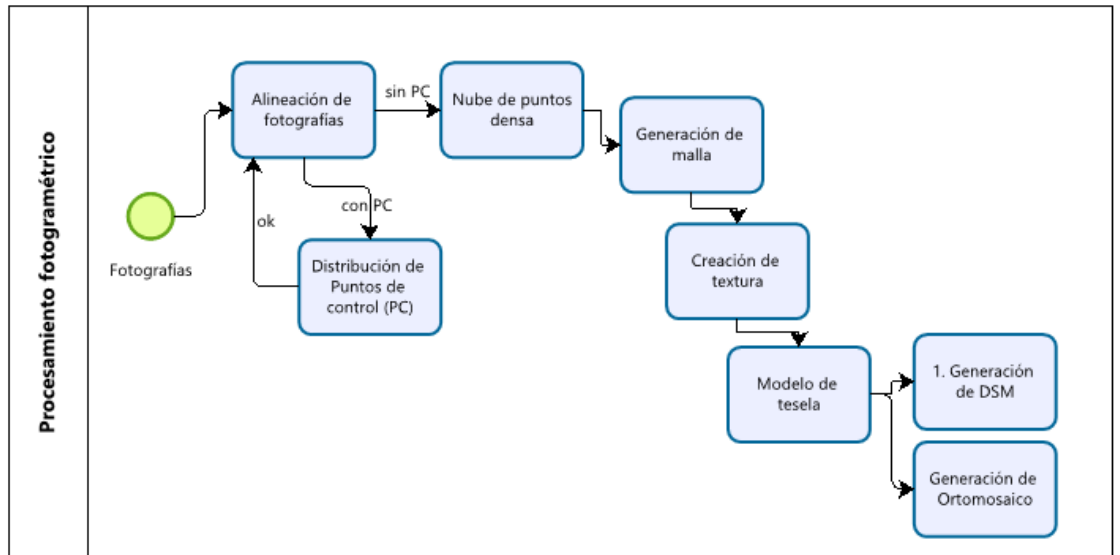


Figura 1. Secuencia para la obtención del DSM y ortofotografía, haciendo uso del software fotogramétrico.

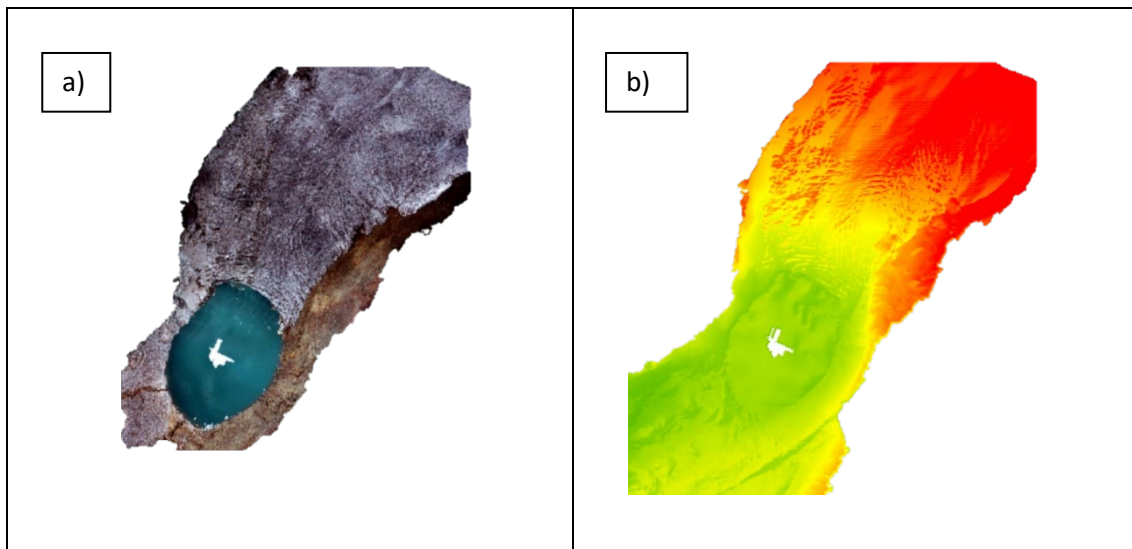


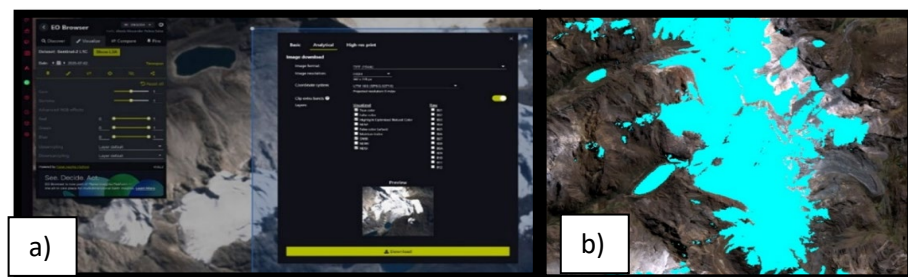
Figura 2. Resultados esperados mediante la secuencia de obtención de productos (a) DSM y (b) Ortofotografía

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 glaciaria, 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



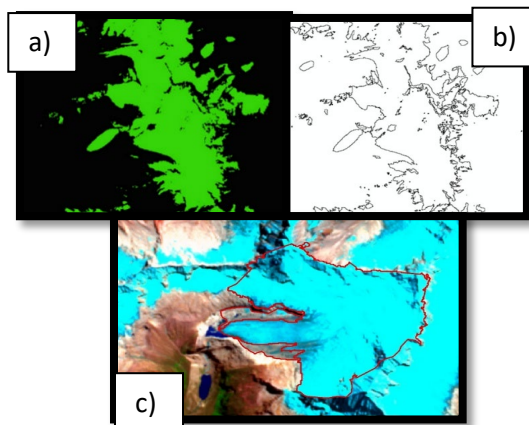
de información la plataforma nos permite descargar imágenes en diferentes combinaciones de bandas siendo una de ellas el SWIR el cual nos identifica la cobertura glaciaria, además complementario a ello se descargó la imagen raster del NDSI, información que nos permitió generar de manera rápida la cobertura glaciaria 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 glaciaria para los periodos de estudio, este

procesamiento de datos se generó con el uso del 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 la imagen a) se aprecia la obtención de información mediante la clasificación automática de información, mientras que en la imagen b) se aprecia la conversión de información raster a vectorial 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 imágenes de satélite sentinel 2, definiendo mejor el área glaciar en la zona de fusión glaciar.

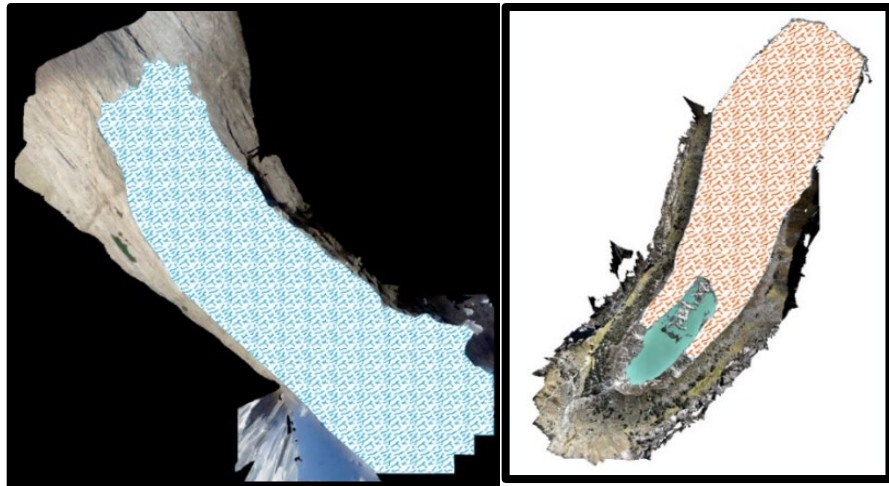


Figura 5. Digitalización de las áreas glaciares según registro fotogramétrico realizado.

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, esto 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 interacciones excesivas en el proceso de co-registro.



Figura 6. Georreferenciación de los productos fotogramétricos, en la figura a) s 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.

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

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 :

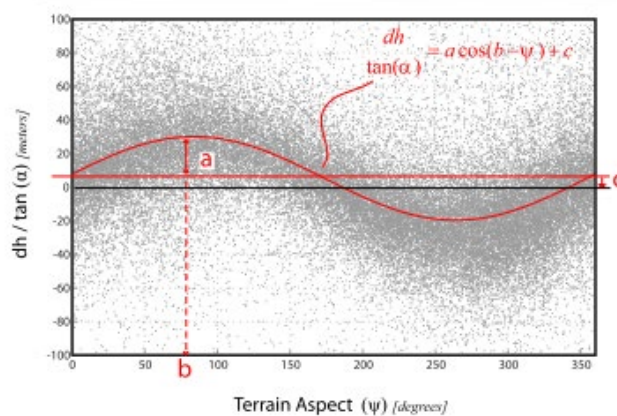
$$\frac{dh}{\tan \alpha} = a * \cos \cos (b - \Psi) + c$$

Donde:

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

“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 píxel.

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)

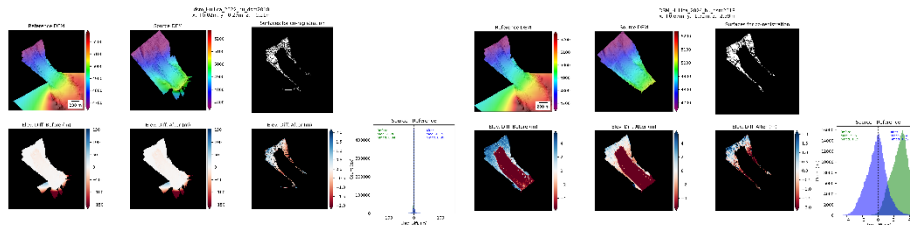
V. RESULTADOS

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 2018 al 2024, para el estudio se considera como año patrón al periodo 2018, respecto al cual se corrigió la información de los periodos 2024 y 2022, 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 las imágenes se muestran, a la izquierda, co-registro del periodo 2022 y derecha el co-registro del periodo 2024

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 2018 - 2022 y 2018 - 2024, obteniendo los siguientes resultados.

Huillca (zona de ablación) 2018 -2022	Huillca (zona de ablación) 2018 -2024
$\rho =$ 0.87 gr cm ⁻³	$\rho =$ 0.87 gr cm ⁻³
$r =$ 0.49 m ²	$r =$ 0.49 m ²
$\Sigma\Delta h_n =$ -3345014.7 m	$\Sigma\Delta h_n =$ -8462013.84 m
$S =$ 349961.66 m ²	$S =$ 340778.9919 m ²
$\Delta V = r^2 \times \sum_{i=1}^n \Delta h_n$ -1639057.2 m ³ hielo	$\Delta V = r^2 \times \sum_{i=1}^n \Delta h_n$ -4146386.78 m ³ hielo

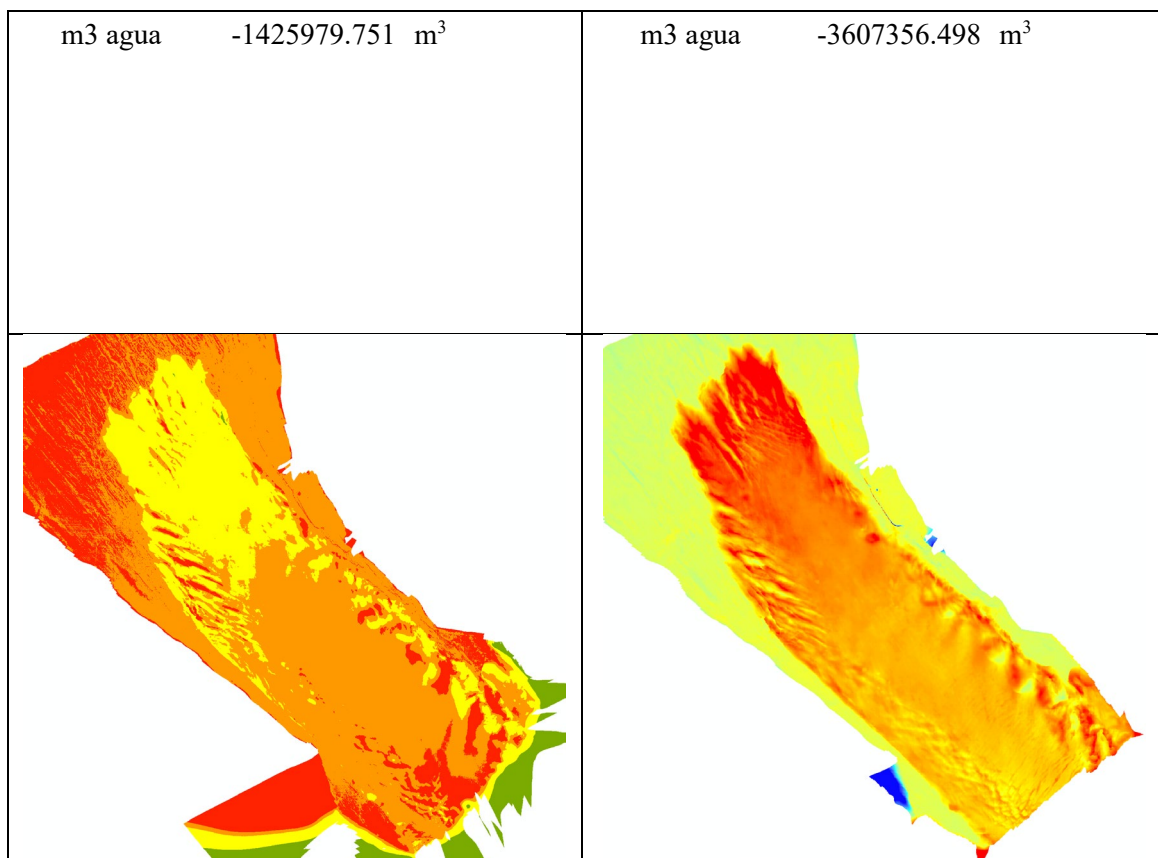


Figura 10. En la imagen izquierda se aprecia la pérdida de espesor glaciar en el periodo 2018 – 2022 4 años de análisis, mientras que en la figura de la derecha se muestran los resultados del periodo 2018 – 2024 (6 años de análisis)

En el periodo de análisis del 2018 al 2022, el glaciar Huillca perdió un volumen de -1639057.2 m^3 de hielo, lo cual equivale a -2910162.8 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.

Esta misma tendencia se presenta para 6 años de estudio, donde la pérdida de volumen glaciar fue mayor con un total de $-4\,146\,386.78 \text{ m}^3$ de hielo equivalente a $-3\,607\,356.498 \text{ m}^3$ de agua. La mayor pérdida de masa glaciar se presentó en los último 2 años del 2022 al 2024, donde se experimentó la pérdida de masa de hielo de más de 5 veces con una pérdida de volumen de $-5\,785\,443.98 \text{ m}^3$ de hielo en solo 2 años, lo que nos da un indicativo de que los glaciares en los últimos periodos vienen experimentando un acelerado retroceso glaciar y pérdida de su volumen, los cuales influyen en el almacenamiento del recurso en estado sólido y a un futuro de la extinción del glaciar.

5.2. Análisis a nivel del Glaciar Huillca

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 2018, 2022 y 2024, para este proceso se realizó el co-registro de la información para el periodo 2018 el cual fue el patrón, mediante la cual se corrigieron los DEMS para los períodos siguientes.

5.2.1. Periodo de análisis 2018-2022

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 2018-2022, respecto al cual se generó la siguiente ecuación lineal de ajuste, mediante la cual se realizó la corrección del DEM SPOT, logrando un nivel de ajuste con R^2 de 0.88.

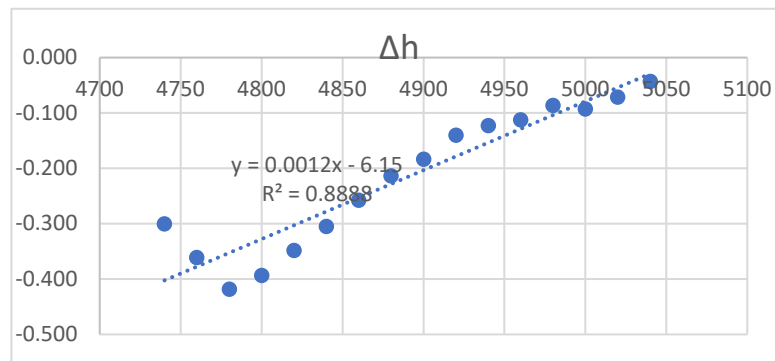


Figura 11. Generación de la ecuación lineal en base al análisis de cotas respecto a la variación del espesor glaciar.

En el análisis se identificó el ELA, a una altitud de 5120 msnm, según la reconstrucción, donde se presenta el menor valor.

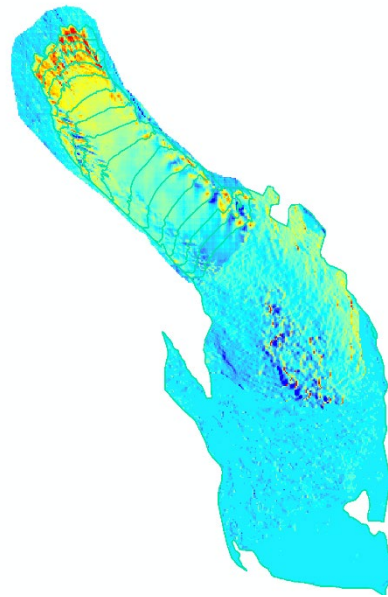
Tabla 1. Análisis de la variación de espesor glaciar, respecto a las cotas del DEM SPOT.

Cota	Δh	Δh reconstruido
4720	-0.043	
4740	-0.301	-0.46
4760	-0.361	-0.44

4780	-0.418	-0.41
4800	-0.393	-0.39
4820	-0.349	-0.37
4840	-0.305	-0.34
4860	-0.258	-0.32
4880	-0.214	-0.29
4900	-0.184	-0.27
4920	-0.140	-0.25
4940	-0.123	-0.22
4960	-0.112	-0.20
4980	-0.087	-0.17
5000	-0.093	-0.15
5020	-0.072	-0.13
5040	-0.043	-0.10
5060		-0.08
5080		-0.05
5100		-0.03
5120	ELA	-0.01

Para el estudio del caso para el periodo 2018-2020, se debe realizar el análisis por rango altitudinal, en base a lo analizado, se obtuvieron los siguientes resultados.

Huillca 2018-2022		
ZONA DE FUSIÓN		
$\rho =$	0.87	gr cm ⁻³
$r =$	25	m ²
$\sum \Delta h_n =$	-67755.879	m
$\Delta V = r^2 \times \sum_{i=1}^n \Delta h_n$	-1693897	m ³ hielo
m3 agua	-1473690.377	m ³
ZONA DE ACUMULACION		
$\rho =$	0.53	gr cm ⁻³
$r =$	25	m ²
$\sum \Delta h_n =$	6530.2544	m
$\Delta V = r^2 \times \sum_{i=1}^n \Delta h_n$	163256.36	m ³ hielo
m3 agua	86525.871	m ³



Durante el periodo de estudio de 4 años, el glaciar perdió un total de -1 530 640.625 m³ de hielo lo cual es equivalente a -1 387 164.506 m³ de agua, durante este periodo se aprecia que el balance del glaciar es negativo, con pérdida de volumen glaciar, lo cual se evidencia en gran medida en el frente glaciar, del cual se posee información fotogramétrica. El análisis fue realizado en un área de 1300818.607 m², de los cuales la zona de fusión es de 756207.68 m² y la zona de acumulación posee un área de 544610.925 m².

5.2.2. Periodo de análisis 2018 – 2024

Para este periodo de estudio, se realizó la reconstrucción del DEM en base a los datos de pérdida de espesor glaciar del periodo 2018 – 2024, para lo cual se obtuvo la ecuación de ajuste para identificar el punto de equilibrio, donde la ganancia y pérdida de glaciar es 0, obteniendo así un coeficiente de R² = 0.6884, el cual nos brinda la información de la aceptación moderada del nivel de análisis entre la Δh promedio y las cotas (rango altitudinal). Para lo cual se obtiene el siguiente resultado.

Tabla 2. Datos analizados en base a la información de pérdida de espesor del glaciar (Δh) en la zona de fusión para el periodo 2018 – 2024 y el reconstruido para el periodo 2024.

Cota	Δh	Δh reconstruido
4720	-24.186862	-33.72
4740	-33.834337	-32.36
4760	-36.875783	-31.01
4780	-33.332071	-29.65
4800	-30.028787	-28.30
4820	-26.931952	-26.95
4840	-26.195593	-25.59
4860	-24.18908	-24.24
4880	-21.116138	-22.88
4900	-19.865679	-21.53
4920	-19.475484	-20.18
4940	-18.29656	-18.82
4960	-17.819352	-17.47
4980		-16.11
5000		-14.76
5020		-13.41
5040		-12.05
5060		-10.70
5080		-9.34
5100		-7.99
5120		-6.64
5140		-5.28
5160		-3.93
5180		-2.57
5200		-1.22
5220	ELA	0.13

Como se aprecia en la tabla, los datos reconstruidos para el periodo 2024, de identifica el valor 0 que está en la cota 5220, el cual sería el ELA donde el glaciar no gana ni pierde, después de ello en cotas superiores el glaciar debería ganar masa siendo el balance para ese sector positivo en comparación para la zona de fusión.

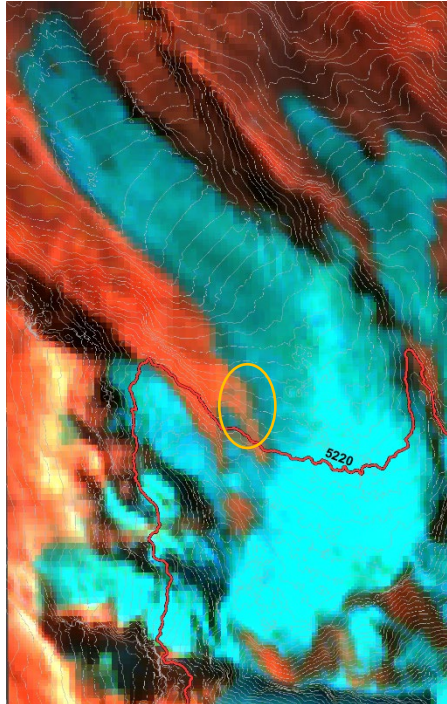


Figura 12. Identificación del ELA, en base a las curvas de nivel obtenidos con el DEM SPOT, donde nos brinda la ubicación del ELA, lo cual tiene relación con la visualización de la zona de acumulación en campo registrado en la expedición realizada.



Figura 13. Como se aprecia en la fotografía de campo, el SLA se encuentra aproximadamente a la cota señalada, en base a la referencia de la saliente de roca que se visualiza en el círculo amarillo que repite al igual en la imagen satelital.

Como se aprecia en la figura 11 y 12, la altitud de la ELA se encuentra en la cota de 5220 msnm, lo cual fue corroborado con las informaciones satelitales y fotográfica que se ubicó en base a referencias, con ello dando severidad al cálculo

realizado mediante la pérdida de espesor glaciar por rango altitudinal, usando como base el DSM obtenido con tecnología RPAS.

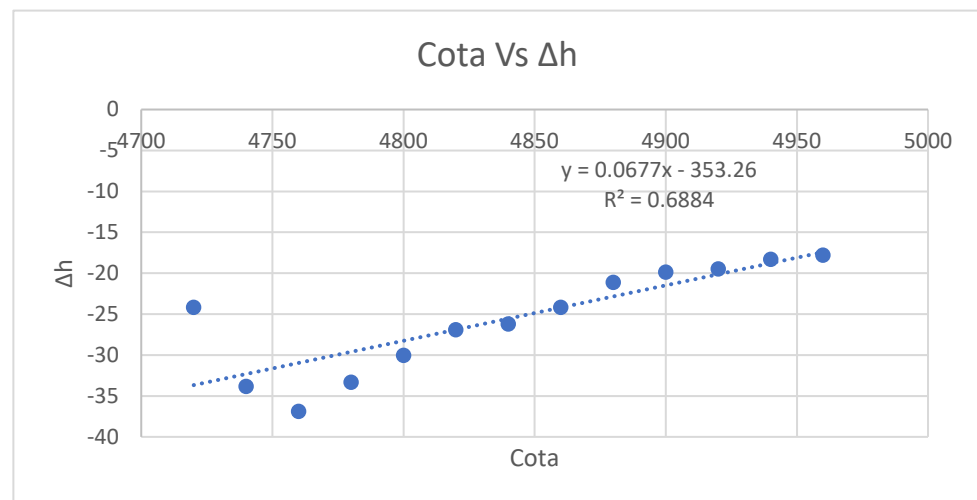


Figura 14. Análisis de la relación entre pérdida de espesor vs cota y la obtención de la ecuación, para la reconstrucción del DEM, en base a la variación de pérdida de espesor por rango altitudinal.

Para ajustar el modelo, en la zona de acumulación se requiere datos de medición de pozos por el método directo, del cual en base al informe del balance de masa del glaciar Huilca periodo hidrológico set 2022 - oct 2023 (INAIGEM, 2023), se 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.

Por lo antes mencionado, en el glaciar Huilca en base a la ecuación realizada en la figura 13, en la zona de acumulación se posee una sobre estimación, para lo cual se realizó el ajuste en base a una constante de 0.05, para poseer valores próximos a los registrados en Guehsgue, obteniendo así la acumulación por pixel en respuesta a la cota, el cual se representa en la figura 14.

Densidad promedio para el presente estudio se considera 0.53, según los resultados obtenidos en la expedición del año 2022, se recomienda para estudios futuros, realizar el estudio de densidad de nieve para generar el cálculo con los datos obtenido.

HUILLCA 2018-2024

ZONA DE FUSIÓN	
$\rho =$	0.87 gr cm ⁻³
$r =$	25 m ²
$\sum \Delta h_n =$	-268679.06 m
$\Delta V = r^2 \times \sum_{i=1}^n \Delta h_n$	-6716976.5 m ³ hielo
m ³ agua	-5843769.58 m ³
ZONA DE ACUMULACION	
$\rho =$	0.53 gr cm ⁻³
$r =$	25 m ²
$\sum \Delta h_n =$	1819.70954 m
$\Delta V = r^2 \times \sum_{i=1}^n \Delta h_n$	45492.7385 m ³ hielo
m ³ agua	24111.151 m ³

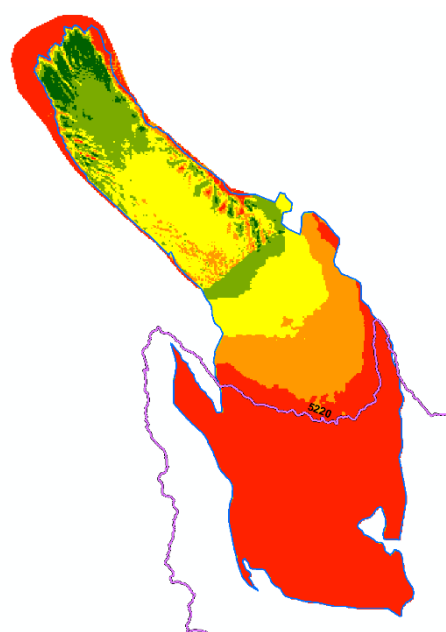


Figura 15. Análisis de la variación de volumen del glaciar Huillca durante el periodo 2018-2024.

Analizando, los datos en el glaciar Huillca en forma general se posee una pérdida de masa, lo cual representa -6 671 483.79 m³ de hielo lo cual representado en equivalente de agua es de -5 819 658.428 m³ equivalente de agua. Esto nos muestra que el glaciar se encuentra en un balance negativo donde la pérdida es mayor que la ganancia como se aprecia en el cuadro.

VI. CONCLUSION

- En base al análisis del glaciar Huillca, ya sea con análisis de mayor resolución y otro a una resolución más grande, este glaciar durante el periodo de estudio del 2018 al 2024 en 6 años experimentó un gran retroceso glaciar lo cual se manifiesta en la pérdida de volumen glaciar que es de -6 671 483.79 m³ de

hielo a nivel general y de manera focalizada perdió únicamente en la zona de fusión de $-5\,819\,658.428\text{ m}^3$ hielo, siendo este una de las pérdidas de volumen más significativa, lo cual se evidenció en el estudio desarrollado in-situ, este estudio contribuirá para estimar la pérdida en el tiempo del recurso hídrico, mediante la cual se pueden tomar las medidas respectivas de adaptación y/o otros que sea necesario.

- En base al análisis realizado, se tuvo que realizar la reconstrucción del DEM SPOT, lo cual debería ser evaluado en base a otros patrones. Para mejorar el análisis se recomienda realizar el estudio mixto, con topografía del frente glaciar que corresponde a la zona de fusión glaciar y la zona de acumulación se debe de realizar mediante posos de acumulación para conocer la ganancia del glaciar como la densidad de la misma.

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>