

**UNIVERSIDAD NACIONAL  
“SANTIAGO ANTÚNEZ DE MAYOLO”  
FACULTAD DE CIENCIAS DEL AMBIENTE  
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA AMBIENTAL**



**“INFLUENCIA DE LA TEMPERATURA Y LA PRECIPITACIÓN EN  
EL BALANCE DE MASA GLACIAR EN LA CORDILLERA BLANCA,  
1962 - 2020”**

**TESIS PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE  
INGENIERO AMBIENTAL**

**AUTOR:**

**Br. EDY PETER LEON CHAVEZ**

**ASESOR:**

**MSc. RICARDO RAY VILLANUEVA RAMÍREZ**

**MSc. EDWIN ANIBAL LOARTE CADENAS**

**Huaraz, Ancash, Perú**

**2023**





"Año del Fortalecimiento de la Soberanía Nacional"

## ACTA DE SUSTENTACIÓN Y DEFENSA DE TESIS

Los miembros del Jurado Evaluador de Tesis, en pleno que suscriben, reunidos a los ocho días del mes de noviembre del dos mil veintidós, en el Auditorium de la Facultad de Ciencias del Ambiente (FCAM) de la Universidad Nacional Santiago Antúnez de Mayolo (UNASAM), de conformidad a la normatividad vigente condujeron el acto académico público de sustentación y defensa de la tesis **"INFLUENCIA DE LA TEMPERATURA Y LA PRECIPITACIÓN EN EL BALANCE DE MASA GLACIAR EN LA CORDILLERA BLANCA, 1962-2020"** que presentó **LEON CHAVEZ EDY PETER** para optar el **Título Profesional de Ingeniero Ambiental**.

Después de haber atendido la sustentación y defensa oral, y haber escuchado las respuestas a las preguntas y observaciones formuladas, la declaramos:

**APROBADO**

Con el calificativo de: **DIECISÉIS (16)**

En consecuencia, **LEON CHAVEZ EDY PETER** queda expedito para que el Consejo de Facultad de la Facultad de Ciencias del Ambiente de la Universidad Nacional "Santiago Antúnez de Mayolo" apruebe el otorgamiento de su **Título Profesional de Ingeniero Ambiental** de conformidad al Art. 113 numeral 113.9 del Reglamento General de la UNASAM (Resolución de Consejo Universitario N° 399-2015-UNASAM), el Art. 48° y 4ta. disposición complementaria del Reglamento General de Grados y Títulos de la UNASAM, y el Art. 160° del Reglamento de Gestión de la Programación, Ejecución y Control de las Actividades Académicas (Resolución de Consejo Universitario - Rector N° 232-2017-UNASAM).

Huaraz, 8 de noviembre de 2022

**Dr. PEDRO LIBERATO VALLADARES JARA**  
Presidente  
Jurado de sustentación

**Dr. ALFREDO WALTER REYES NOLASCO**  
Primer miembro  
Jurado de sustentación

**Ing. FRANCISCO CLAUDIO LEÓN HUERTA**  
Segundo miembro  
Jurado de sustentación

**MSc. RICARDO RAY VILLANUEVA RAMÍREZ**  
Asesor de tesista

**MSc. EDWIN ANIBAL LOARTE CADENAS**  
Asesor de tesista



## DEDICATORIA

En memoria de mi abuelo, por todas sus enseñanzas, su cariño y consejo lleno de sabiduría y amor de padre que me diste y sé que siempre estas presente acompañándome en esta bella travesía.

A mi madre, por su amor y apoyo incondicional, quien forjó en mí valores de responsabilidad y respeto. Pilar fundamental en mi formación personal y profesional que me permite contribuir en la sustentabilidad del planeta.

A mi compañera de vida, Elizabeth Rodríguez, por su amor, apoyo, confianza, respeto, admiración y aliento en todo momento.

Edy Peter Leon Chavez

## AGRADECIMIENTOS

Al Ing. Ricardo Ray Villanueva Ramírez, por su asesoría durante el desarrollo del presente trabajo de investigación con sus valiosas orientaciones y recomendaciones.

A mi co-asesor Edwin Loarte, por su disposición para absolver mis dudas, apoyo constante y, además, por permitirme conocer y trabajar con investigadores nacionales e internacionales.

A mis amigos, Alberto Castañeda y Alexzander Santiago, por su apoyo desinteresado en diferentes actividades durante el desarrollo de la presente investigación.

A Kyung In Huh y Bryan G. Mark por proporcionar las fotografías aéreas de los glaciares de Artesonraju, Llaca y Gueshgue de 1962.

A la Universidad Nacional “Santiago Antúnez de Mayolo”, a la Facultad de Ciencias del Ambiente y especialmente a todos los docentes de la Escuela Profesional de Ingeniería Ambiental por el conocimiento y las experiencias compartidas, a mis jurados evaluadores (Pedro, Francisco y Alfredo) mis más sinceros agradecimientos.

Al Instituto Nacional de Investigación en Glaciares y Ecosistemas de Montaña (INAIGEM) por promover y fomentar la investigación en el país, dando soporte científico, logístico y humano, a los nuevos y futuros científicos del país.

Esta investigación ha sido financiada por el Concytec/ProCiencia, la Embajada Británica, el NERC y el Fondo Newton-Paulet en el marco de la convocatoria E031-2018-01-NERC “Círculos de Investigación en Glaciares”. [Contrato N°08-2019-FONDECYT], proyecto “Peruvian Glacier Retreat and its Impact on Water Security - Peru GROWS”.

## RESUMEN

Los glaciares son excelentes indicadores del cambio climático debido a su alta sensibilidad a las variaciones en el régimen de las precipitaciones e incremento de la temperatura. Esto se refleja en el balance de masa glaciar, siendo positivo cuando hay ganancia de masa y negativo cuando hay pérdida. En este sentido, el objetivo de la investigación fue determinar la influencia de la temperatura y la precipitación en el balance de masa glaciar en la cordillera Blanca entre 1962 y 2020.

Se estudiaron las unidades hidrográficas Llullán, Quillcay y Yanayacu, situadas en la vertiente occidental de la cordillera Blanca. El área glaciar fue determinada mediante el NDSI a partir de imágenes Landsat (5TM y 8 OLI). El balance de masa glaciar, entre 2000 y 2020, fue estimado a partir de los DEM SRTM y ASTER mediante el método geodésico. De manera similar se procedió para estimar el área y balance de masa glaciar para toda la cordillera Blanca. Para el caso del glaciar Gueshgue, el DEM fue reconstruido a partir de fotografías aéreas (1962) e imágenes RPAS (2020) aplicando técnicas de fotogrametría, para posteriormente estimar el balance de masa.

Los resultados muestran que entre 1962 y 2020, el retroceso glaciar en las unidades hidrográficas Llullán, Quillcay y Yanayacu fue de 12.164 km<sup>2</sup> (64%), 17.238 km<sup>2</sup> (63%) y 11.391 km<sup>2</sup> (32%), respectivamente. En cambio, la cordillera Blanca perdió 327.056 km<sup>2</sup> (56%), durante el mismo periodo. El balance de masa glaciar estimado para las unidades hidrográficas, entre 2000 y 2020, fue de  $-1.086 \pm 0.035$  m w.e.a<sup>-1</sup>,  $0.52 \pm 0.029$  m w.e.a<sup>-1</sup> y  $-0.532 \pm 0.007$  m w.e.a<sup>-1</sup>, respectivamente, mientras que para la cordillera Blanca fue  $-0.60 \pm 0.058$  m w.e.a<sup>-1</sup>. De manera particular, también se estimó el balance de masa para el glaciar Gueshgue (U.H. Yanayacu) entre 1962 y 2020, siendo de  $-1.949$  m w.e.a<sup>-1</sup>.

El comportamiento de la temperatura superficial del mar (Niño 3.4) y la precipitación (cordillera Blanca) explican el 39% y 36% del balance de masa glaciar en la cordillera Blanca, respectivamente. La investigación contribuye con conocimientos que permiten una mejor comprensión de las respuestas de los glaciares al clima cambiante (temperatura y precipitación) y su impacto en la disponibilidad de los recursos hídricos.

**Palabras clave:** balance de masa, retroceso glaciar, temperatura (TSM 3.4), precipitación y cordillera Blanca.

## ABSTRACT

Glaciers are excellent indicators of climate change due to their high sensitivity to variations in precipitation regime and temperature increase. This is reflected in the glacier mass balance, being positive when there is mass gain and negative when there is mass loss. In this sense, the objective of the research was to determine the influence of temperature and precipitation on the glacier mass balance in the Cordillera Blanca between 1962 and 2020.

The Lullán, Quillcay and Yanayacu hydrographic units, located on the western slope of the Cordillera Blanca, were studied. The glacier area was determined using NDSI from Landsat images (5TM and 8 OLI). The glacier mass balance, between 2000 and 2020, was estimated from SRTM and ASTER DEMs using the geodetic method. Similarly, we proceeded to estimate the area and balance of glacier mass for the entire Cordillera Blanca. For the case of the Gueshgue glacier, the DEM was reconstructed from aerial photographs (1962) and RPAS images (2020) applying photogrammetry techniques, to later estimate the mass balance.

The results show that between 1962 and 2020, the glacier retreat in the Lullán, Quillcay and Yanayacu hydrographic units was 12,164 km<sup>2</sup> (64%), 17,238 km<sup>2</sup> (63%) and 11,391 km<sup>2</sup> (32%), respectively. In contrast, the Cordillera Blanca lost 327,056 km<sup>2</sup> (56%) during the same period. The estimated glacial mass balance for hydrographic units, between 2000 and 2020, was  $-1.086 \pm 0.035$  m w.e.a<sup>-1</sup>,  $0.52 \pm 0.029$  m w.e.a<sup>-1</sup> and  $-0.532 \pm 0.007$  m w.e.a<sup>-1</sup>, respectively, while for the Cordillera Blanca it was  $-0.60 \pm 0.058$  m w.e.a<sup>-1</sup>. In particular, the mass balance for the Gueshgue glacier (U.H. Yanayacu) was also estimated between 1962 and 2020, being  $-1,949$  m w.e.a<sup>-1</sup>.

The behavior of sea surface temperature (Niño 3.4) and precipitation (Cordillera Blanca) explain 39% and 36% of the glacier mass balance in the Cordillera Blanca, respectively. The research contributes knowledge that allows a better understanding of glacier responses to changing climate (temperature and precipitation) and their impact on the availability of water resources.

**Key words:** Mass balance, glacial retreat, temperature (SST 3.4), precipitation and Cordillera Blanca.

## ÍNDICE

<b>CONTENIDO</b>	<b>Pág.</b>
<b>ACTA DE SUSTENTACIÓN</b>	<b>i</b>
<b>DEDICATORIA</b>	<b>ii</b>
<b>AGRADECIMIENTOS</b>	<b>iii</b>
<b>RESUMEN</b>	<b>iv</b>
<b>ABSTRACT</b>	<b>v</b>
<b>LISTA DE FIGURAS</b>	<b>ix</b>
<b>LISTA DE ACRÓNIMOS</b>	<b>xii</b>
<b>CAPÍTULO I</b>	
<b>INTRODUCCIÓN</b>	<b>1</b>
1.1. Planteamiento y formulación del problema	1
1.2. Objetivos	4
1.3. Hipótesis	4
1.4. Variables	5
1.5. Definición operacional	5
<b>CAPÍTULO II</b>	
<b>MARCO TEÓRICO</b>	<b>6</b>
2.1. Antecedentes	6
2.2. Bases teóricas	9
2.3. Definición de términos	23
<b>CAPÍTULO III</b>	
<b>MARCO METODOLÓGICO</b>	<b>25</b>
3.1. Tipo de investigación	25
3.2. Diseño de la investigación	25
3.3. Métodos o técnicas	25
	<b>vi</b>

3.4. Población y muestra	48
3.5. Técnicas e instrumentos de recolección de datos	48
3.6. Procesamiento y análisis estadístico de la información	50
<b>CAPÍTULO IV</b>	
<b>RESULTADOS</b>	<b>51</b>
4.1. Área glaciar	51
4.2. Balance de masa glaciar	53
4.3. Comportamiento de la temperatura y precipitación	80
4.4. Balance de masa glaciar con la temperatura y precipitación	90
<b>CAPÍTULO V</b>	
<b>DISCUSIÓN DE RESULTADOS</b>	<b>95</b>
5.1. Cambios de área glaciar	95
5.2. Dinámica del balance de masa glaciar	95
5.3. Influencia de la temperatura y precipitación en el balance	100
<b>CAPÍTULO VI</b>	
<b>CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES</b>	<b>102</b>
6.1. Conclusiones	102
6.2. Recomendaciones	103
<b>REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b>	<b>104</b>
<b>ANEXOS</b>	<b>112</b>
ANEXO 1 Matriz de consistencia	113
ANEXO 2 Metadata de modelos de elevación digital	115
ANEXO 3 Variación de volumen en las unidades hidrográfica	117
ANEXO 4 Variación de volumen por zonas en la cordillera Blanca	121
ANEXO 5 Balance de masa glaciar por zona	126
ANEXO 6 Temperatura y precipitación	129

## LISTA DE TABLAS

Tabla 1	<i>Definición operacional de variables</i>	5
Tabla 2	<i>Ubicación política de las unidades hidrográficas</i>	21
Tabla 3	<i>Datos de levantamiento del glaciar Gueshgue 1962</i>	29
Tabla 4	<i>Error cuadrático medio de puntos de apoyo del glaciar Gueshgue 1962</i>	29
Tabla 5	<i>Puntos de apoyo del glaciar Gueshgue 1962</i>	29
Tabla 6	<i>Datos de levantamiento del glaciar Artesonraju 1962</i>	31
Tabla 7	<i>Error cuadrático medio de puntos de apoyo del glaciar Artesonraju</i>	31
Tabla 8	<i>Puntos de apoyo del glaciar Artesonraju 1962</i>	32
Tabla 9	<i>Datos de levantamiento del glaciar Gueshgue 2020</i>	33
Tabla 10	<i>Error cuadrático medio de puntos de apoyo del glaciar Gueshgue 2020</i>	33
Tabla 11	<i>Puntos de apoyo del glaciar Gueshgue 2020</i>	34
Tabla 12	<i>Resultados de los diferentes desplazamientos</i>	37
Tabla 13	<i>Variación del balance de masa y errores</i>	44
Tabla 14	<i>Técnicas e instrumentos de recolección de datos</i>	49
Tabla 15	<i>Área glaciar para la Cordillera Blanca y unidades hidrográficas</i>	51
Tabla 16	<i>Datos de corrección para el desplazamiento</i>	53
Tabla 17	<i>Balance de masa Gueshgue 10m</i>	55
Tabla 18	<i>Balance de masa de los glaciares de Artesonraju y Yanamarey</i>	56
Tabla 19	<i>Balance de masa glaciar en las unidades hidrográficas</i>	61
Tabla 20	<i>Resultados de los diferentes desplazamientos por zonas</i>	78
Tabla 21	<i>Balance de masa glaciar de la Cordillera Blanca</i>	79
Tabla 22	<i>Estadística descriptiva de la temperatura de reanálisis</i>	83
Tabla 23	<i>Coefficiente de determinación de Pearson de temperatura</i>	83
Tabla 24	<i>Estadística descriptiva de la temperatura en los glaciares</i>	84
Tabla 25	<i>Pruebas de homogeneidad de la temperatura de ERA5 2m</i>	86
Tabla 26	<i>Pruebas de homogeneidad de la temperatura en los glaciares</i>	87
Tabla 27	<i>Prueba de Mann - Kendall de temperatura ERA5 2m</i>	87
Tabla 28	<i>Estadística descriptiva de la precipitación</i>	88
Tabla 29	<i>Pruebas de homogeneidad de la precipitación</i>	89
Tabla 30	<i>Coefficientes de determinación (Pearson) de precipitación</i>	90
Tabla 31	<i>Tendencia de Mann-Kendall de precipitación</i>	90

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1	<i>Partes de un glaciar y zonas circundantes</i>	10
Figura 2	<i>Diferencias de elevación inducidas por el desplazamiento del DEM</i>	15
Figura 3	<i>Vista de la ecuación que relaciona la <math>dh</math>, <math>\alpha</math> y <math>\omega</math></i>	16
Figura 4	<i>Ubicación de las unidades hidrográficas dentro de la cuenca del Santa</i>	22
Figura 5	<i>Diagrama general de la investigación</i>	26
Figura 6	<i>Escenas en combinación de banda 6,5 y 4 de Landsat 8</i>	27
Figura 7	<i>Mosaico de imágenes satelitales Landsat 8 del 2016</i>	28
Figura 8	<i>Resultados de la clasificación de glaciares.</i>	28
Figura 9	<i>Posiciones de puntos de apoyo y estimaciones de errores</i>	30
Figura 10	<i>Modelo digital de elevación del glaciar Gueshgue 1962</i>	30
Figura 11	<i>Posiciones de puntos de apoyo y estimaciones de errores</i>	31
Figura 12	<i>Modelo digital de elevación del glaciar Artesonraju 1962</i>	32
Figura 13	<i>Posiciones de cámaras y solapamiento de imágenes</i>	33
Figura 14	<i>Posiciones de puntos de apoyo y estimaciones de errores</i>	34
Figura 15	<i>Modelo digital de elevación del glaciar Gueshgue 2020</i>	35
Figura 16	<i>Herramienta de trabajo creado para ArcGis.</i>	38
Figura 17	<i>Flujo de trabajo en ModelBuilder del balance de masa glaciar</i>	39
Figura 18	<i>Diferencia de altura del periodo 2016 – 2010</i>	39
Figura 19	<i>Flujo y clasificación en base a la desviación estándar</i>	40
Figura 20	<i>Diferencia de altura en áreas glaciares</i>	41
Figura 21	<i>Determinación de errores sistemático y aleatorio</i>	42
Figura 22	<i>Diferencia de altura periodo 2020-2016</i>	43
Figura 23	<i>Mapa de sombra de la diferencia de altura de 2020-2016</i>	43
Figura 24	<i>Enmascaramiento de errores</i>	44
Figura 25	<i>Enmascaramiento en base a las proporciones de desviación estándar</i>	46
Figura 26	<i>Elección del enmascaramiento más apropiado</i>	47
Figura 27	<i>Área glaciar para la Cordillera Blanca.</i>	52
Figura 28	<i>Área glaciar de las unidades hidrográficas.</i>	52
Figura 29	<i>Dispersión de las diferencias de elevación entre DEMs.</i>	53
Figura 30	<i>Glaciar Gueshgue de 1962 y 2020</i>	55
Figura 31	<i>Glaciar Artesonraju de 1962</i>	56

Figura 32	<i>Balance de masa en el glaciar Yanamarey</i>	57
Figura 33	<i>Balance de masa en el glaciar Artesonraju</i>	57
Figura 34	<i>Variación de volumen de 2000-2020 en la unidad hidrográfica de Llullán</i>	58
Figura 35	<i>Variación de volumen de 2000-2020 en la unidad hidrográfica de Quillcay</i>	59
Figura 36	<i>Variación de volumen de 2000-2020 en la unidad hidrográfica de Yanayacu</i>	60
Figura 37	<i>Balance de masa en las unidades hidrográficas</i>	62
Figura 38	<i>Zonas de trabajo en la Cordillera Blanca</i>	63
Figura 39	<i>Dispersión de las diferencias de elevación entre DEMs de la Zona 1</i>	64
Figura 40	<i>Dispersión de las diferencias de elevación entre DEMs de la Zona 2</i>	65
Figura 41	<i>Dispersión de las diferencias de elevación entre DEMs de la Zona 3</i>	66
Figura 42	<i>Dispersión de las diferencias de elevación entre DEMs de la Zona 4</i>	67
Figura 43	<i>Dispersión de las diferencias de elevación entre DEMs de la Zona 5</i>	68
Figura 44	<i>Dispersión de las diferencias de elevación entre DEMs de la Zona 6</i>	69
Figura 45	<i>Dispersión de las diferencias de elevación entre DEMs de la Zona 7</i>	70
Figura 46	<i>Variación de Volumen de 2000-2020 en la Zona 1</i>	71
Figura 47	<i>Variación de Volumen de 2000-2020 en la Zona 2</i>	72
Figura 48	<i>Variación de Volumen de 2000-2020 en la Zona 3</i>	73
Figura 49	<i>Variación de Volumen de 2000-2020 en la Zona 4</i>	74
Figura 50	<i>Variación de Volumen de 2000-2020 en la Zona 5</i>	75
Figura 51	<i>Variación de Volumen de 2000-2020 en la Zona 6</i>	76
Figura 52	<i>Variación de Volumen de 2000-2020 en la Zona 7</i>	77
Figura 53	<i>Balance de masa en la Cordillera Blanca</i>	79
Figura 54	<i>Balance de masa anual en la Cordillera Blanca</i>	80
Figura 55	<i>Temperatura de la superficie del mar (SST)</i>	81
Figura 56	<i>Anomalías de la temperatura superficial del mar</i>	81
Figura 57	<i>Temperatura de reanálisis</i>	82
Figura 58	<i>Comportamiento de la Temperatura con referencia a la estación de Recuay</i>	82
Figura 59	<i>Correlación de la Temperatura entre ERA5 2m a la estación de Recuay</i>	84
Figura 60	<i>Temperatura en la Cordillera Blanca</i>	85
Figura 61	<i>Precipitación de las estaciones meteorológicas en la Cordillera Blanca</i>	88
Figura 62	<i>Precipitación estimada en glaciares de la Cordillera Blanca</i>	89
Figura 63	<i>Correlación del balance de masa con el Niño 3.4 SST</i>	91
Figura 64	<i>Correlación del balance de masa con la anomalía 3.4</i>	91

Figura 65	<i>Correlación del balance de masa anual con el Niño 3.4 SST</i>	92
Figura 66	<i>Correlación del balance de masa anual con la anomalía 3.4</i>	92
Figura 67	<i>Correlación del balance de masa con ERA5 2m Tmin</i>	93
Figura 68	<i>Correlación del balance de masa anual con ERA5 2m Tmin</i>	93
Figura 69	<i>Correlación del balance de masa con la precipitación</i>	94
Figura 70	<i>Balance de masa geodésico y glaciológico (WGMS) del glaciar Artesonraju</i>	96
Figura 71	<i>Balance de masa geodésico y glaciológico (WGMS) del glaciar Yanamarey</i>	97
Figura 72	<i>Balance de masa en distintos tiempos en las unidades hidrográficas</i>	98
Figura 73	<i>Balance de masa en las cordilleras nevadas</i>	99

## LISTA DE UNIDADES DE MEDIDA

DENOMINACIÓN	UNIDAD DE MEDIDA	ABREVIATURA
Temperatura	Celsius	(°C)
Precipitación	Milímetro	(mm)

## LISTA DE ACRÓNIMOS

SIGLA	DENOMINACIÓN
MDE/DEM	Modelos Digitales de Elevación/Digital Elevation Model
MDS/DSM	Modelo Digital de la Superficie/Digital Surface Model
MDT/DTM	Modelos Digitales del Terreno/Digital Terrain Model
ENOS/ENSO	El Niño Oscilación del Sur/El Niño Southern Oscillation.
NDSI	Índice de Nieve de Diferencia Normalizada/Normalized Difference Snow Index
RPA	Aeronave Pilotada a Distancia
RPAS	Sistema de Aeronave Pilotada a Distancia
RSME	Error cuadrático medio
GEE	Google Earth Engine
SfM	Estructura desde el movimiento/Structure from Motion
SIG/GIS	Sistemas de Información Geográfica/Geographic Information Systems
SLA	La altitud de la Línea de Nieve/Snowline Altitude
TSM/SST	Temperatura de la Superficie del Mar/Sea Surface Temperature

# CAPÍTULO I

## INTRODUCCIÓN

### 1.1. Planteamiento y formulación del problema

En los últimos decenios, el calentamiento global incrementado por el crecimiento industrial ha provocado diversos efectos, como la reducción de la extensión de la criosfera (IPCC, 2019). Consecuentemente, el cambio climático tiene un impacto especialmente significativo en la pérdida de extensión y volumen de la masa de hielo en las regiones montañosas, los glaciares al ser sistemas muy sensibles a las variaciones climáticas como la precipitación, la temperatura y la humedad atmosférica (Veettil et al. 2017) y relaciones principalmente con la variabilidad climática local-regional.

Actualmente los glaciares están perdiendo masa y cubierta de hielo en todas partes de los Andes tropicales, debido a que vienen experimentando tasas de calentamiento por encima del promedio global (Veettil, et al. 2019) y es mucho más pronunciado en los pequeños glaciares de baja altitud que no tienen una zona de acumulación permanente y que podrían desaparecer en los próximos años/décadas (Rabatel. et al. 2013). Rabatel (2012) sostiene que la variación de la temperatura superficial del Océano Pacífico es el principal factor que rige sobre la variabilidad del balance de masa sobre los glaciares de Bolivia, Ecuador y Colombia.

Las características importantes del clima de las cordilleras peruanas son las estaciones seca y húmeda bien marcadas. Las precipitaciones en esta región son principalmente controlados por la disponibilidad y el transporte de vapor de agua de

la cuenca del Amazonas, el comportamiento del Océano Pacífico (Falvey & Garreaud, 2005). Los diferentes estudios muestran un mayor calentamiento a mayores elevaciones y un aumento de la variabilidad de la temperatura interanual para escenarios con mayor calentamiento global (Urrutia & Vuille, 2009).

En general, la precipitación anual está disminuyendo y las temperaturas máximas y mínimas anuales están aumentando (Vuille. et al. 2000). Por otro lado, el aumento de la temperatura ambiental genera menor precipitación sólida y predomina la precipitación líquida, lo cual reduce la capacidad del glaciar para recuperar (ganar masa) y se espera un balance de masa negativo con el pasar del tiempo. Por tanto, a medida que aumenta la temperatura se espera mayor derretimiento glaciar y un balance de masa más negativo, consecuentemente, menor disponibilidad hídrica (reserva) en las cabeceras de las unidades hidrográficas.

Las tendencias de la temperatura del aire en la Cordillera Blanca van en aumento, según menciona Schauwecker et al. (2014) entre 1983 y 2012 fueron de  $-0.04$  y  $0.29$  °C por década para  $T$  mín. y  $T$  máx. respectivamente y entre  $0.1$ -  $0.11$  °C/decenio desde 1939. En los últimos 25 años del siglo XX estos valores se han triplicado, llegando a  $0.32$ - $0.34$  °C/decenio (Vuille et al. 2003), del mismo modo la temperatura media se incrementa  $0.26$  °C/decenio (Mark & Seltzer, 2005) y de  $0.092$  °C/año a una altitud de 3000 m.s.n.m. (Racoviteanu et al. 2008) y de acuerdo al reanálisis de la temperatura atmosférica de NOAA-NCEP para los años de 1950 a 2000 a una altitud promedio de 5000 a 6000 m.s.n.m. indica un incremento de  $0.5$  °C (Pouyaud et al. 2005). Todo este incremento podría relacionarse con pérdida de la superficie glaciar a nivel de Perú de 54% entre 1962 y 2016 (INAIGEM, 2018) y en la Cordillera Blanca de 27% en los años de 1970-2003 (ANA, 2014).

En un futuro incierto, el desequilibrio de la masa de los glaciares de la Cordillera Blanca podría generar el retroceso parcial o la desaparición por completo de los glaciares en las diferentes unidades hidrográficas, con consecuencias directas e indirectas a las poblaciones locales y actividades económicas. Es probable que el cambio de la escorrentía en la estación seca afecte la disponibilidad de agua potable, producción de energía hidroeléctrica, minería, la agricultura y la integridad de los

ecosistemas de montaña. El número de conflictos en la población aguas abajo será cada vez mayor por el aumento en la demanda de agua, a la vez la población está expuesta a peligros de origen glaciar, como la formación de nuevas lagunas con grandes volúmenes de agua en terrenos inestables.

Para el caso de la Cordillera Blanca se tienen escasos estudios relacionados con el balance de masa glaciar, debido a la escasez de datos y de redes meteorológicas continuas. Además, las investigaciones que se vienen desarrollando son escasos y puntuales para ciertas unidades hidrográficas o glaciares. Esto limita el conocimiento sobre la respuesta de los glaciares al clima (temperatura y precipitación) y su influencia sobre la dinámica glaciar. Se necesitan observaciones detalladas y sólidas a largo plazo, para poder calibrar y validar modelos de balance de masa y tomar decisiones oportunas por parte de las entidades gestoras del recurso hídrico.

Una alternativa frente a esta realidad es el uso de técnicas de sistemas de información geográfica, teledetección y fotogrametría, que permitan el análisis de fotografías aéreas, imágenes satelitales y modelos de elevación digital y reconstruir las áreas y generar DEMs para estimar balance de masa de glaciar desde 1962 al 2020 en la Cordillera Blanca. Sin embargo, toda esa información es limitada para todo el ámbito de la cordillera, por ello, la presente investigación se centra en las unidades hidrográficas Lullán (Artesonraju), Quillcay (Llaca) y Yanayacu (Gueshgue).

En este sentido, la presente investigación determinó la variación de las áreas en las unidades hidrográficas y la Cordillera Blanca para el periodo comprendido entre 1962 y 2020. El balance de masa glaciar se estimó para el glaciar Gueshgue desde 1962 al 2020, mientras que para las unidades hidrográficas (Lullán, Quillcay y Yanayacu) y la Cordillera Blanca desde 2000 al 2020; finalmente, se analizó la correlación de la temperatura y la precipitación con el balance de masa glaciar.

De esta forma, se comprende mejor la disponibilidad hídrica (glaciares); asimismo proporciona información para las poblaciones, ecosistemas y actividades económicas ubicadas aguas abajo de los glaciares, como también a los diferentes tomadores de decisiones encargadas de desarrollar planes de gestión integral de

recurso hídricos y actividades de adaptación al cambio climático basadas en las reservas de agua existentes.

**a) Formulación del problema**

¿Cómo han influido la temperatura y la precipitación en el balance de masa glaciar en la Cordillera Blanca en el periodo de 1962-2020?

**1.2. Objetivos**

**a) Objetivo general**

Determinar la influencia de la temperatura y la precipitación en el balance de masa glaciar en la Cordillera Blanca, 1962 – 2020.

**b) Objetivos específicos**

- Analizar el retroceso glaciar en las unidades hidrográficas Llullán, Quillcay y Yanayacu y la Cordillera Blanca en el periodo 1962-2020.
- Determinar el balance de masa glaciar por el método geodésico en los glaciares Artesonraju, Llaca y Gueshgue 1962-2020 y unidades hidrográficas Llullán, Quillcay y Yanayacu en el periodo 2000-2020.
- Estimar el balance de masa glaciar por el método geodésico para la Cordillera Blanca en el periodo 2000-2020.
- Analizar la correlación entre la temperatura y precipitación con el balance de masa glaciar en la Cordillera Blanca en el periodo 2000-2020.

**1.3. Hipótesis**

La temperatura y precipitación influyeron directamente en el balance de masa glaciar en la Cordillera Blanca, en el periodo 1962-2020.

## 1.4. Variables

### Independiente

- La temperatura (Estaciones *in situ*, Reanálisis y TSM en zonas de niño).
- La precipitación (Estaciones *in situ* y Reanálisis).

### Dependientes

- Área glaciar
- Balance de masa glaciar

## 1.5. Definición operacional

En Tabla 1 se observa la definición operacional de variables dependientes e independientes, definición, dimensión, indicadores, unidad de medida y métodos de recolección de datos.

**Tabla 1**

*Definición operacional de variables*

Variables	Definición	Dimensión	Indicadores	Unidad de medida	Métodos de recolección de datos
Variables dependientes:	Balance de masa: Masa glaciar en cada periodo de evaluación	Valores de masa glaciar	Equivalente de agua	$m e. a^{-1}$	Diferenciación de modelos de elevación digital
Variables glaciológicas	Área glaciar: Área de la cuenca cubierta por glaciares.	Valores de superficie glaciar	Variación del área glaciar	km <sup>2</sup>	Clasificación de imágenes a través del índice (NDSI)
Variables Independientes:	Temperatura (estaciones <i>in situ</i> , Reanálisis y TSM en zonas de niño) media anual registrada en un año hidrológico.	Valores de temperatura	Temperatura media anual	°C	Procesamiento de datos de estaciones meteorológicas e imágenes satelitales y reanálisis
Variables climáticas	Precipitación total anual registrada en un año hidrológico.	Valores de precipitación	Precipitación total anual	mm	

## CAPÍTULO II

### MARCO TEÓRICO

#### 2.1. Antecedentes

Hugonnet et al. (2021) en la investigación: **Perdida global acelerada de masa de glaciares a principios del siglo XXI**. Utilizo archivos de satélite ASTER para estimar el balance de masa geodésico global, mapeando los cambios de elevación de la superficie de todos los glaciares en la Tierra a alta resolución espacial y temporal, para verificarlos con mediciones independientes de alta precisión. Entre 2000-2019, los glaciares perdieron  $267 \pm 16$  Gt por año, mientras que en latitudes bajas y parte Sur de los Andes fue de  $-0.9 \pm 0.2$  Gt  $a^{-1}$  y  $-20.7 \pm 4.1$  Gt  $a^{-1}$  y a una tasa de cambio de elevación media de  $-0.53 \pm 0.11$  m  $a^{-1}$  y  $-0.84 \pm 0.23$  m  $a^{-1}$ . Los patrones de cambio de masa en muchas regiones son consistentes con cambios decenales en precipitación y temperatura.

Bhattacharya et al. (2021) en la investigación: **La respuesta de los glaciares asiáticos de alta montaña al clima revelada por observaciones satelitales multitemporales desde la década de 1960**. Desarrollaron el análisis de balance de masa multitemporal basada en imágenes de satélite (DEM generados) en las montañas de Asia por el método geodésico, los impulsores climáticos se estimaron con base a la precipitación y temperatura del modelo regional ERA5. Llegando a estimar balances entre  $-0.40 \pm 0.07$  m  $w a^{-1}$  y  $-0.06 \pm 0.07$  m  $w a^{-1}$  en las diferentes regiones, teniendo como control principal de los balances de masa de los glaciares en el norte de Tien Shan ( $r^2 = 0.97$  y  $p = 0.009$ ). Existiendo también fuerte relación con estaciones in situ.



Fyffe et al. (2021) en la investigación: **El balance de energía y masa de los glaciares peruanos**. Desarrolló una evaluación de la sensibilidad del balance de energía y masa en los glaciares de la Cordillera Blanca y la Cordillera Vilcanota, con el modelo de base física Tethys-Chloris, la cual simula los flujos de masa, energía y agua a escala puntual. Llegando a concluir que hay una dependencia de la dinámica y la fase de las precipitaciones en el balance de masa y energía, en cuanto a la sensibilidad, el aumento de la temperatura del aire condujo a mayor ablación, pero este mecanismo no es lo mismo a menores altitudes, en la Cordillera Blanca en general el aumento de la ablación se debe al cambio de fase de precipitación de nieve a lluvia, en cuál reduce el albedo y aumenta la radiación neta de onda corta, junto con un aumento del flujo de calor sensible.

Taylor et al. (2022) en la investigación: **Cambios multidecanales en el área de los glaciares y en el balance de masas en los Andes del sur del Perú**. Emplearon archivos satelitales ASTER, estimó el balance de masa por el método geodésico en la Cordillera Vilcanota, Vilcabamba y Urubamba a nivel regional, evaluaron los controles más importantes para la pérdida de hielo, correlacionando con variables de pérdida de volumen y área con datos topográficos y climáticos.

Determinaron una pérdida total de  $3.18 \pm 0.44$  Gt de hielo entre 2000 y 2020 y estimaciones de balances de masa geodésicas de  $-0.48 \pm 0.07$  m w.e.a<sup>-1</sup>  $-0.405 \pm 0.451$  m w.e.a<sup>-1</sup>  $-0.559 \pm 1.575$  m w.e.a<sup>-1</sup> en las Cordilleras de Vilcanota, Vilcabamba y Urubamba respectivamente. Teniendo una pequeña correlación ( $R = 0,38$ ,  $p < 0,001$ ) entre el cambio de volumen y la elevación, así como la pendiente ( $R = 0,16$ ,  $p < 0,001$ ) y el aspecto ( $R = -0,04$ ,  $p < 0,001$ ).

Uno de los factores claves para la tasa de cambio de la elevación media en la Cordillera Vilcanota es la temperatura; con una correlación significativa entre la temperatura máxima anual y la elevación media ( $R = 0,603$ ,  $p < 0,001$ ). El papel de la precipitación y las heladas en la conducción de la elevación mediana no fue significativo en  $p < 0.01$ . Los glaciares por debajo de las elevaciones de 4.700 m.s.n.m. casi han desaparecido y por encima de 5.500 m.s.n.m. llegando a conservarse.

Seehaus et al. (2019) en la investigación: **Estudio de cambios de los glaciares tropicales en todo el Perú entre 2000 y 2016: balance de masa y fluctuaciones de área**. Desarrolló una evaluación consistente en el análisis temporal de los cambios en el área glaciario y los equilibrios geodésicos de masa, sus variaciones temporales e identificó las relaciones entre fluctuaciones de glaciares, cambios de variables climáticas y parámetros topográficos.

La metodología utilizada para determinar el área glaciario es mediante el índice de nieve de diferencia normalizada (NDSI) y la aplicación de un valor umbral. Los resultados derivados del balance de masa por el método geodésico indican que la pérdida de hielo aumentó entre 2013 y 2016, y estos cambios pueden atribuirse a las intensas actividades de El Niño de 2015/16. Concluyendo que la tasa de cambio depende de la temperatura y precipitación. El cambio en el área de los glaciares es relativa más alta para aquellas que se encuentran en altitudes bajas y pequeñas (Seehaus et al. 2019).

Huh et al. (2017) en la investigación: **Cambios de volumen de los glaciares peruanos tropicales a partir de modelos de elevación digitales multitemporales y escalamiento de área de superficie de volumen**. Desarrolló el mapeo de alta precisión de los cambios en la superficie del glaciario a lo largo del tiempo para estimar directamente los cambios de volumen, lo que permite probar y refinar explícitamente las relaciones de escala entre los cambios en el volumen del glaciario y el área de superficie.

Utilizando una combinación de LiDAR aerotransportado, imágenes de sensores remotos aerotransportados, fotogrametría digital y técnicas geoespaciales para evaluar los cambios en el volumen y el área superficial de seis glaciares en la Cordillera Blanca, Perú, entre 1962 y 2008. El resultado muestra que hay alrededor de un 36 % más de pérdida de volumen en relación con la pérdida esperada solo del área de superficie de estos glaciares individuales. Dado que el error de estimación del volumen muestra un impacto mucho mayor en el aumento del tamaño de los glaciares, el análisis de escala de área de superficie de volumen debe incluir masas de hielo más grandes con inventarios regionales para una estimación más precisa.

Veettil (2018) en la investigación: **Mapeo de glaciares en la Cordillera Blanca, Perú, Andes tropicales, utilizando datos de Sentinel-2 y Landsat**. Mapeó toda la Cordillera Blanca, llegando a comparar los resultados de los contornos glaciares con los datos de Landsat OLI y Sentinel-2, para glaciares libres de escombros y de la misma temporada (2016). Llegando a concluir que el índice de NDSI para el mapeo de glaciares usando datos del Sentinel-2 es menos sensible a las sombras proyectadas y al terreno empinado en comparación con los datos Landsat.

Silverio & Jaquet (2017) en la investigación: **Evaluación de las fluctuaciones de los glaciares en la Cordillera Blanca (Perú) por teledetección entre 1987 y 2016 en el contexto de ENSO**. Desarrolló la serie temporal de mapas de cobertura de glaciares derivados de satélites de 1987 - 2016, basándose en las imágenes Landsat 8-OLI y datos de campo, comparando los resultados cartográficos obtenidos por dos índices espectrales (NDSI y relación NIR/SWIR) para 1987, 1996 y 2002 y evaluaron la distribución y evolución de los glaciares con la altitud. A pesar de las diferencias metodológicas, la cobertura estimada es comparable con otros estudios, dando un margen de incertidumbre de alrededor de  $\pm 10 \%$ .

## 2.2. Bases teóricas

Los climas regionales desempeñan un papel fundamental en la modulación de la respuesta de los glaciares a la variabilidad del clima (Sagredo et al. 2014). La comprensión de la influencia de la temperatura y las precipitaciones sobre el balance de masa glaciar es clave para la interpretación de las fluctuaciones pasadas, presentes y futuras de un glaciar.

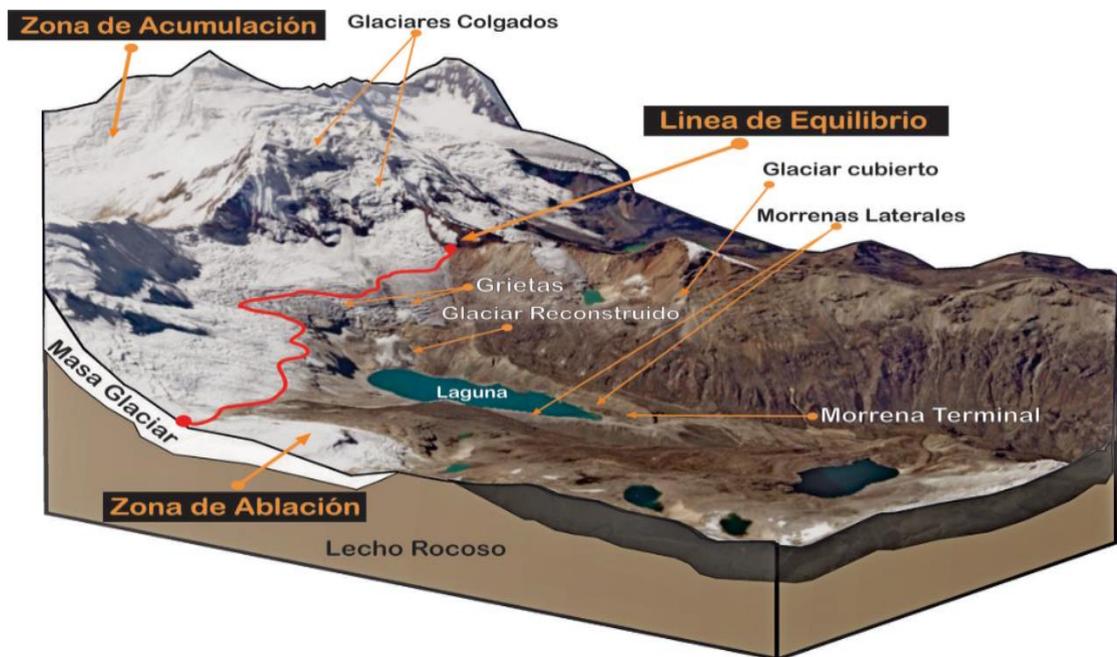
Los glaciares son masas de hielo que se origina por la acumulación, compactación y recristalización de la precipitación sólida (nieve, granizo o escarcha). Es todo cuerpo de hielo de diferentes formas y dimensiones y presentan distintos contenidos de material detrítico tanto interior como en la superficie, registra diferentes y cambiantes velocidades de flujo, se comporta como un cuerpo plástico o semi-plástico, y su permanencia puede alcanzar desde varias décadas a varios miles de años.

Además, puede presentarse estático o fluir según sea la pendiente, e incluso contra ella en forma local por compresión y empuje (Ferrando, 2014).

La topografía de la roca madre es la principal influencia en la dinámica y la pendiente de la superficie de un glaciar (IPCC, 2003). El glaciar es un sistema complejo, conformado por dos componentes principales como la zona de acumulación y la ablación, ver Figura 1. Como lo indicado por Rivera (2016), la principal forma de acumulación de masa en cualquier glaciar es la precipitación nivosa, en algunas regiones esta puede ser de unos pocos centímetros a metros por año.

### Figura 1

*Partes de un glaciar y zonas circundantes*



*Fuente: INAIGEM, (2017)*

La zona de acumulación se refiere a la acumulación de volumen de nieve y hielo en un año hidrológico. Proporciona información acerca de la cantidad de precipitaciones sólidas recogidas por el glaciar durante un año hidrológico (Francou & Pouyaud, 2008). Son todos aquellos procesos que aumentan la masa glaciar, expresado como un número positivo.

Entre los principales componentes aportantes está la caída de nieve, deposición de cristales de hielo (formado por transferencia de vapor-sublimación seguida de deposición), aumento de la nieve soplada por el viento y de la nieve a la deriva, avalancha, congelación basal (normalmente bajo el hielo flotante) y acumulación interna (Haeberli, 2011). La precipitación no constituye una acumulación a menos que se congele, como tampoco lo es la adición de escombros por avalancha, caída de cenizas o procesos similares.

La zona de ablación es la zona del glaciar donde predominan los procesos de fusión (pérdida de hielo en forma líquida), evaporización, sublimación y desprendimiento de masas de hielo (Francou, et al. 2004). Todos los procesos que reducen la masa del glaciar, expresada como un número negativo.

Rivera, (2016) afirmó que la ablación ocurre principalmente debido al derretimiento de la nieve o el hielo en la superficie seguido de la escorrentía debido a la transferencia de energía en la atmósfera a través de procesos radiativos y flujo turbulento en el aire adyacente a la superficie. Otras formas de ablación son el desinflado y la sublimación, siendo esta última la conversión directa de hielo en vapor de agua.

Entre los principales componentes tenemos: derretimiento superficial (generalmente la más importante), ablación frontal (frentes de glaciares marinos o lacustres- efecto calving), pérdida de la nieve soplada por el viento y de la nieve a la deriva, avalancha y sublimación (importante a grandes alturas en latitudes bajas-glaciares tropicales) (Haeberli, 2011).

En los Andes, la gran variedad de condiciones climáticas da lugar a una gran cantidad y diversidad de masas de hielo (Sagredo & Lowell, 2012) seguida de la magnitud y la distribución espacio-temporal de la temperatura y la precipitación característicos de cada zona.

La influencia de la temperatura y la precipitación hacia los glaciares suele definirse como la capacidad para ejercer el equilibrio de masas inducido por un cambio de la temperatura o por el cambio del porcentaje de la precipitación. En general, la

sensibilidad a los cambios de temperatura y precipitación aumentan dramáticamente con la cantidad de precipitación anual (Cogley et al. 2011).

En los Andes tropicales, la actividad convectiva amazónica produce concentraciones importantes en los lados oriental y parcialmente accidental en los Andes, la que es magnificada por fenómenos de teleconexión hemisférica. Además de la precipitación nivosa, hay otros mecanismos que hacen una contribución marginal. El agua de lluvia es una de ellas, la que es transformada en hielo superficial por efecto de bajas temperaturas, la neblina blanca por el contacto con los glaciares o el recongelamiento del agua de deshielo se integraba en forma de capas de hielo sobreimpuesto.

La Cordillera Blanca no es la excepción a la influencia de estos variables, lo que resulta importante evaluar la sensibilidad de los glaciares, en particular de la temperatura del aire, a la cantidad total de precipitaciones recibido y estacionalidad. Más aún por las variaciones estacionales pequeñas y diarias relativamente grandes de temperatura, así como por una sucesión clara entre una estación húmeda y una estación seca (Kaser et al. 1990).

La estación húmeda está influenciada por la zona de convergencia intertropical (ZCIT), la cual se produce durante el verano austral, entre los meses de octubre-abril, durante estos meses se concentra el 90% de la cantidad anual de precipitaciones. Las precipitaciones sobre la Cordillera Blanca provienen principalmente del advenimiento desde el Este de masas de aire húmedo de la cuenca amazónica y de células convectivas inducidas localmente (Kaser. G, 1999). Por lo tanto, la acumulación de masa en los glaciares ocurre casi en su totalidad durante la temporada de lluvias (Kaser et al. 1990).

Dos peculiaridades afectan la distribución estacional y topográfica de las precipitaciones y por ende también el régimen glaciar en la Cordillera Blanca:

- La oscilación del cinturón de nubes y precipitaciones de la Zona de Convergencia Intertropical (ZCIT) provoca la distribución estacional de la precipitación.

- Debido a la estructura geológica de la Cordillera Blanca, la cuenca del área de captación del Río Santa se encuentra a pocos kilómetros al Este de los picos más altos. Las masas de aire húmedo traídas por la ZCIT desde el Sureste se superponen a la cuenca y, por lo tanto, causan abundantes precipitaciones también en las zonas de captación de altura, sotavento y glaciares de la Cordillera Blanca.

La estación seca está influenciada por los vientos alisios, se produce entre mayo y septiembre, durante la cual las precipitaciones en el fondo del valle son casi nulas (Schauwecker et al. 2014). En contraste con las fuertes diferencias anuales de precipitaciones, esta zona se caracteriza por pequeñas diferencias anuales de temperatura, pero la amplitud diurna tiene una gran variabilidad (Vuille et al. 2008).

El balance de masa corresponde a la sumatoria de la acumulación y de la ablación, donde la acumulación es la entrada o ganancia de masa y está representado con un signo positivo. Por el contrario, la ablación es la salida de flujo del sistema, o pérdida de masa, y está representado con un signo negativo, en la unidad espacial de referencia en el tiempo. Está basada en un método matemático de la ley de conservación de la materia, la materia ni se crea ni se destruye, solo se transforma; en otros términos, puede definirse como la suma de entradas y salidas de masa en un proceso o de una parte de este.

Este cambio de volumen se define como la cantidad equivalente de agua en milímetros que ha ocurrido durante un periodo de tiempo definido, determinado a menudo, por la duración de un año hidrológico (IDEAM, 2014). El balance de masa se expresa en general en milímetros o metros de equivalente agua (en inglés, se nota: *mm w.e.* y por año *mm w.e. y<sup>-1</sup>*) (Francou et al. 2004).

Francou et al. (2004) sostienen que el balance de masa representa el equivalente de agua de lo que gana o pierde un glaciar en un tiempo determinado, obtenido a partir de mediciones repetidas, ya sea de manera directa o indirecta. Siendo directa aquel donde todas las mediciones se realizan sobre el glaciar, como es el caso del método glaciológico y el geodésico; el método indirecto es aquel donde la medición se realiza

a través de la medición de parámetros que están relacionados con la variación del glaciar, como la temperatura, caudal, etc. Es el caso del método hidrológico y energético. Entre las diferentes variables que se pueden extraer para el análisis, está las superficies de áreas y balance de masa glaciar, las cuales se describen a continuación.

La determinación de la superficie de glaciar se basa en la clasificación de imágenes satelitales, especialmente las del sensor Landsat. El enfoque utilizado para la clasificación de glaciares es el cálculo del *Normalized Difference Snow Index* (NDSI siglas en inglés) o *Índice de Nieve de Diferencia Normalizada* (NDSI) (Hall & Riggs, 1995).

Las ecuaciones y los factores de cambio del catálogo de datos alojados en la plataforma de Google Earth Engine de Landsat se detallan en (Chander et al. 2009). Veetil & Kamp (2017) describen ampliamente los conocimientos existentes sobre la posibilidad, ventajas y dificultades para el monitoreo de glaciares en los Andes tropicales.

El *índice de nieve de diferencia normalizada* (NDSI) es un indicador numérico que muestra la capa de nieve sobre áreas terrestres. Con base a las bandas espectrales verde e infrarroja de onda corta (SWIR). Dado que la nieve absorbe la mayor parte de la radiación incidente en el SWIR, mientras que las nubes no, esto permite que NDSI distinga la nieve de las nubes (Arora et al. 2011).

En las **ecuaciones 1 y 2** se indica el NDSI para Landsat 5 TM y Landsat 8 OLI respectivamente, la relación de bandas (BR) con la aplicación del valor umbral (02-0.4) permite diferenciar entre áreas dentro y fuera del glaciar (Paul et al. 2013).

$$NDSI_{L5} = \frac{Green(B2) - SWIR(B5)}{Green(B2) + SWIR(B5)} \quad (1)$$

$$NDSI_{L8} = \frac{Green(B3) - SWIR(B6)}{Green(B3) + SWIR(B6)} \quad (2)$$

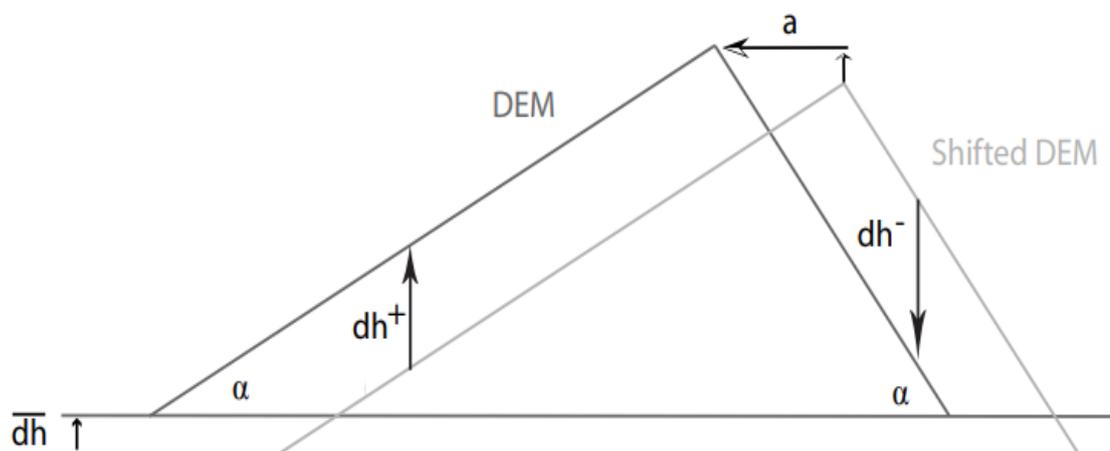
Una manera de estimar el balance de masa es mediante la estimación de cambio de volumen de la diferencia de cotas de la superficie glaciar en dos periodos diferentes.

Conociendo la densidad superficial en diferentes partes del glaciar, el cambio de volumen puede convertirse en un cambio de masa. Este método se puede aplicar utilizando DEM, obtenidos por topografía, imágenes de satélite, imágenes aerotransportadas (fotografías) o por exploración de laser altimétricos.

El método geodésico es complementario al método glaciológico y de acuerdo a la precisión del DEM y la dinámica del glaciar se podría aplicar a intervalos cortos de tiempo para evaluar la variación de masa, para aquellos casos donde los DEMs no son muy precisos se suele aplicar a intervalos de tiempo mayores (5 a más años).

La comparación entre los DEMs es muy utilizada en la glaciología, es usado habitualmente para medir los cambios en la elevación de los glaciares, sin embargo, estos deben ser ajustados para evitar posibles errores de desplazamiento en horizontal y vertical (Kääb, 2005; Nuth & Kääb, 2011) de ambos, el desplazamiento en vertical influirá más que el desplazamiento en horizontal en los cálculos de balance de masa.

**Figura 2**  
*Diferencias de elevación inducidas por el desplazamiento del DEM*



Fuente: Nuth & Kääb (2011)

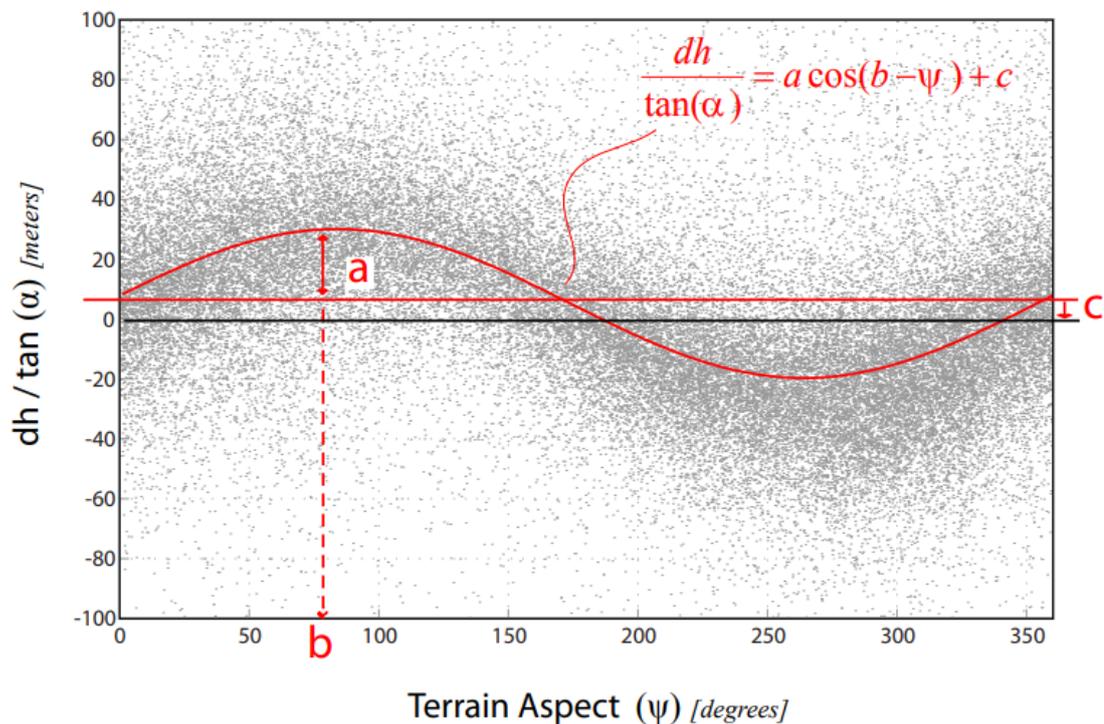
Las correcciones de estos errores se realizan con base a la coherencia espacial de los DEMs, Basados en Nuth & Kääb (2011) se tiene que la diferencia de elevación ( $dh$ ) del DEM de referencia o base ( $DEM_S$ ) y el DEM a ajustar ( $DEM_A$ ) se relacionan con la pendiente del terreno ( $\alpha$ ) y la orientación ( $\omega$ ) de la siguiente manera:

$$\frac{dh}{\tan(\alpha)} = a * \cos(b - \omega) + c \quad (3)$$

Donde “a” es la magnitud de desalineación, “b” es la dirección de la desalineación y “c” es el sesgo de elevación media dividido por la tangente de la pendiente media de la muestra.

### Figura 3

Vista de la ecuación que relaciona la  $dh$ ,  $\alpha$  y  $\omega$



Fuente: Nuth & Kääb (2011)

Los datos de entrada ( $dh$ ,  $\alpha$  y  $\omega$ ) deben ser una muestra de terreno estable que contenga una distribución de al menos la mitad de todas las pendientes posibles, distribuidos uniformemente si es posible. La pendiente y la orientación del terreno se calculan a partir del DEM<sub>M</sub>. Los parámetros desconocidos del co-registro (a, b y c) se pueden resolver usando una minimización de mínimos cuadrados.

Como se trata de una solución analítica basada en la superficie donde no hay cambios o variaciones, el proceso debe repetirse hasta que la solución converja; por lo

tanto, una vez que se determina la solución inicial, los DEMs debe corregirse según la magnitud (a) y la dirección (b) del vector de co-registro y con el sesgo vertical medio.

Los ajustes de corrección para el DEMS en los 3 ejes son:

$$dX = a * \text{sen}(b) \quad (4)$$

$$dY = a * \text{cos}(b) \quad (5)$$

$$dZ = c * \text{tan}(\bar{a}) \quad (6)$$

Finalmente, el DEM<sub>S</sub> es compensado en base a los desplazamientos en los ejes X, Y y Z, obteniendo el DEM corregido (DEM<sub>SC</sub>) con las siguientes ecuaciones:

$$X_{\text{correccion}} = X - dX \quad (7)$$

$$Y_{\text{correccion}} = Y - dY \quad (8)$$

$$Z_{\text{correccion}} = Z - dZ \quad (9)$$

La corrección con base al co-registro posee algunas excepciones donde la solución de problema falla, en terreno plano o de baja pendiente, menores de tres a cinco grados que están presentes en la muestra de terreno estable, por lo que es recomendable depurar estos valores.

A continuación, se describe los procedimientos para aplicar la coherencia espacial entre los DEM (co-registro):

- Homogenizar los modelos de elevación digital (DEM1 y DEM2) con la misma resolución espacial y en un sistema de proyección común, se recomienda que el remuestreo del archivo de salida sea en bilineal o convolución cúbica, se recomienda esta última. La diferencia de periodos entre los DEMs tiene que ser mayor a 3 años.
- Es necesario diferenciar al DEM de referencia o base (en inglés Master) y el DEM a ajustar (en inglés Slave), en general el DEM de referencia es el más preciso y que está mejor georreferenciado, para aplicar después una diferencia, DEM a ajustar menos DEM de referencia y cuya diferencia será un archivo de diferencias de cotas ( $DEM_S - DEM_M = dh$ ), del DEM<sub>M</sub> se generan los archivos de

pendiente ( $\alpha$ ) en grados sexagesimales y orientación ( $\omega$ ).

- Se crea un archivo de áreas (ZSC) de las zonas que no han sufrido cambios en el periodo de análisis, es decir, de aquellos sectores que permanecen inamovibles en el eje vertical y horizontal (muestra de terreno estable). De la zona (ZSC) se extraen todos los valores de  $dh$ ,  $\alpha$  y  $\omega$  pixel a pixel.
- Debido a que el co-registro no funciona correctamente en terrenos planos o llanos, se depurara todos los valores por debajo de la pendiente de 5 grados (pendiente  $< 5^\circ$ ).
- Con los valores de  $dh$ ,  $\alpha$  y  $\omega$  se resuelve la ecuación (3) para poder obtener los valores de corrección en X, Y y Z según las ecuaciones (4), (5) y (6).

Diferencia de los DEM para determinar el volumen de cambio de masa glaciar. Culminado la etapa de corrección del DEM mediante la aplicación del co-registro se procede a la obtención de la variación de volumen, para ello se seguirán los siguientes procedimientos:

- Realizar la diferencia entre los DEM, el periodo final menos el periodo inicial ( $DEM2c - DEM1c$ ) el producto será la diferencia de cotas ( $dhf$ ).
- La suma de la  $dhf$  dentro de la superficie del glaciar será multiplicada por el área del pixel ( $P^2$ ) del DEM, con ello se obtendrá la variación de volumen ( $\Delta V$ ).

$$\Delta V = \sum_{i=1}^n (dh_{fi}) * P^2 \quad (10)$$

- Finalmente se extrae la variación de volumen ( $\Delta V$ ) dentro de la superficie glaciar.

Conversión de variación de volumen a variación de masa. Para este paso se asume una densidad promedio ( $\bar{\rho}$ ) para toda la superficie glaciar de  $0.85 \text{ g/cm}^3$ , el cual puede tener variaciones de acuerdo a las características de los glaciares de  $\pm 0.06 \text{ g/cm}^3$  (Huss, 2013), esta afirmación está basado en la ley de Sorge (Bader, 1954) donde se menciona que si la acumulación y la temperatura son constantes en el tiempo entonces el perfil de la densidad podría ser constante, esto para las zonas de nieve seca. El factor

de cambio volumétrico ( $f_{\Delta V}$ ) es una constante obtenida entre la densidad promedio ( $\bar{\rho}$ ) y la densidad del agua ( $\rho_{agua}$ ) (Fischer et al. 2015; Zemp et al. 2013) cuyo valor sería 0.85. Ecuación (11).

Por lo tanto, la variación en masa sería el producto de la variación de volumen por el factor de cambio volumétrico. Ver ecuación (12).

$$f_{\Delta V} = \frac{\bar{\rho}}{\rho_{agua}} \quad (11)$$

$$\Delta M = \Delta V * f_{\Delta v} \quad (12)$$

Sin embargo, cabe resaltar que la densidad es muy variable en glaciares de diferentes dimensiones y localizadas en diferentes zonas, por lo que el este valor puede ser ajustado de acuerdo a las diferentes condiciones del ámbito y del glaciar a estudiar.

Obtención del balance de masa glaciar, con los valores de variación de volumen se procede a calcular el balance que vendría a ser la división de la variación de volumen entre la superficie promedio del periodo inicial y del periodo final.

$$BM = \frac{\Delta M}{S} \quad (13)$$

Si se desea calcular el balance anual, se divide el balance (BM) entre los años transcurridos (t) del periodo de análisis.

$$BMa = \frac{BM}{t} \quad (14)$$

En resumen, el balance anual estará en función de la sumatoria de variación de cotas ( $dhf$ ), el área del pixel ( $P^2$ ) de los DEM, la superficie promedio del periodo inicial y del periodo final, el factor de cambio volumétrico ( $f_{\Delta V}$ ) y el periodo de análisis (t). Ecuación (15).

$$B_{anual} = \frac{\sum_{i=1}^n (dh_{fi}) * P^2}{S * t} * f_{\Delta V} \quad (15)$$

El cálculo de incertidumbre de errores sistemáticos ( $\epsilon$ ) y los errores aleatorios ( $\sigma$ ). En el desarrollo del co-registro, el promedio de cotas sobre el área estable

$(\overline{dh}_{estable})$  considerado como un error sistemático para la diferencia de cotas ( $dhf$ ) y la variación de volumen ( $\Delta V$ ) dentro de la superficie glaciar; para calcular este error debemos calcular el promedio del área estable ( $\overline{dh}_{estable}$ ) de la diferencia de los DEM corregidos, el DEM que se ajustó menos DEM de referencia ( $DEM_S - DEM_M$ ).

$$\varepsilon = \overline{dh}_{estable} \quad (16)$$

El error aleatorio es estimado mediante la incertidumbre estocástica ( $\sigma$ ), multiplicando la desviación estándar (STDEV) por dos (95% de intervalo de confianza) y dividido entre la raíz cuadrada del número de píxeles ( $n$ ) evaluados del terreno estable (Rastner et al. 2016).

$$\sigma = \pm \frac{2*STDEV}{\sqrt{n}} \quad (17)$$

La incertidumbre no solo depende del error estándar, de las diferencias de elevación individuales, sino que también del tamaño del área promedio y de la escala de la correlación espacial.

La información climática fue obtenida de los productos de reanálisis, estos proyectos proporcionan datos de temperatura, precipitación y humedad relativa a varios niveles de la atmosfera.

Estos proyectos tienen por objeto asimilar los datos meteorológicos históricos de una determinada superficie o del planeta, utilizando un sistema de análisis consistente moderno, para producir un conjunto de datos que puede utilizarse para estudios meteorológicos y climatológicos. Entre algunos de estos proyectos para la obtención de datos meteorológicos y climáticos tenemos:

NCEP-NCAR (R1), es un esfuerzo de reanálisis original, utiliza técnicas de sistema global de asimilación de datos (desde el 11 de enero de 1995). La base de datos original fue mejorada (conjuntos de datos adicionales y puntos de control de calidad) por la Sección de Apoyo de datos de NCAR.

ERA5 es el reanálisis atmosférico ECMWF (Servicio de Cambio Climático Copernicus), combina datos del modelo con observaciones completos y consistentes

globalmente. Reemplazando así el reanálisis ERA5. Proporciona temperatura del aire a 2m, precipitación total, temperatura mínima y máxima, presión superficial, entre otros. La disponibilidad de datos es de 1979 en adelante a una resolución aproximada de 27830 m, la precipitación y la temperatura has sido descargadas de página web <https://cds.climate.copernicus.eu/#!/home> y la plataforma de Google Earth Engine.

La temperatura y anomalías de las zonas NIÑO se descargaron de Centro de Predicción del Clima de la NOAA (Oficina Nacional de Administración Oceánica y Atmosférica) de la siguiente página <https://www.cpc.ncep.noaa.gov/data/indices/>.

La investigación se desarrolló en las unidades hidrográficas y glaciares de Llullán (Artesonraju), Quillcay (Llaca) y Yanayacu (Gueshgue) ubicadas en el flanco occidental de la cordillera Blanca, cuya longitud aproximada es de 247 km. Está comprendido entre las coordenadas de 10° 12' 22.09" y 7° 55' 55.71" de latitud sur y 78° 24' 7.65" a 76° 30' 47.90" de longitud oeste (INAIGEM, 2018), dentro de la cuenca del río Santa apreciar la Figura 4 y en la Tabla 2 se muestra en la ubicación política de las unidades hidrográficas.

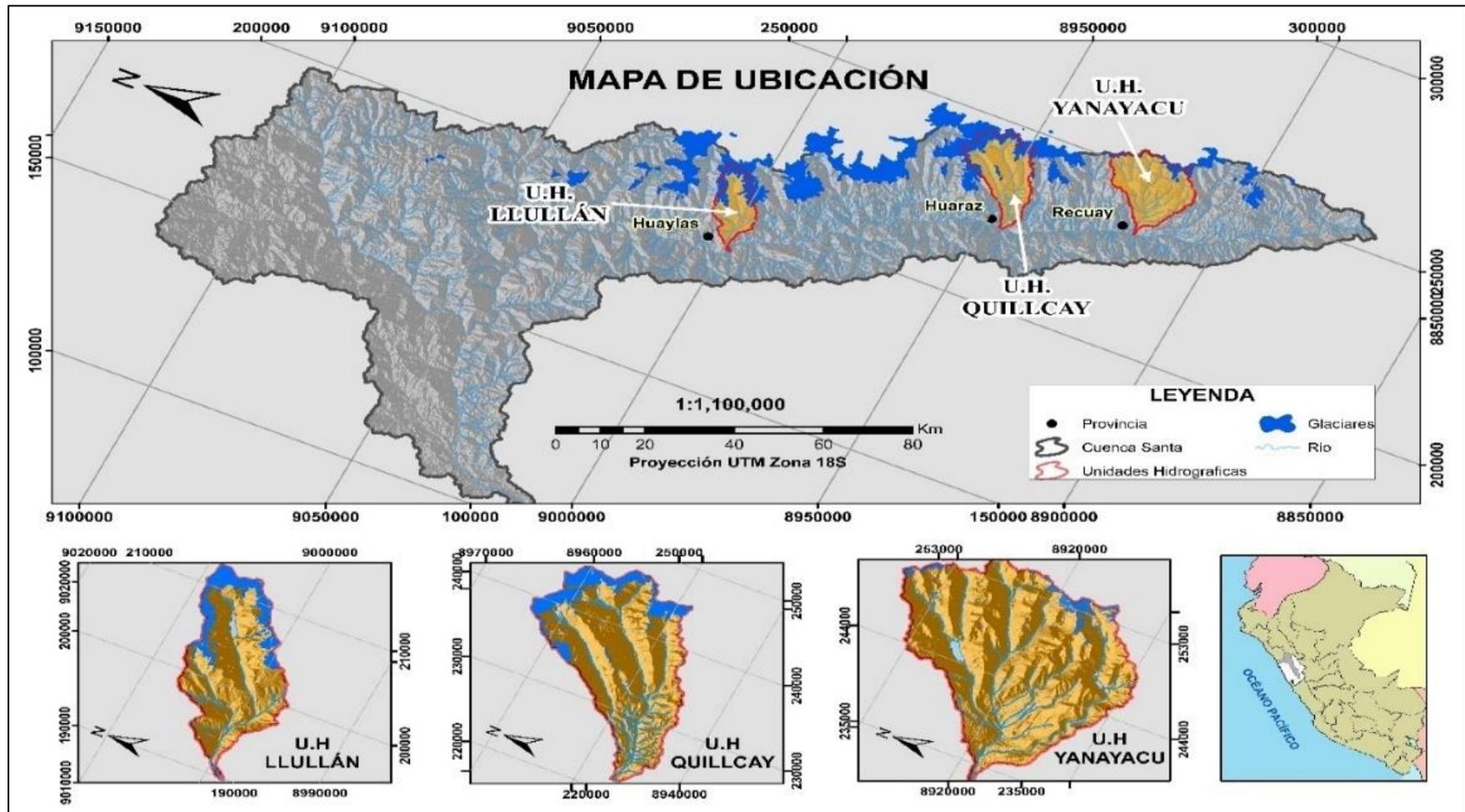
**Tabla 2**

*Ubicación política de las unidades hidrográficas*

Unidad hidrográfica	Código Pfafstetter nivel 6	Provincia	Distrito	Área (ha)	Perímetro (m)
Llullán	3	Huaylas	Caraz	14444.716	64556.1
Quillcay	6	Huaraz	Huaraz/ Independencia	24914.174	82411.5
Yanayacu	8	Recuay	Ticapampa/ Cátac	27306.396	80349.4

Figura 4

Ubicación de las unidades hidrográficas dentro de la cuenca del Santa



## 2.3. Definición de términos

### **Temperatura**

La temperatura es una de las magnitudes más utilizadas para describir el estado de la atmósfera. Varía entre el día y la noche, entre una estación y otra, y también entre una ubicación geográfica y otra. Es una magnitud relacionada con la rapidez del movimiento de las partículas que constituyen la materia (Jiménez et al. 2004).

### **Precipitación**

Cualquier forma de partículas de agua, líquidas o sólidas, que caen de la atmósfera y llegan al suelo (Ahrens & Henson, 2018).

### **Zona de Convergencia Intertropical (ZCIT)**

Es una franja de bajas presiones ubicada en la zona ecuatorial, en ella confluyen los vientos alisios del Sureste y del Noreste. Debido a las altas temperaturas, las masas de aire son forzadas a ascender, originando abundante nubosidad y fuertes precipitaciones, algunas acompañadas de descargas eléctricas. La ITCZ no es uniforme ni continua, se puede interrumpir y su grosor variar de un sitio a otro, también su comportamiento en zonas marítimas y continentales (Sulca et al. 2018).

### **Modelo digital de elevaciones**

Estructura numérica de datos que representa la distribución espacial de la altura de una superficie. (Ibáñez M, 2008).

### **Modelo digital de la superficie**

Estructura numérica de datos que representa la distribución espacial de la altura de la superficie donde, además del terreno, se consideran también los elementos enlazados a él (Ibáñez M, 2008).

### **Análisis multitemporal**

Es el análisis de tipo espacial que se realiza mediante la comparación de las coberturas interpretadas en dos imágenes de satélite o mapas de un mismo lugar en diferentes

fechas y que permite evaluar los cambios en la situación de las coberturas que han sido clasificadas (Chuvienco, 1990).

### **Estructura desde el movimiento**

La técnica *Structure from Motion* (SfM) es un método fotogramétrico automatizado de alta resolución y bajo costo, este método se basa en los principios de fotogrametría estereoscópica. Difiere fundamentalmente de la fotografía convencional, en que la geometría de la escena, las posiciones de cámara y la orientación se resuelve automáticamente sin la necesidad de establecer puntos de control de coordenadas 3D conocidas. (Tomás et al. 2016).

### **Fotogrametría**

Según la sociedad americana de fotogrametría y sensores remotos (ASPRS). Fotogrametría es el arte, la ciencia y la tecnología de obtener información confiable de objetos físicos y su entorno, mediante el proceso de exponer, medir e interpretar tanto imágenes fotográficas como otras, obtenidas de diversos patrones de energía electromagnética y otros fenómenos. Citada en (Jauregui, 2010).

## **CAPÍTULO III**

### **MARCO METODOLÓGICO**

#### **3.1. Tipo de investigación**

La investigación es correlacional descriptiva, porque tiene como propósito describir las relaciones entre el balance de masa glaciar con la temperatura y precipitación.

#### **3.2. Diseño de la investigación**

Se utilizó un diseño transversal – correlacional. En la Figura 5 se presenta el diagrama de flujo seguido en la investigación.

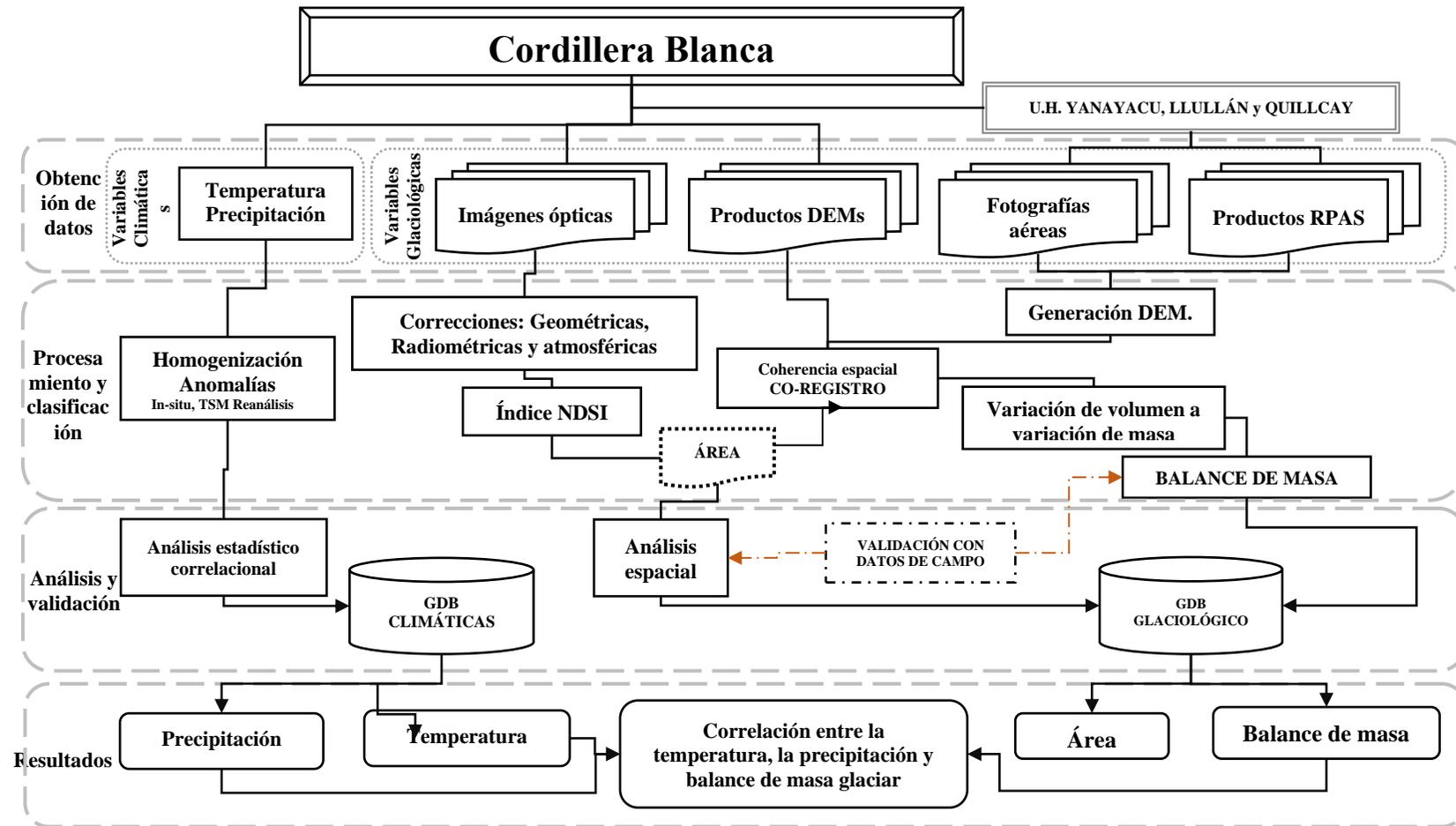
#### **3.3. Métodos o técnicas**

Para el análisis de cada una de las variables de estudio se emplearon métodos y técnicas basados en sistemas de información geográfica, teledetección y fotogrametría, a continuación, se detallan cada uno.



Figura 5

Diagrama general de la investigación



### a) Determinación del área glaciar

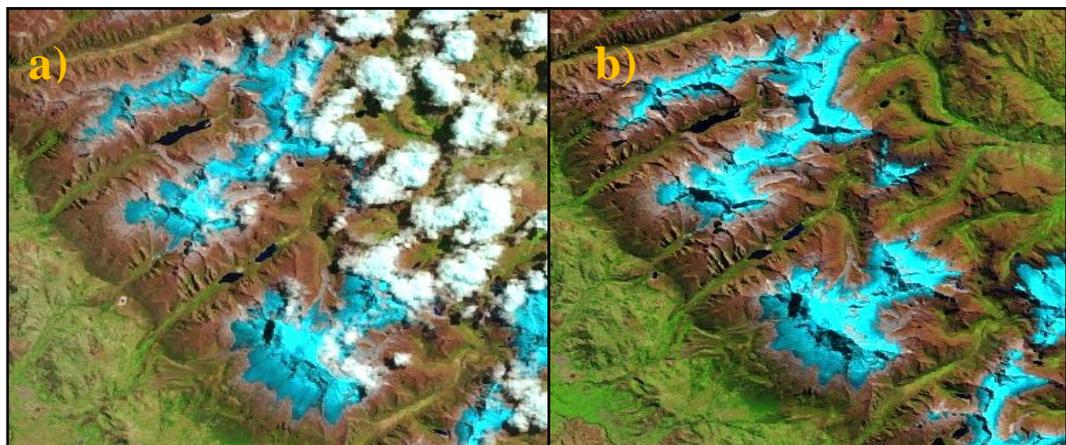
Para el mapeo automatizado de los contornos de glaciares limpios para los años de 2000, 2007, 2010, 2016 y 2020, se desarrolló un script bajo el lenguaje de programación JavaScript, lenguaje nativo del Google Earth Engine (GEE). El procedimiento seguido es el siguiente: primero se definió el área de trabajo glaciar de Cordillera Blanca y se cargó el límite de clasificación de glaciares de la Cordillera Blanca en formato Shapefile del inventario del INAIGEM del 2016.

Posterior a ello se procedió con el filtrado de las imágenes Landsat con los siguientes criterios: fecha de comprendidas entre los meses de mayo a setiembre, porcentaje de nubosidad (menor a 10% sobre la superficie del glaciar más no en la escena) y nieve temporal (escasa o nula), después se procede a cargar la colección de imágenes Landsat (5 TM, y 8 OLI), en la Figura 6 se visualiza la diferencia de imágenes con y sin nubosidad en zonas de glaciares.

En la Figura 7 se aprecia mosaico libre de nubes para la Cordillera Blanca y en la Figura 8 los resultados de la clasificación para el 2016. La clasificación con la aplicación del NDSI se ajustó con umbrales de 0.2 - 0.4. Ver script <https://code.earthengine.google.com/2de5d7cf88ded396205ae1459d4d0aa5> Posterior a ello se realizó correcciones manuales en lugares sobreestimadas.

### Figura 6

*Escenas en combinación de banda 6,5 y 4 de Landsat 8*



*Nota: a) Escenas con 70% de nubosidad por escena y b) Escenas libres de nubosidad.*

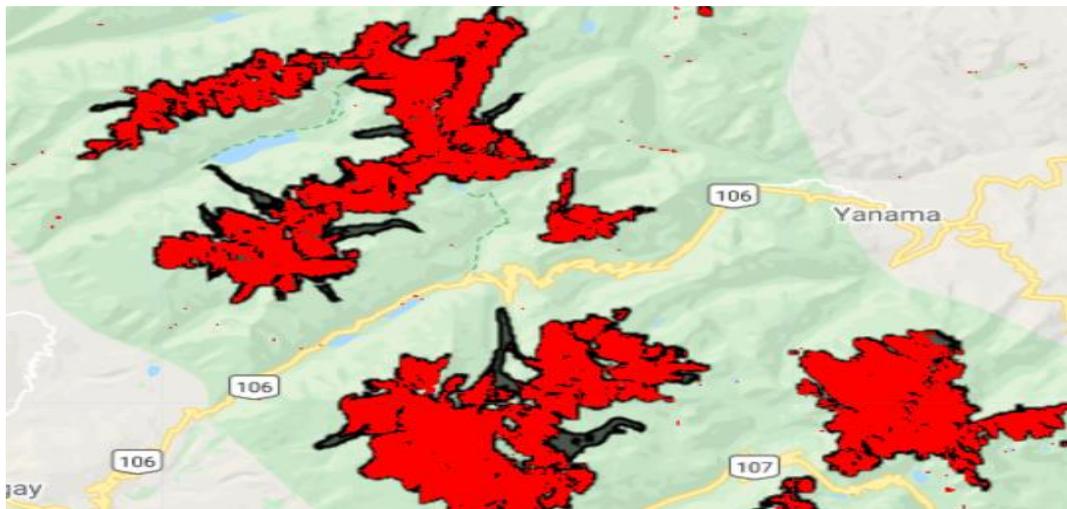
**Figura 7**

*Mosaico de imágenes satelitales Landsat 8 del 2016*



**Figura 8**

*Resultados de la clasificación de glaciares.*



*Nota:* Área roja (clasificación de glaciario) y polígono negro límite del inventario del 2016.

**b) Determinación del balance de masa glaciar**

✓ **Generación del modelo de elevación digital a partir de fotografías aéreas.**

Para la generación del DEM a partir de fotografías aéreas con metadatos incompleta de (calibración de la cámara, puntos de control, etc.), se utilizó técnica de Structure from Motion de fotogrametría en Agisoft Metashape v.1.6.

El proceso inicial es el realce de las fotografías con GIMP, con la finalidad de ajustar la intensidad de brillo y contraste, para corregir así las zonas oscuras (aclarar) y en las áreas blancas reducir niveles de intensidad de brillo y contraste, los cuales generan problemas al momento de procesar.

Posteriormente, se procedió con la orientación de las fotografías, seguida de la creación de nube de puntos densa y ajuste de las fotografías con los puntos de control del terreno, y finalmente se genera el DEM con la nube de puntos densa corregidos y también ortofoto; a continuación, se detallan las características del procesamiento para cada uno de los glaciares en las Tablas 3 al 8 y Figuras del 9 al 12.

### Características para el glaciar Gueshgue 1962

**Tabla 3**

*Datos de levantamiento del glaciar Gueshgue 1962*

Número de imágenes	2	Imágenes alineadas	2
Altitud media de vuelo	6.37 km	Puntos de paso	3,857
Resolución en terreno	60.5 cm/pix	Proyecciones	7,714
Área cubierta	24 km <sup>2</sup>	RMS Error de reproyección	0.357 pix

**Tabla 4**

*Error cuadrático medio de puntos de apoyo del glaciar Gueshgue 1962*

Número	Error en X (cm)	Error en Y (cm)	Error en Z (cm)	Error en XY (cm)	Total (cm)
4	0.997243	0.895575	0.588704	1.34035	1.46394

*Nota: X- Este, Y-Norte y Z-Altitud*

**Tabla 5**

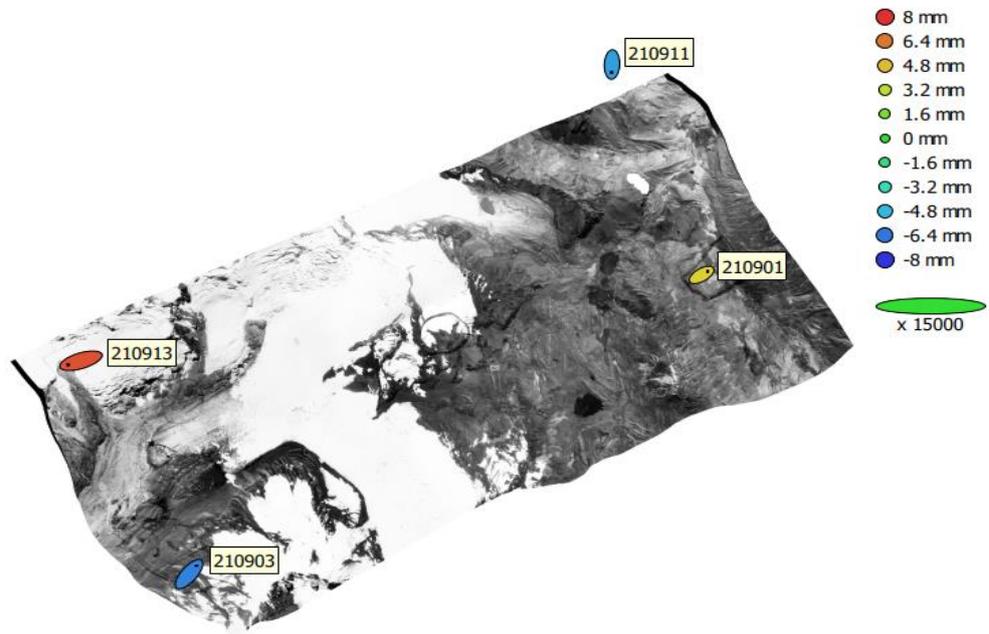
*Puntos de apoyo del glaciar Gueshgue 1962*

Nombre	Error en X (cm)	Error en Y (cm)	Error en Z (cm)	Total (cm)	Imagen (pix)
210901	0.741135	0.492759	0.432957	0.989719	30.12 (2)
210903	0.915129	1.18284	-0.61063	1.61538	48.31 (2)
210911	-0.04353	-1.12227	-0.54406	1.217966	36.36 (2)
210913	-1.60914	-0.55389	0.727982	1.85097	79.98 (2)
<b>Total</b>	<b>0.997243</b>	<b>0.895575</b>	<b>0.588704</b>	<b>1.46394</b>	<b>52.347</b>

*Nota: X- Este, Y-Norte y Z-Altitud*

### Figura 9

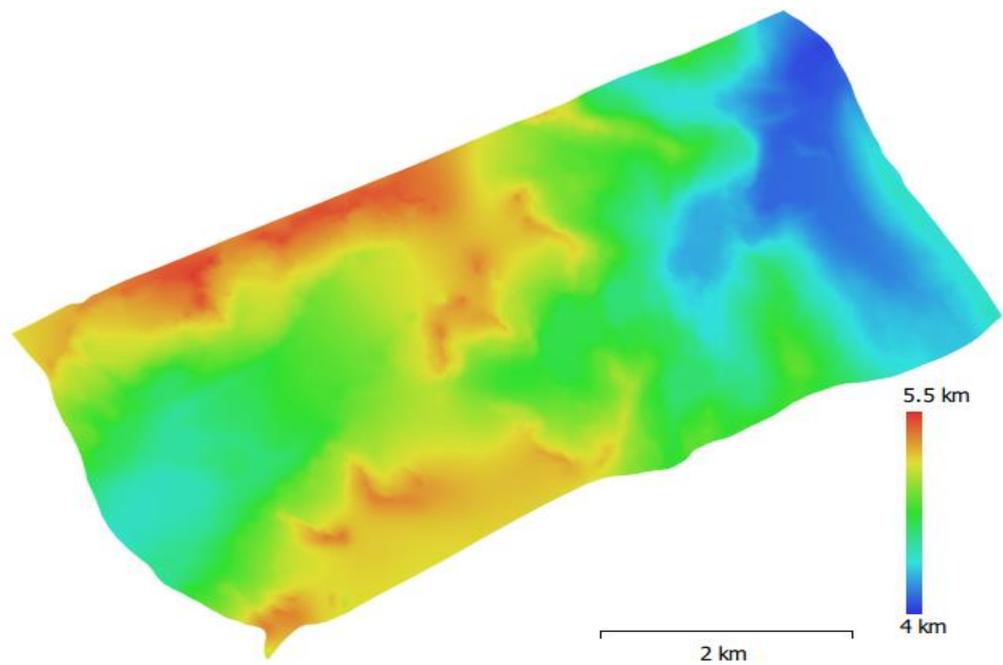
Posiciones de puntos de apoyo y estimaciones de errores



Nota: El color indica el error en Z mientras el tamaño y forma de la elipse representan el error en XY.

### Figura 10

Modelo digital de elevación del glaciar Gueshgue 1962



Nota: Resolución: 60.5 cm/pix y Densidad de puntos 2.73 puntos/m<sup>2</sup>.

## Características para el glaciar Artesonraju 1962

**Tabla 6**

*Datos de levantamiento del glaciar Artesonraju 1962*

Número de imágenes	3	Imágenes alineadas	3
Altitud media de vuelo	19.3 km	Puntos de paso	3,212
Resolución en terreno	74.9 cm/pix	Proyecciones	6,496
Área cubierta	40.1 km <sup>2</sup>	RMS Error de reproyección	0.804 pix

**Tabla 7**

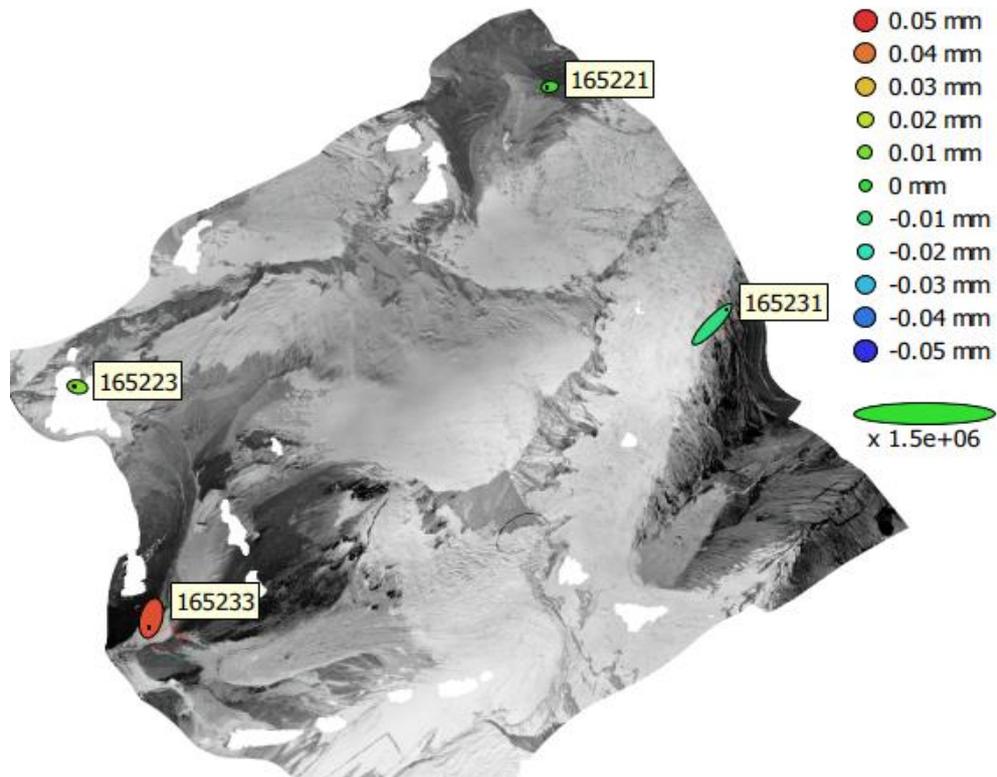
*Error cuadrático medio de puntos de apoyo del glaciar Artesonraju*

Número	Error en X (mm)	Error en Y (mm)	Error en Z (mm)	Error en XY (mm)	Total (mm)
4	0.0942332	0.119145	0.0242236	0.151906	0.153825

*Nota: X- Este, Y-Norte y Z-Altitud*

**Figura 11**

*Posiciones de puntos de apoyo y estimaciones de errores*



*Nota: El color indica el error en Z mientras el tamaño y forma de la elipse representan el error en XY.*

**Tabla 8**

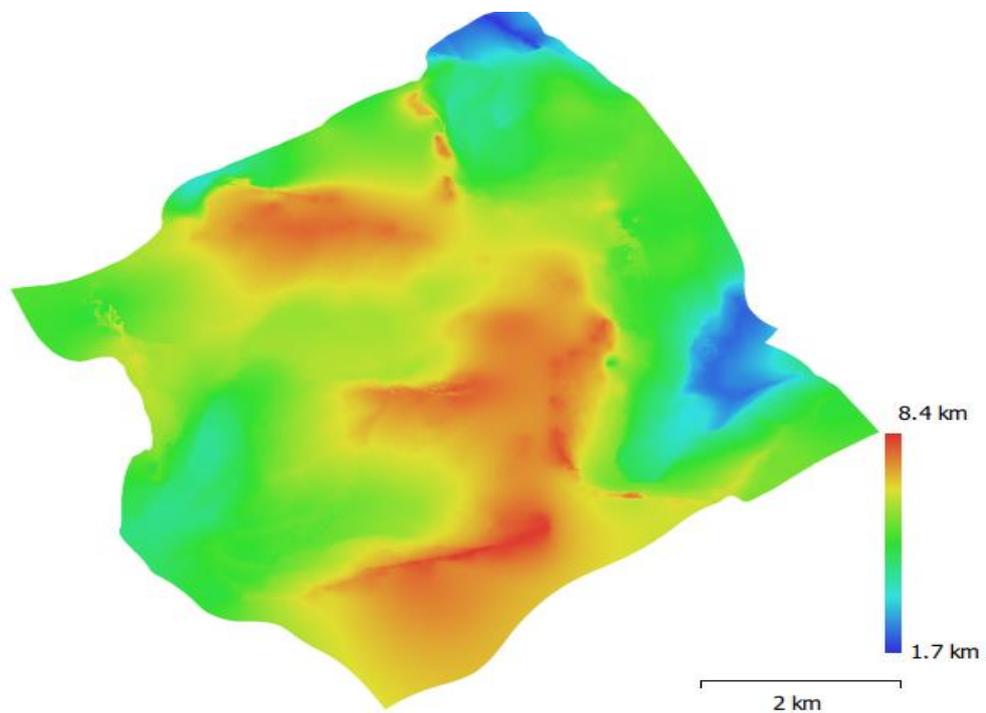
*Puntos de apoyo del glaciar Artesonraju 1962*

Nombre	Error en X (mm)	Error en Y (mm)	Error en Z (mm)	Total (mm)	Imagen (pix)
165221	-0.033698	-0.005891	0.0014616	0.0342409	0.241 (2)
165223	-0.038065	0.008831	0.0114243	0.0407116	0.198 (2)
165231	0.178915	0.200876	-0.011339	0.26924	1.440 (2)
165233	-0.030406	-0.127745	0.045672	0.139029	0.687 (2)
<b>Total</b>	<b>0.094233</b>	<b>0.119145</b>	<b>0.0242236</b>	<b>0.153825</b>	<b>0.885</b>

*Nota:* X- Este, Y-Norte y Z-Altitud

**Figura 12**

*Modelo digital de elevación del glaciar Artesonraju 1962*



*Nota:* Resolución: 74.9 cm/pix y Densidad de puntos 1.78 puntos/m<sup>2</sup>.

✓ **Generación del modelo de elevación digital a partir de productos RPAS.**

Para la creación del DEM, primero se orientó las fotos tomadas por el RPAS, luego estas se ajustaron con los puntos de control, posteriormente se realizó la nube de puntos densa y finalmente se genera el DEM con la nube de puntos densa. En las Tablas 9 al 11 se detallan las características del procesamiento para cada uno de los glaciares y en las Figuras 13 y 15 los diferentes resultados.

## Características para el glaciar Gueshgue 2020

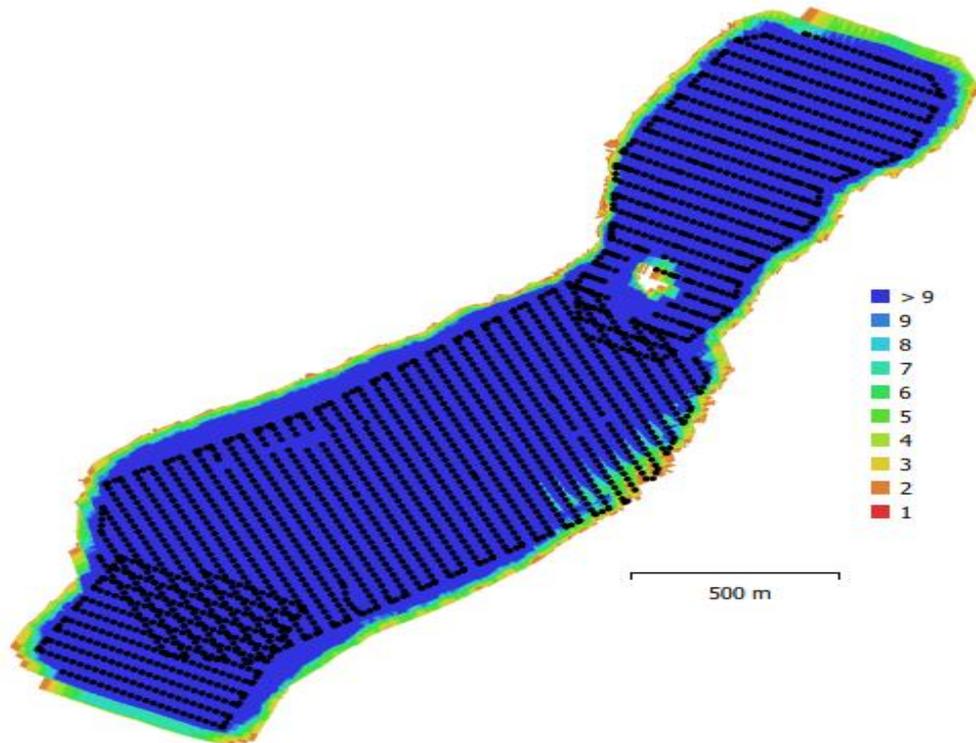
**Tabla 9**

*Datos de levantamiento del glaciar Gueshgue 2020*

Número de imágenes	2,492	Imágenes alineadas	2,427
Altitud media de vuelo	133 m	Puntos de paso	145,472,459
Resolución en terreno	0.0364 m/pix	Proyecciones	445,936,660
Área cubierta	1.98e+06 m <sup>2</sup>	RMS Error de reproyección	0.379 pix

**Figura 13**

*Posiciones de cámaras y solapamiento de imágenes*



*Nota:* Modelo de cámara: FC6310R (8.8mm), Resolución: 4864x3648, Distancia focal: 8.8mm y Tamaño de píxel: 2.61x2.61 micras.

**Tabla 10**

*Error cuadrático medio de puntos de apoyo del glaciar Gueshgue 2020*

Número	Error en X (m)	Error en Y (m)	Error en Z (m)	Error en XY (m)	Total (m)
6	0.0868629	0.0398594	0.0215588	0.0955716	0.097973

*Nota:* X- Este, Y-Norte y Z-Altitud

**Tabla 11**

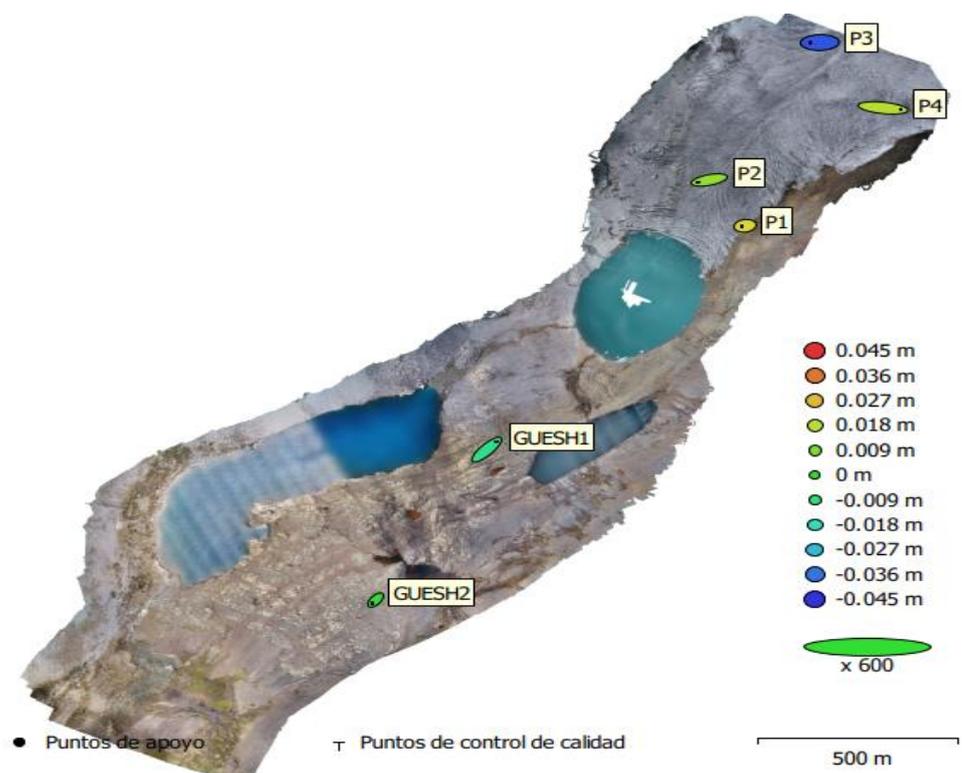
*Puntos de apoyo del glaciar Gueshgue 2020*

Nombre	Error en X (m)	Error en Y (m)	Error en Z (m)	Total (m)	Imagen (pix)
GUESH2	-0.027507	-0.034912	-0.001071	0.0444595	2.366 (14)
GUESH1	0.0801526	0.0857259	-0.011738	0.117946	2.515 (12)
P1	-0.026794	-0.005468	0.023559	0.036095	1.057 (20)
P2	-0.095877	-0.023450	0.012513	0.0994936	1.745 (19)
P3	-0.078407	-0.002422	-0.040506	0.0882851	3.441 (9)
P4	0.148431	-0.019473	0.0172433	0.150693	2.564 (23)
<b>Total</b>	<b>0.0868629</b>	<b>0.0398594</b>	<b>0.0215588</b>	<b>0.097973</b>	<b>2.252</b>

*Nota: X- Este, Y-Norte y Z-Altitud*

**Figura 14**

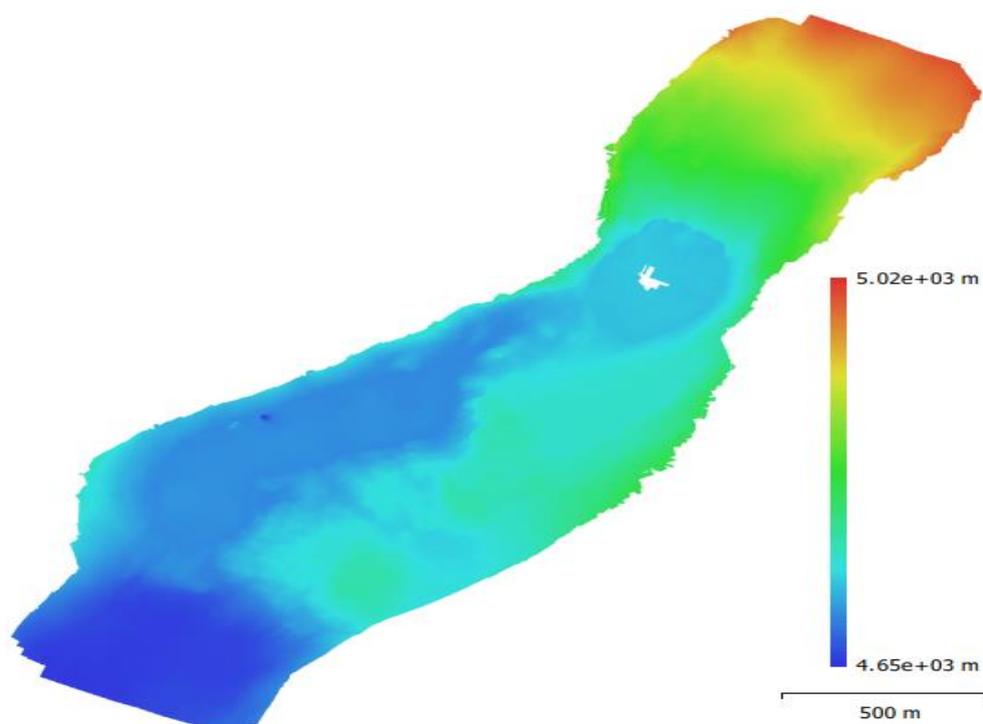
*Posiciones de puntos de apoyo y estimaciones de errores*



*Nota: El color indica el error en Z mientras el tamaño y forma de la elipse representan el error en XY.*

**Figura 15**

*Modelo digital de elevación del glaciar Gueshgue 2020*



*Nota:* Resolución: 0 m.0922/pix y Densidad de puntos 118 puntos/m<sup>2</sup>.

✓ **Descarga de modelos digitales de elevación**

Se descargó el DEM Shuttle Radar Topography Mission (SRTM) de 1 arc second V003 para el año 2000 (11-21/02/2000) y Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer (ASTER) para los años de 2007, 2010, 2016 y 2020 de 30 m de resolución espacial o tamaño de pixel. Se descargó de la página de NASA (<https://search.earthdata.nasa.gov/search>) el SRTM con los siguientes ID S09W078.SRTMGL1.hgt.zip, S11W078.SRTMGL1.hgt.zip y S10W078.SRTMGL1.hgt.zip. y ASTER del METI AIST Data Archive System (MADAS) <https://gbank.gsj.jp/madas/map/index.html>. En el Anexo 2 se muestra los ID de cada una de escenas descargadas de ASTER.

✓ **Creación de mosaicos**

Para abarcar toda el área de estudio (Zonas 1-7) se creó mosaico a partir de las diferentes las escenas de imágenes ASTER del mismo año o años más próximos, A su vez éstas se encuentran en diferentes resoluciones que varían de 29 – 30 m, primero se creó un mosaico, luego se uniformizó a una misma resolución de pixel a 30 m y el mismo procedimiento para cada año de interés (2007, 2010, 2016 y 2020). La proyección del nuevo mosaico de coordenadas WGS-1984 a WGS 1984 Zona 18S con el *método cúbico* y con la herramienta *Project Raster* y finalmente se resampleó con la herramienta *Resample* por el *método cubico* a 30 m todo esto dentro del software Arcgis 10.4.

✓ **Crear áreas estables alrededor del área de influencia glaciar.**

Para crear áreas estables que no han sufrido cambios en el periodo de análisis, es decir, de aquellos sectores que permanecen inamovibles. Se procedió tomando como base los límites del área natural protegida (Parque Nacional Huascarán) y el inventario nacional de glaciares desarrollado por el INAIGEM, (2018), estas últimas solo aquellas superficies de glaciares pertenecientes a la Cordillera Blanca. Esta se elimina junto con aquellas zonas muy dinámicas como coberturas vegetales, lagunas, ríos, humedales, terrenos con pendientes menores de 15% y otras zonas más. Principalmente, el área estable está conformada por zonas rocosas.

✓ **Co-registro de los modelos de elevación digital**

De acuerdo a las pruebas iniciales de co-registro aplicado a los DEMs para las zonas estables al contorno de los glaciares de Cordillera Blanca, con pendiente de 5°, el error cuadrático medio (RMSE) es demasiado alto, por consecuente para mejorar estos errores de desplazamiento tanto horizontales y verticales, se desarrolló ajustes de acuerdo a diferentes pendientes de 5°, 10°, 15° y 20° como se muestra en la Tabla 12. Para ello se programó en sublime text lo referente al co-registro y los valores de desplazamiento se muestra en el link: [1.Iteraciones de desplazamiento con diferentes pendientes.pdf](#).

Los mejores resultados se obtuvieron con pendiente de 15° para DEM de 30 metros de resolución con RMSE de 31.48 luego de tres iteraciones. Después de realizar las pruebas iniciales de la programación y ajustar las líneas de código necesarias, se adoptó a una herramienta más sencilla de trabajar en ArcGis 10.4. como se muestra en la Figura 16.

**Tabla 12**

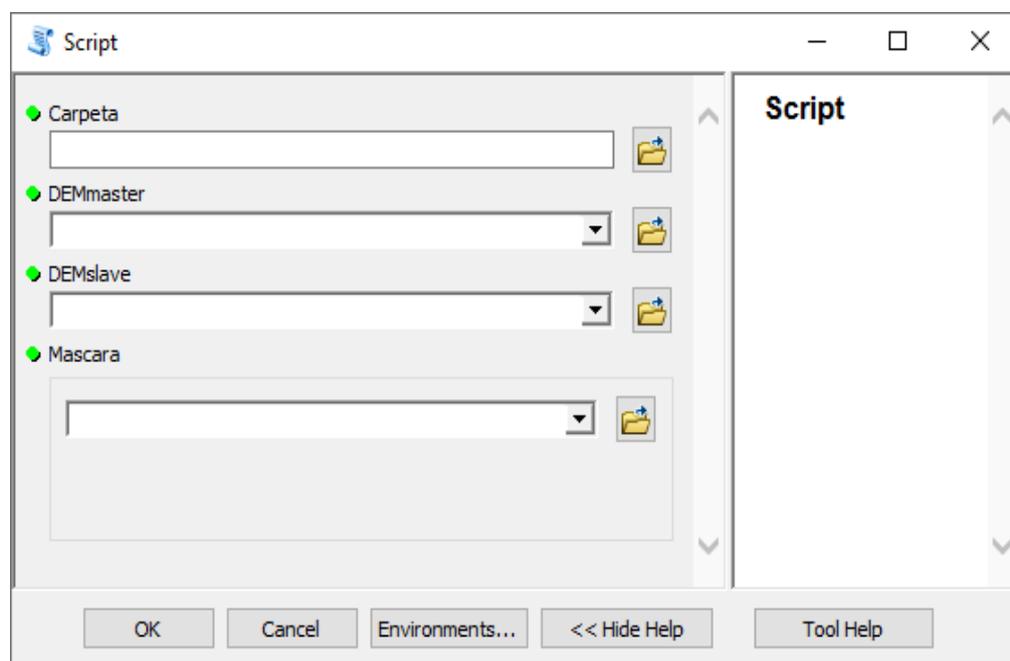
*Resultados de los diferentes desplazamientos*

Pendiente (°)	Iteración	dx	dy	dz	RSME
5	1	19	-14.3	5.8	41.09
	2	-11.5	16	-1.3	41.2
	3	18.4	-14.2	0.2	41.23
	4	-11.4	15.9	0	41.01
	<b>Total</b>	<b>14.5</b>	<b>3.4</b>	<b>4.7</b>	<b>164.53</b>
10	1	19.4	-14	5.8	35.22
	2	-10.6	16.1	-0.8	34.99
	3	19	-13.9	0	35.3
	<b>Total</b>	<b>27.8</b>	<b>-11.8</b>	<b>5</b>	<b>105.51</b>
15	1	19.4	-13.8	5.9	31.4
	2	-10.1	16.1	-0.6	30.97
	3	19.2	-13.6	0	31.48
	<b>Total</b>	<b>28.5</b>	<b>-11.3</b>	<b>5.3</b>	<b>93.85</b>
20	1	19.4	-13.8	5.9	31.4
	2	-10.1	16.1	-0.6	30.97
	3	19.2	-13.6	0	31.48
	<b>Total</b>	<b>28.5</b>	<b>-11.3</b>	<b>5.3</b>	<b>93.85</b>

*Nota:* Interacción y valores de RMSE con pendientes de 5°, 10°, 15° y 20°.

**Figura 16**

*Herramienta de trabajo creado para ArcGis.*



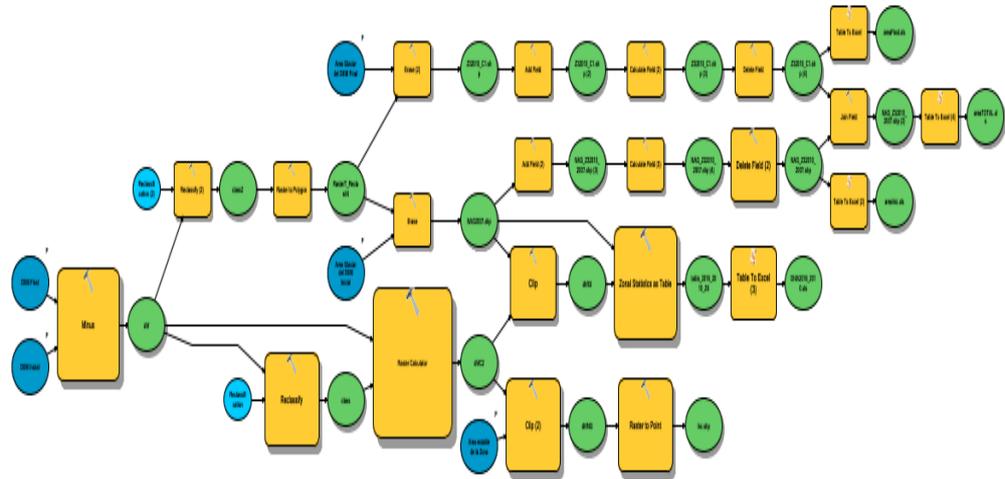
✓ **Balance de masa glaciar**

El balance de masa glaciar se realizó en el software ArcGIS, los DEMs corregidos organizados en un Geodatabase por zonas, al igual que las áreas glaciares y las zonas estables. Para automatizar los procesos que conlleva la determinación del balance de masa geodésico se elaboró el flujo de trabajo en ModelBuilder ver la Figura 17.

Los parámetros de entrada son los de color azul, en este caso los DEMs corregidos, áreas glaciares (inicial y final del periodo de análisis) y zona de estable. En el proceso es necesario la clasificación de la diferencia de alturas con base en la desviación estándar para ajustar el balance (color celeste), el color amarillo son las herramientas utilizadas y de color verde los resultados intermedios y finales.

**Figura 17**

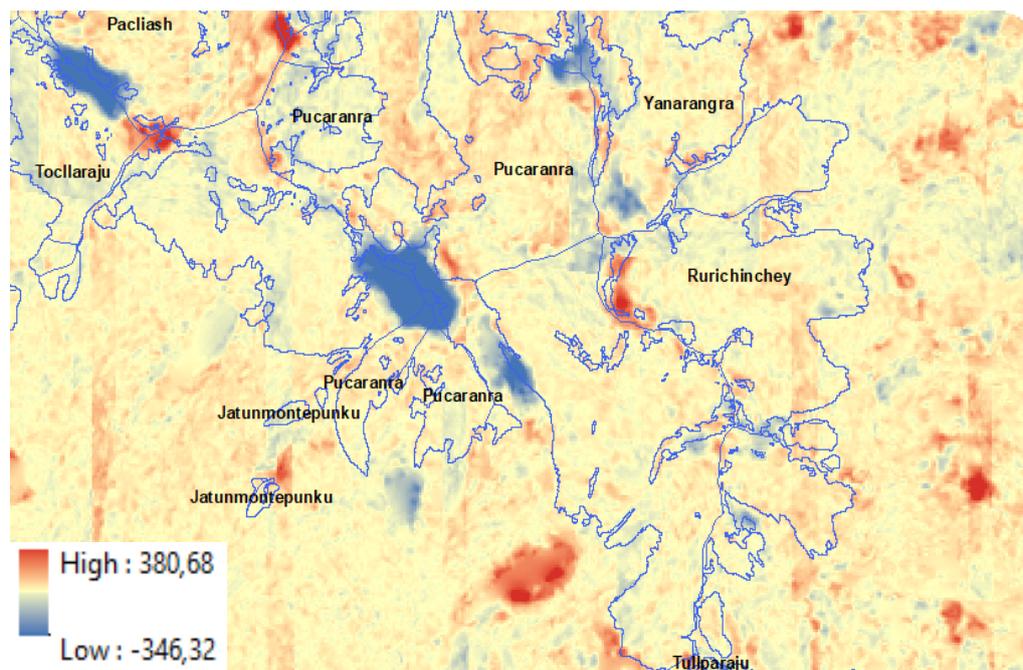
*Flujo de trabajo en ModelBuilder del balance de masa glaciar*



El cálculo de la diferencia de cotas ( $dh_f$ ) a partir de los DEMs corregidos, en este caso para el periodo (2016-2010), para ello se usa la herramienta “Minus”, dando como producto la diferencia ( $dh_f$ ).

**Figura 18**

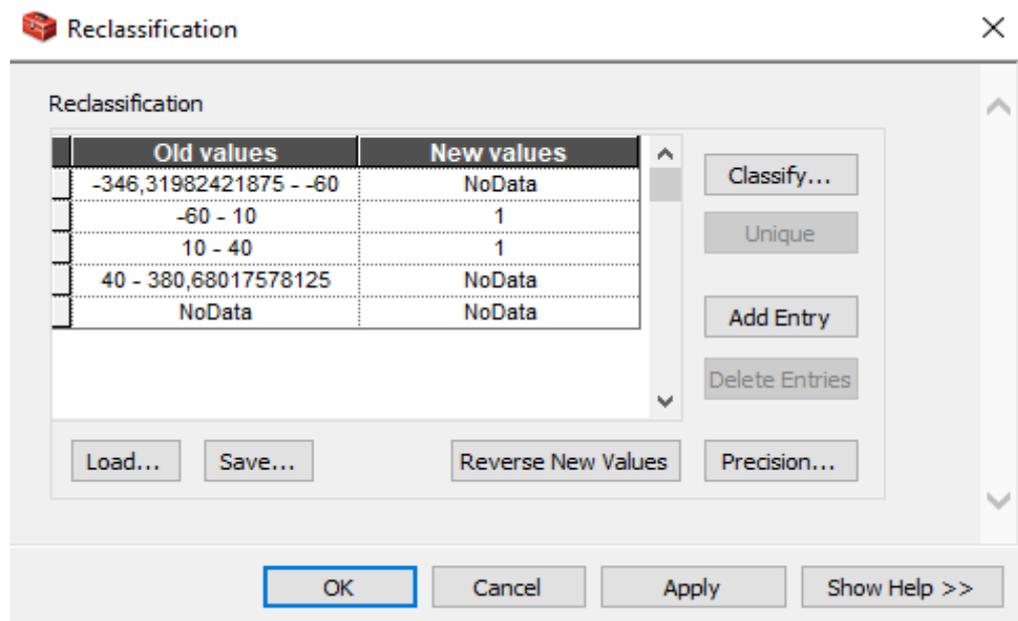
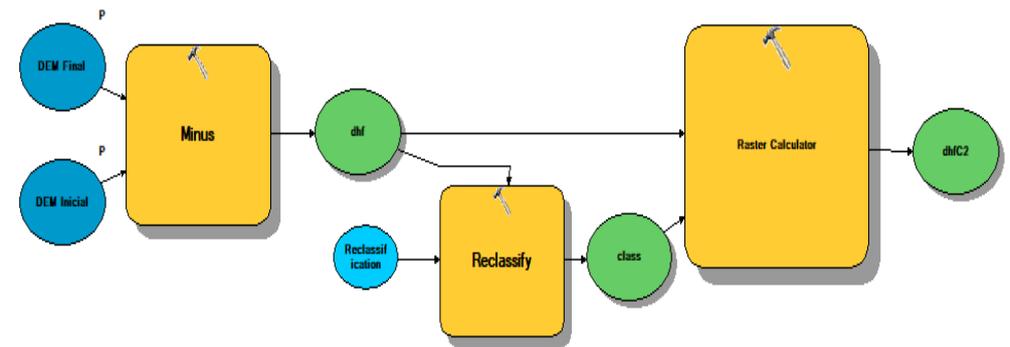
*Diferencia de altura del periodo 2016 – 2010*



Esta diferencia de altura tiene errores propios del proceso de generación del DEM, estos fueron corregidos de acuerdo con la desviación estándar de la diferencia altura como se muestra en la Figura 19.

**Figura 19**

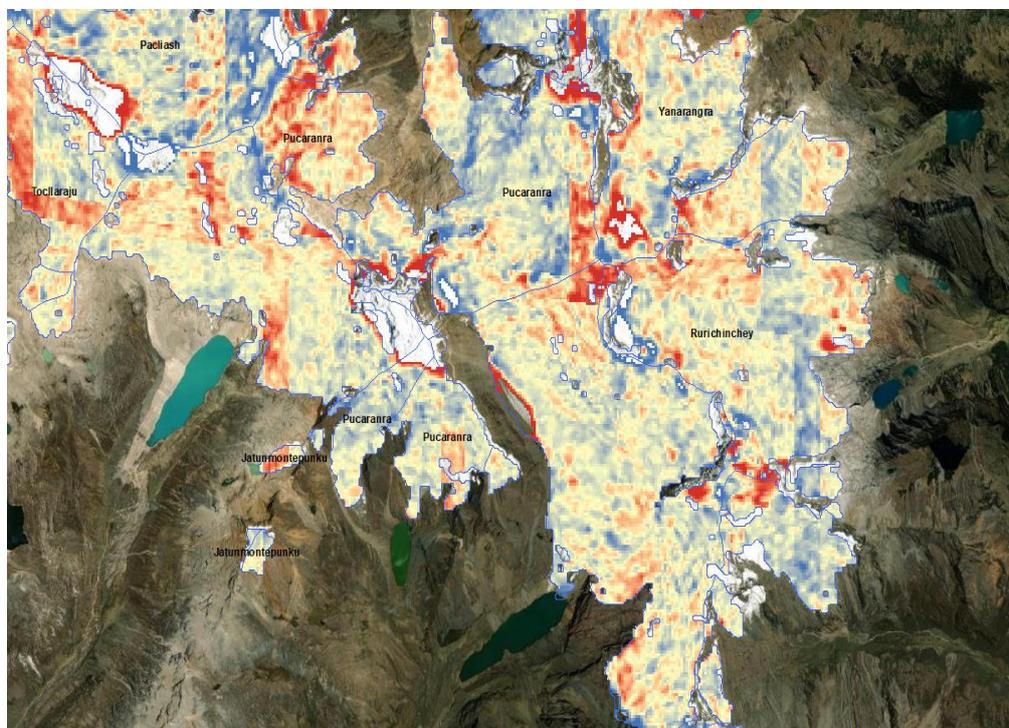
*Flujo y clasificación en base a la desviación estándar*



Eliminando estos errores de altura (dhfC2) se procedió a cortar con la superficie de los glaciares más antigua de acuerdo al periodo de análisis, en este caso del 2010 con la herramienta “Clip” para raster.

**Figura 20**

*Diferencia de altura en áreas glaciares*



El siguiente paso es la extracción de la estadística de los valores de la diferencia de cotas final por cada uno de los glaciares con la herramienta “Zonal Statistics as Table” (área, promedio, desviación estándar y suma), para posteriormente exportar a una hoja de Excel. Con las zonas estables se procedió a cortar la diferencia de altura (dhfC2) para calcular las incertidumbres, convirtiendo el archivo ráster a punto con la herramienta “Raster to Point”.

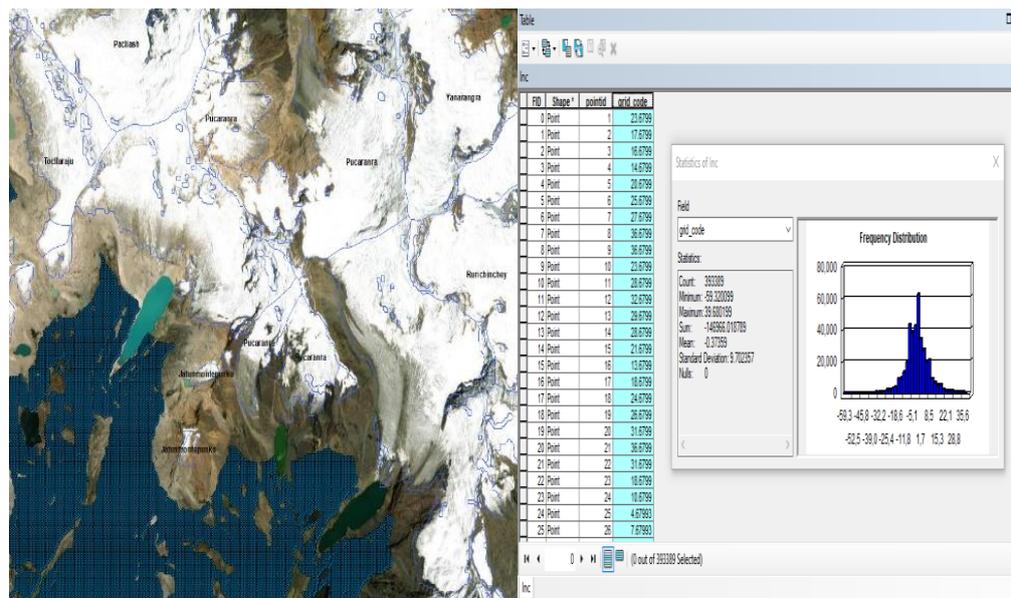
El resultado de este proceso se despliega la tabla de contenidos y sobre el atributo de diferencia de cotas se calcula las estadísticas “Statistics”, de donde se obtiene la desviación estándar “STDEV” (Standard Deviation) y el número de píxeles “n” (Count), para calcular el error aleatorio y el promedio (Mean) para calcular el error sistemático.

En el otro flujo de trabajo se realizó la clasificación inversa a la Figura 21 y este resultado se convirtió a polígono con la herramienta “Raster to Polygon”, para calcular las áreas glaciares en metros cuadrados de ambos periodos con

las correcciones realizados a base de la desviación estándar con la herramienta “Erase”. Una vez calculadas se junta con la herramienta “Join Field” para posteriormente exportar a una hoja de Excel.

**Figura 21**

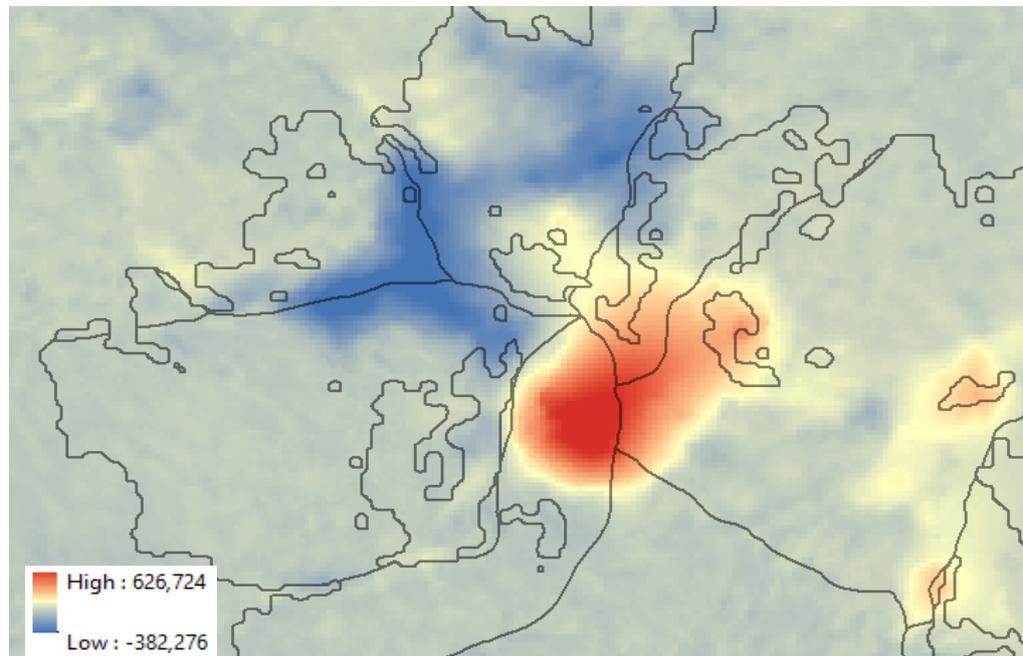
*Determinación de errores sistemático y aleatorio*



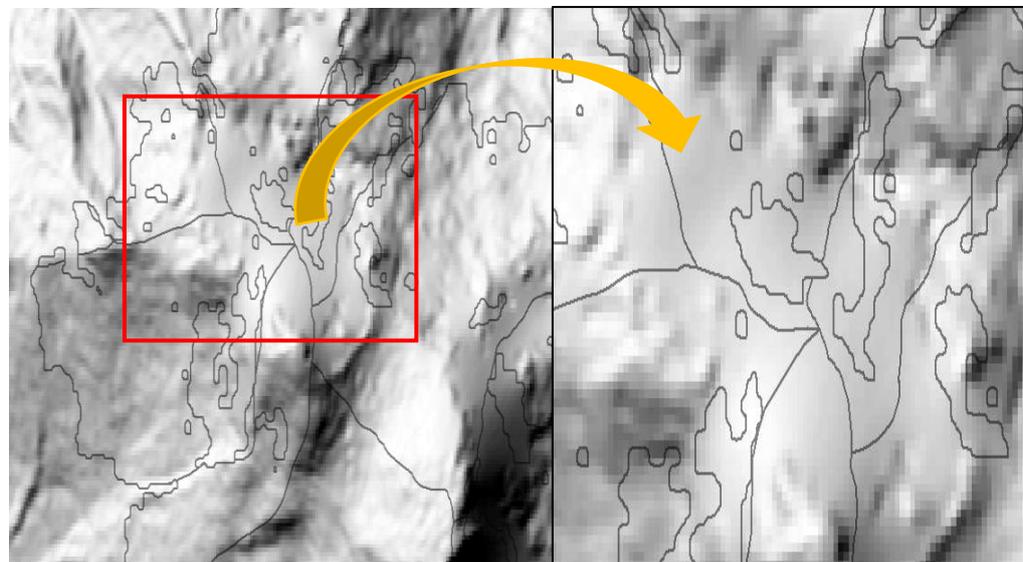
El balance de masa geodésico inicial necesita ajustes en función de la desviación estándar de la diferencia de alturas, muchos autores recomiendan como (J. Gardelle et al. 2013) utilizar proporciones de +3, -3 ganancia y pérdida, para ajustar la diferencia de cotas, en esta investigación esas proporciones varían de acuerdo al periodo, zona de estudio y calidad de los DEMs.

En la Figura 22 se observa la diferencia de altura, es muy superior (color rojo) y a la vez muy inferior (color azul) al promedio, concentrados en la parte más alta del glaciar Huascarán. Analizando los DEMs y la diferencia de altura con mapas de sombras, como se muestra en la Figura 23, las zonas de color rojo y azul tienen información no válida que puede estar relacionado con problemas de generación del DEM, factores climáticos u otros.

**Figura 22**  
*Diferencia de altura periodo 2020-2016*

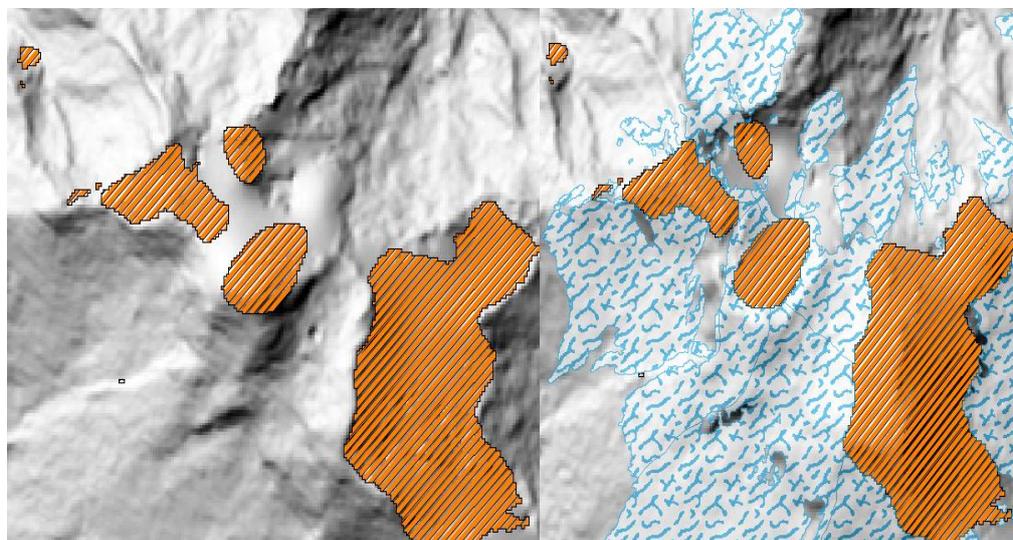


**Figura 23**  
*Mapa de sombra de la diferencia de altura de 2020-2016*



**Figura 24**

*Enmascaramiento de errores*



En la Tabla 13 se muestra los resultados de balance de masa con las diferentes proporciones de desviación estándar, el signo negativo representa pérdida (-) y el positivo la ganancia (+).

**Tabla 13**

*Variación del balance de masa y errores*

Proporción	$\Delta h$ (m)	$\Delta v$ (m <sup>3</sup> )	$\Delta M$ (Kg)	BM	BMa	$\sigma$	$\epsilon$	$\bar{\Delta h}$
-3, +3	-242947	-218652086	-190227315	-4.65	-1.16	0.23	-6.93	8.32
-3, +2	-473522	-426169789	-370767716	-9.26	-2.32	0.23	-6.93	0.61
-3, +1	-707375	-636637401	-553874539	-14.4	-3.60	0.22	-7.15	-19.3
-2, +1	-511628	-460465306	-400604816	-10.6	-2.66	0.22	-7.15	-11.6
-2, +2	-277787	-250008245	-217507173	-5.55	-1.38	0.23	-6.92	7.14
-2, +3	-46641	-41977015	-36520003	-0.91	-0.23	0.23	-6.92	14.64
-1, +1	-225263	-202736464	-176380723	-4.97	-1.24	0.22	-6.90	-2.95
-1, +2	8578	7720597	6716919	0.18	0.05	0.22	-6.68	15.13
-1, +3	239712	215741276	187694909	4.95	1.24	0.22	-6.68	22.59
-1/2, +1/2	-206580	-185922489	-161752566	-5.01	-1.25	0.17	-6.66	-3.72
-1/3, +1/3	-188155	-169339835	-147325657	-4.87	-1.22	0.15	-6.10	-3.48

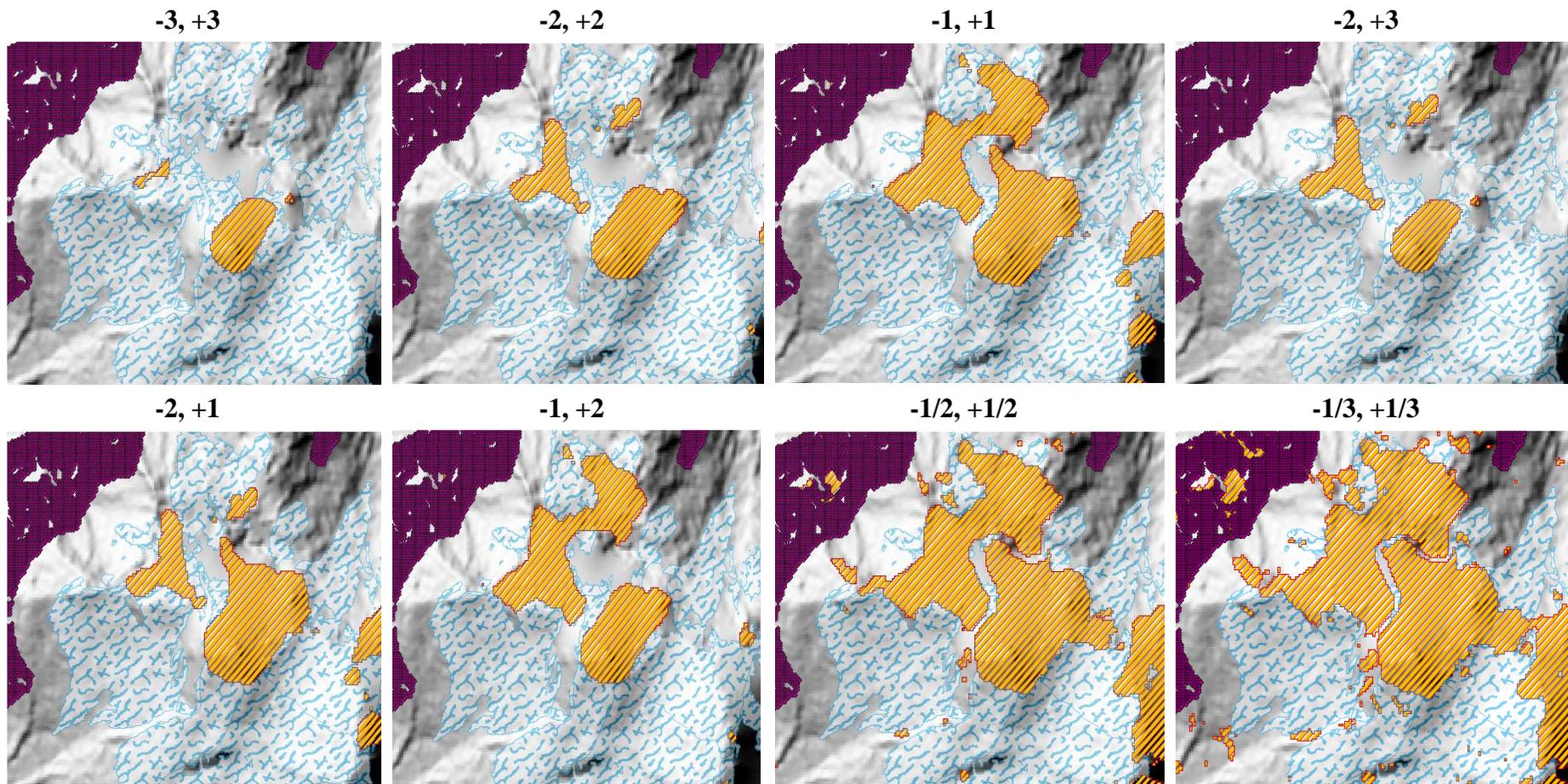
NOTA:  $\Delta h$ : Suma de la diferencia de cotas (m),  $\Delta v$ : Variación de volumen (m<sup>3</sup>),  $\Delta M$ : Variación de masa (m<sup>3</sup>), **BM**: Balance de masa (m w.e.), **BMa**: Balance de masa anual (m w.e. a<sup>-1</sup>),  $\sigma$ : Error aleatorio,  $\epsilon$ : Error sistemático y  $\bar{\Delta h}$ : altura promedio (m).

Los resultados más apropiados están de las proporciones de  $(-1/3, +1/3)$ ,  $(-1/2, +1/2)$  y  $(-1, +1)$  con balance de masa negativo en los tres casos y altura promedio de -2.9 y -3.73 m, el resto de los balances son positivos, el error sistemático es mayor a los errores aleatorios.

En la Figura 25 se presenta los resultados de enmascaramiento, las diferentes proporciones con base en la desviación estándar, las relaciones de  $(-1, +1)$ ,  $(-1/2, +1/2)$  y  $(-1/3, +1/3)$ . En la Figura 26 se muestran las diferentes variaciones (polígono negro). La proporción de  $-1, +1$  es el más adecuado para este periodo y zona. Los mismos análisis se realizó para los demás periodos y zonas.

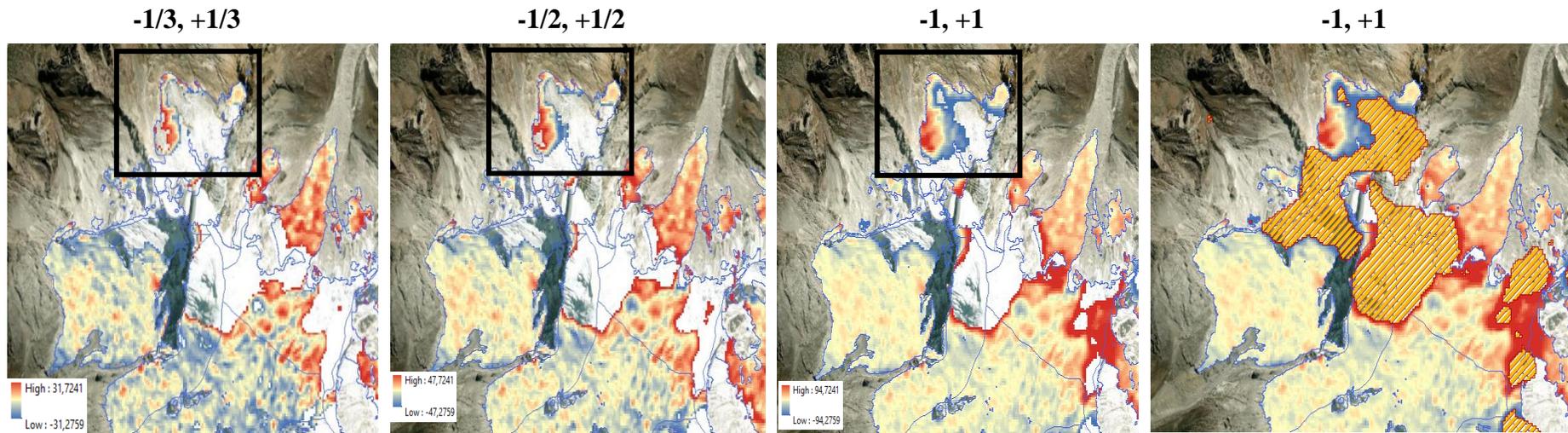
**Figura 25**

*Enmascaramiento en base a las proporciones de desviación estándar*



**Figura 26**

*Elección del enmascaramiento más apropiado*



*Nota:* El enmascaramiento más adecuado es de las siguientes proporciones ( $-1/3, +1/3$ ), ( $-1/2, +1/2$ ) y ( $-1, +1$ ) que en general muestran errores sistemáticos de -6.101, -6.660 y -6.903 respectivamente, las primeras dos proporciones eliminan demasiada información en algunos glaciares.

### c) Obtención de Precipitación y Temperatura

La precipitación y la temperatura fueron obtenidas de las diferentes investigaciones y productos de la reanálisis, como los siguientes: La temperatura y precipitación para los glaciares (Artesonraju, Cuchillacocha y Shallap) tomados de Fyffe et al. (2021) estas han sido obtenidas del modelo WRF (Weather Research and Forecasting) a una resolución de 4 km de 1980 a 2018. La precipitación de las estaciones de Querococha y Paron fueron tomadas de Alata Quispe, (2019) del 1962 al 2000, los datos faltados fueron completadas con el modelo HEC-4.

La temperatura y precipitación total fueron estimados de ERA5 2 m para toda la Cordillera Blanca en la plataforma de GEE desde el año de 1979 en adelante. Esta información fue sometida a la comprobación de la calidad de datos, como primer punto se realizó la limpieza de valores atípicos y llenado de datos faltantes. Posteriormente, estos datos fueron sometidos a pruebas de homogeneidad de Pettitt, SNHT (Prueba de homogeneidad normal estándar), Buishand y von Neumann, y para detectar las tendencias en las series climáticas se aplicó la prueba de Mann Kendall.

## 3.4. Población y muestra

### a) Población

La población está constituida por los glaciares de la Cordillera Blanca.

### b) Muestra

La muestra está constituida por los glaciares de las unidades hidrográficas Lullán (Artesonraju), Quillcay (Llaca) y Yanayacu (Gueshgue). Esto debido al ámbito de intervención del proyecto PERÚGROWS y a la disponibilidad de información glaciológica.

## 3.5. Técnicas e instrumentos de recolección de datos

**Observación indirecta:** comprendió el análisis de imágenes satelitales, modelos de elevación digital y datos climáticos.

**Análisis documental:** se desarrolló la revisión de artículos científicos, tesis, inventarios, estudios glaciológicos, reportes, guías y manuales.

**Análisis de contenido:** consistió en el procesamiento de áreas glaciares, modelos de elevación digital, balance de masa en sistemas de información geográfica y análisis de datos climáticos.

**Tabla 14**

*Técnicas e instrumentos de recolección de datos*

<b>Etapas</b>	<b>Técnicas</b>	<b>Metodología</b>	<b>Instrumento</b>	<b>Referencias</b>	<b>Fuente de información</b>
<b>Análisis multitemporal de cobertura glaciar</b>	Índice Diferencial normalizado de nieve (NDSI).	Se realizó la clasificación de imágenes Landsat MSS 5 y ETM 8 entre los años 2000 a 2020 mediante el NDSI.	Clasificación automatizada en la plataforma en la nube de Google Earth Engine	Modificado de Todd H., (2002).	USGS Landsat 5 y 8
<b>Análisis del balance de masa</b>	Método geodésico	El balance de masa se realizó a partir de diferencia de modelos de elevación digital.	Script de registro de Herramientas GIS	Modificado de (Kääb, 2005; Nuth & Kääb, 2011)	-Fotografías aéreas -SRTM - ASTER
<b>Análisis de la precipitación total anual y temperatura media anual</b>	Análisis histórico	Se realizó la corrección de los datos meteorológicos del SENAMHI, asimismo, los datos In-situ y reanálisis.	Análisis de tendencia		-Datos meteorológicos del SENAMHI -Reanálisis
<b>Análisis de influencia de la temperatura y precipitación con el balance de masa</b>	Análisis estadístico	Se realizó las correlaciones de la temperatura y precipitación con el balance de masa glaciar	Coefficiente de correlación de Pearson		Resultados en hojas de calculo

### 3.6. Procesamiento y análisis estadístico de la información

Para el procesamiento, análisis e interpretación de la información se emplearon las siguientes pruebas estadísticas.

- Estadística descriptiva: cálculo de promedios, desviación estándar, valores promedio para los datos de temperatura y acumulada para la precipitación.
- Análisis de correlaciones: se empleó el coeficiente de correlación de Pearson como prueba estadística para estimar la correlación lineal entre las variables de temperatura y precipitación y balance de masa.
- Cálculo de errores: error cuadrático medio, desviación estándar, error sistemático y error aleatorio.

Programas utilizados para el procesamiento y análisis de los datos:

- ArcGIS: análisis vectorial (área glaciar y zonas estables) y ráster (mapa de sombras, pendientes y aspecto), cálculos de variación de balance de masa, estadística espacial (errores aleatorios y sistemáticos), automatización de procesos con la herramienta de ModelBuilder y elaboración de mapas temáticos.
- Google Earth Engine: plataforma en la nube para la clasificación y análisis de área glaciares con base en el lenguaje de programación de JavaScript.
- Sublime Text: programación en lenguaje de Python 3. y ejecución del script de co-registro.
- Agisoft Metashape: orientar imágenes RPAS y fotografías aéreas, generación de nube de puntos densa, modelos de elevación digital y ortomosaico.
- GIMP: realce de las fotografías, ajustes de la intensidad de brillo y contraste.
- Mendeley: gestor de citas bibliográficas APA 7ma edición.
- Google Earth: visualizaciones del área de estudio.

## CAPÍTULO IV

### RESULTADOS

#### 4.1. Área glaciár

El área glaciár para la Cordillera Blanca comprendida entre los años de 1962 a 2020 se muestran en la Tabla 15 y la Figura 27 y de las unidades hidrográficas en la Figura 28.

**Tabla 15**

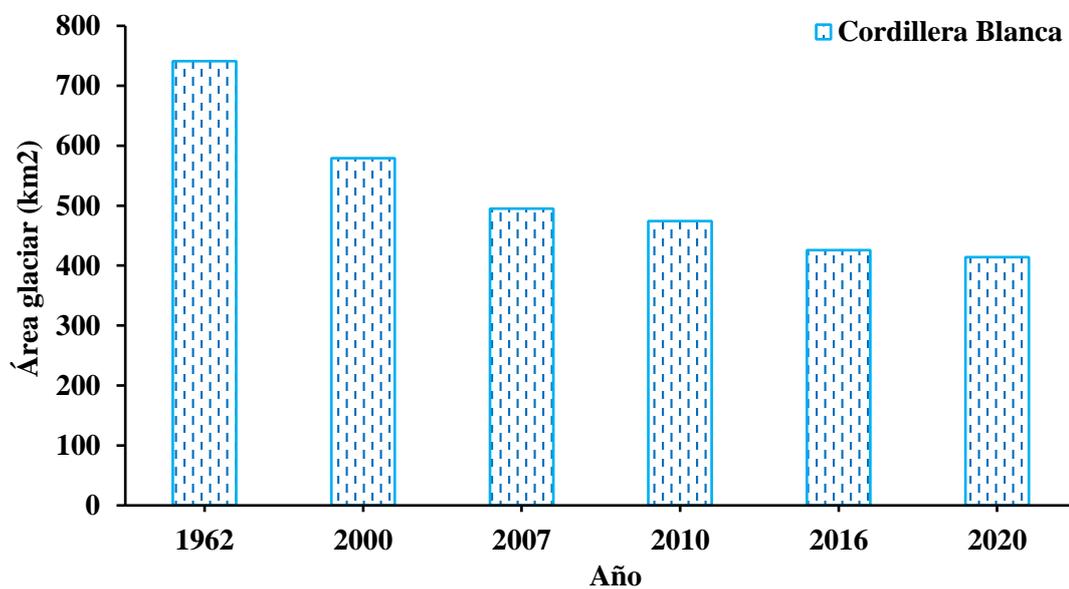
*Área glaciár para la Cordillera Blanca y unidades hidrográficas*

<b>Año</b>	<b>Llullán (Km<sup>2</sup>)</b>	<b>Quillcay (Km<sup>2</sup>)</b>	<b>Yanayacu (Km<sup>2</sup>)</b>	<b>Cordillera Blanca (Km<sup>2</sup>)</b>
<b>1962*</b>	33.815	46.477	16.838	740.982
<b>2000</b>	31.150	40.265	11.531	579.074
<b>2007</b>	25.180	33.400	8.170	495.211
<b>2010</b>	23.980	31.685	6.973	474.300
<b>2016</b>	20.549	28.000	5.979	425.819
<b>2020</b>	21.651	29.238	5.446	413.926

*Nota:* \* información tomada del INAIGEM, del siguiente enlace: <https://inaigem.maps.arcgis.com/home/item.html?id=b75935ac23db4b7dbc9512059e2ccad6>. Información trabajada por la Corporación Peruana del Santa y Electroperu, publicada por Hidrandina S.A. en 1989.

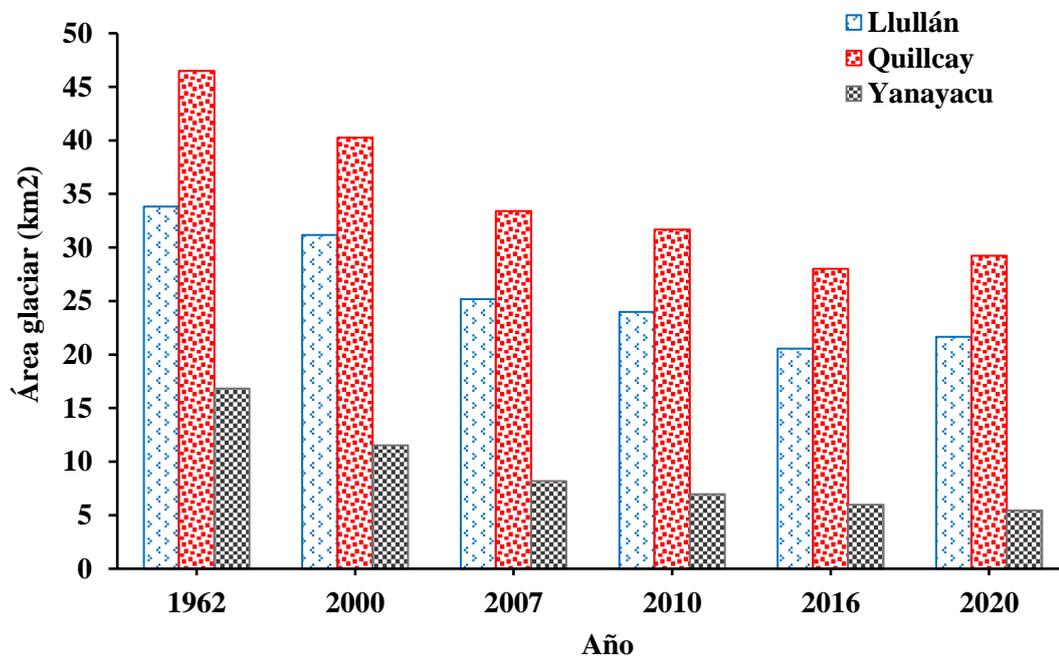
**Figura 27**

*Área glaciar para la Cordillera Blanca.*



**Figura 28**

*Área glaciar de las unidades hidrográficas.*



## 4.2. Balance de masa glaciar

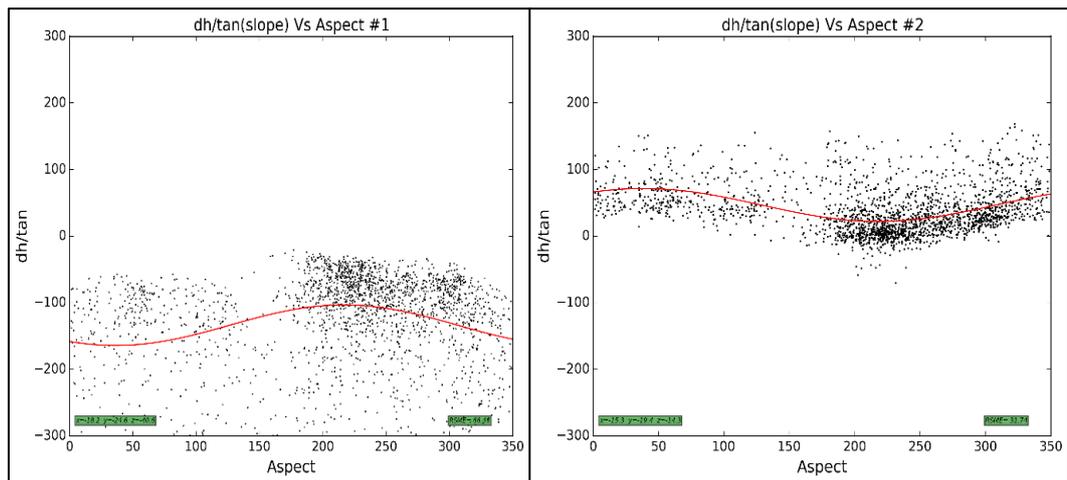
### a) A nivel de glaciares

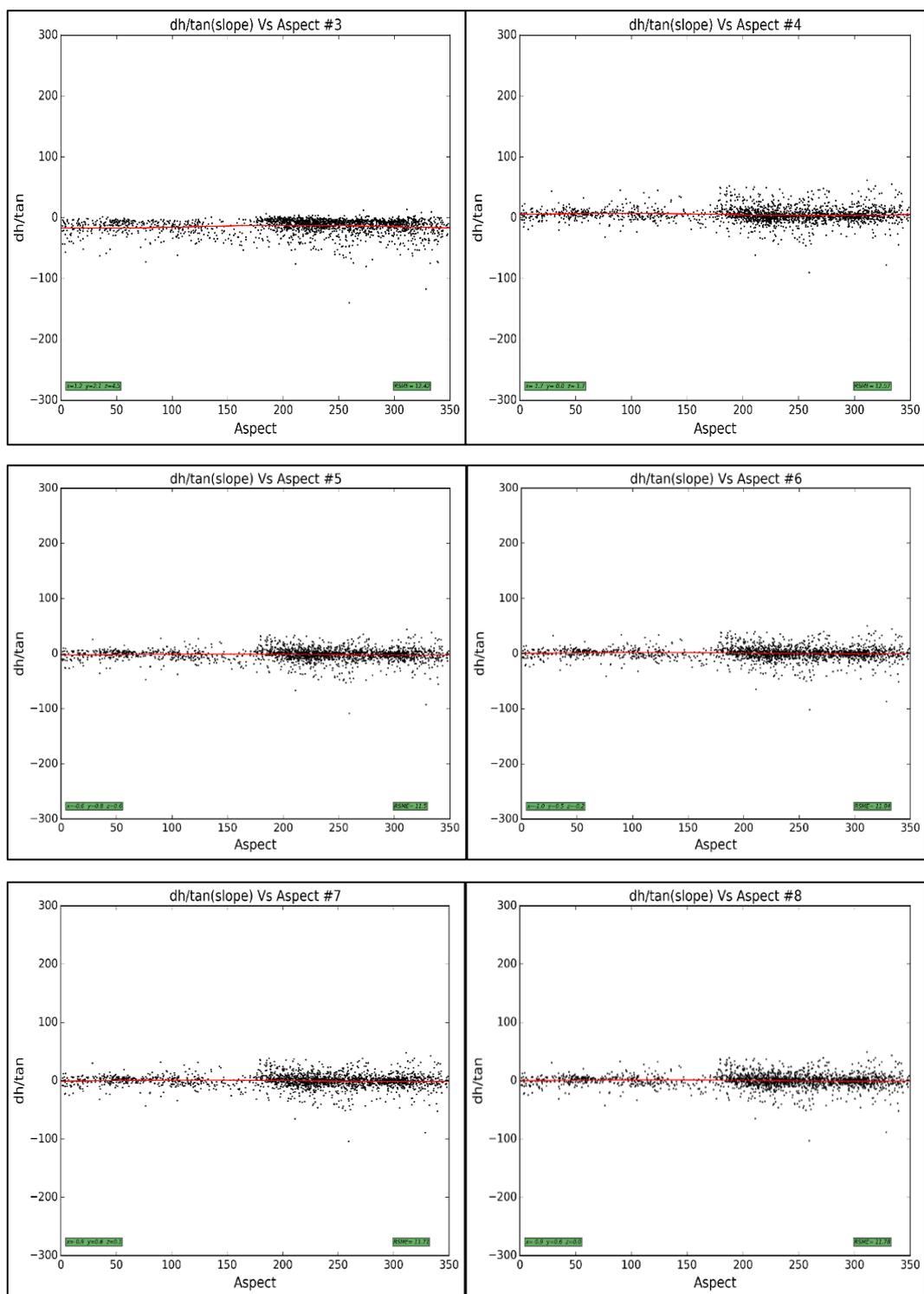
El balance de masa del glaciar Gueshgue entre el periodo de 1962 y 2020 tiene los siguientes resultados: el co-registro es de 8 iteraciones, ver la Tabla 16 y en la Figura 29 la dispersión de las diferencias de elevación entre DEMs.

**Tabla 16**  
*Datos de corrección para el desplazamiento*

Iteración	$\Delta x$	$\Delta y$	$\Delta z$	RSME
1	-18.2	-24.6	-40.6	66.46
2	15.3	19.4	14.3	31.74
3	-1.2	-2.1	-4.5	12.42
4	1.7	0	1.7	12.57
5	0.6	-0.8	-0.6	11.5
6	1	-0.5	0.2	11.84
7	0.9	-0.6	-0.1	11.71
8	0.9	-0.6	0	11.78
<b>Total</b>	<b>1</b>	<b>-9.8</b>	<b>-29.6</b>	<b>170.02</b>

**Figura 29**  
*Dispersión de las diferencias de elevación entre DEMs.*





El balance de masa para el glaciar Gueshgue a una resolución espacial de 10 m entre el periodo de 1962-2020 es el siguiente: considerando una densidad constante en el tiempo y en los diferentes partes del glaciar de  $0.85 \text{ gr/cm}^3$  ver la Tabla 17 y la Figura 30 el cambio del glaciar Gueshgue.

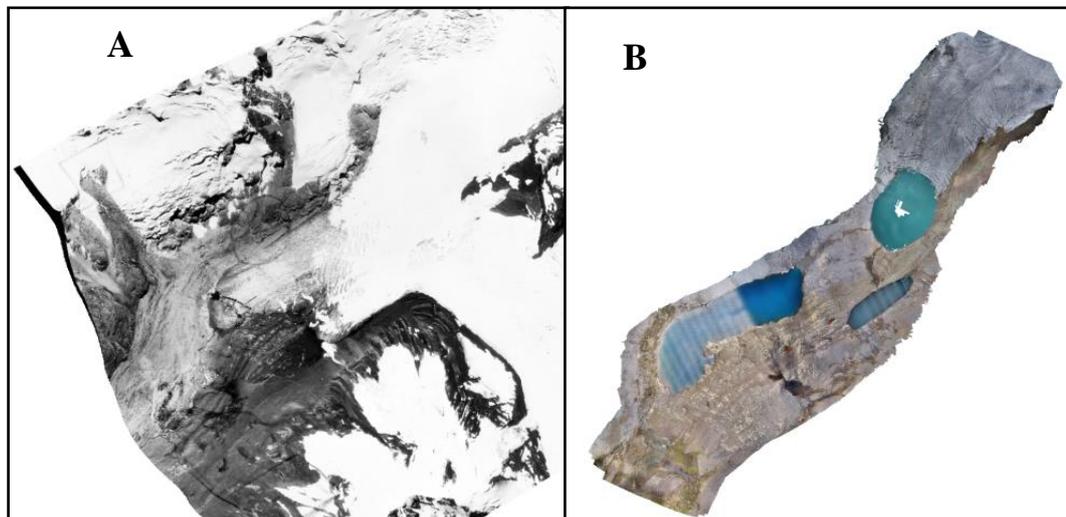
**Tabla 17**

*Balance de masa Gueshgue 10m*

Datos-Balance de masa	Valores
$\rho$ (gr cm <sup>-3</sup> )	0.85
$r^2$ (m <sup>2</sup> )	100
$\Delta h$ (m)	-1261034.227
S (área promedio)	970305.888
t (tiempo en años)	58
$\Delta v$ (variación de volumen)	<b>-126103422</b>
mm eq. agua	<b>-1.949</b>
<b><u>Error aleatorio</u></b>	
STDEV (standard deviation)	2.945
n (Count)	2914
según la formula	<b>0.109</b>
<b><u>Error sistemático</u></b>	
dh estable (Mean)	<b>-1.116</b>

**Figura 30**

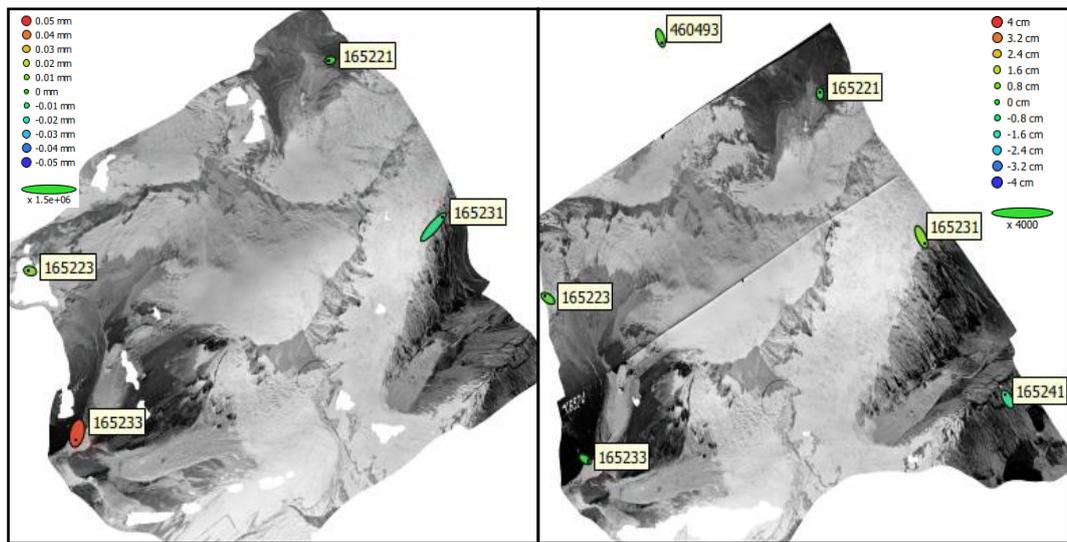
*Glaciar Gueshgue de 1962 y 2020*



*Nota:* Variación de la lengua glaciar Gueshgue. **A:** Reconstrucción de ortofoto a partir de fotografías aéreas del 1962. **B:** Ortofotos con información levantada de RPAS del año 2020.

El balance de masa del glaciar Artesonraju y Llaca no se realizó porque los modelos de elevación digital de 1962 generados a partir de fotografías aéreas sobreestiman la altura en los picos de los glaciares, ver la Figura 31.

**Figura 31**  
Glaciar Artesonraju de 1962



Balance de masa estimado para los glaciares de Artesonraju y Yanamarey entre 2000 y 2020 a partir de los DEMs de 30 m de resolución espacial se muestra en la Tabla 18 y las Figuras 32 y 33.

**Tabla 18**

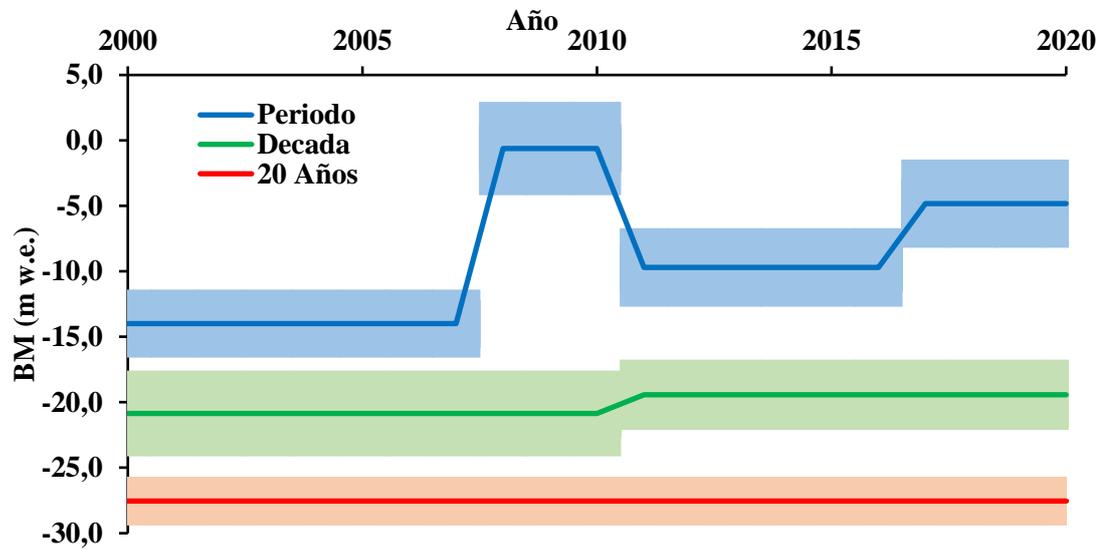
*Balance de masa de los glaciares de Artesonraju y Yanamarey*

	Año	$\Delta h$ (m)	$\overline{\Delta h}$ (m a <sup>-1</sup> )	$\overline{S}$ (m <sup>2</sup> )	$\Delta v$ (m <sup>3</sup> )	$\Delta M$ (Kg)	BM (m w.e.)	BMa (m w.e. a <sup>-1</sup> )
Artesonraju	2000-2007	-54672	-1.32	5070177	-48481291	-41209097	-8.13 ± 0.5	-1.16 ± 0.1
	2007-2010	-98914	-5.92	5036942	-89039952	-75683959	-15.03 ± 2.7	-5.01 ± 0.9
	2010-2016	-44546	-1.37	4717862	-40034056	-34028947	-7.21 ± 0.1	-1.20 ± 0.1
	2016-2020	-36238	-1.70	4952695	-32050815	-27243193	-5.50 ± 0.5	-1.38 ± 0.1
	2010-2000	-82408	-1.34	5271904	-74174317	-63048169	-11.96 ± 0.8	-1.19 ± 0.1
	2020-2010	-41713	-0.72	5152299	-37555887	-31922504	-6.19 ± 2.1	-0.62 ± 0.2
	2020-2000	-139702	-1.12	5234106	-12522034	-10643729	-20.34 ± 0.7	-1.02 ± 0.1
Yanamarey	2000-2007	-11641	-1.91	622357	-10229608	-8695167	-13.99 ± 1.7	-2.0 ± 0.2
	2007-2010	-299.5	-0.20	348910	-251901	-214116	-0.62 ± 0.5	-0.21 ± 0.2
	2010-2016	-2916	-1.85	230935	-2623960	-2230366	-9.70 ± 0.6	-1.62 ± 0.1
	2016-2020	-1349	-1.34	194964	-1103570	-938035	-4.83 ± 0.2	-1.21 ± 0.1
	2010-2000	-13772	-1.59	505427	-12391470	-10532749	-20.85 ± 0.7	-2.09 ± 0.1
	2020-2010	-5063	-1.96	199138	-4522296	-3843952	-19.42 ± 0.1	-1.94 ± 0.1
	2020-2000	-14042	-0.97	392936	-12732091	-10822278	-27.54 ± 0.8	-1.38 ± 0.1

NOTA:  $\Delta h$ : Suma de la diferencia de cotas (m),  $\overline{\Delta h}$ : Altura promedio (m a<sup>-1</sup>),  $\overline{S}$ : Área promedio de los periodos (m<sup>2</sup>),  $\Delta v$ : Variación de volumen (Kg),  $\Delta M$ : Variación de masa (m<sup>3</sup>), BM: Balance de masa (m w.e.) y BMa: Balance de masa anual (m w.e. a<sup>-1</sup>).

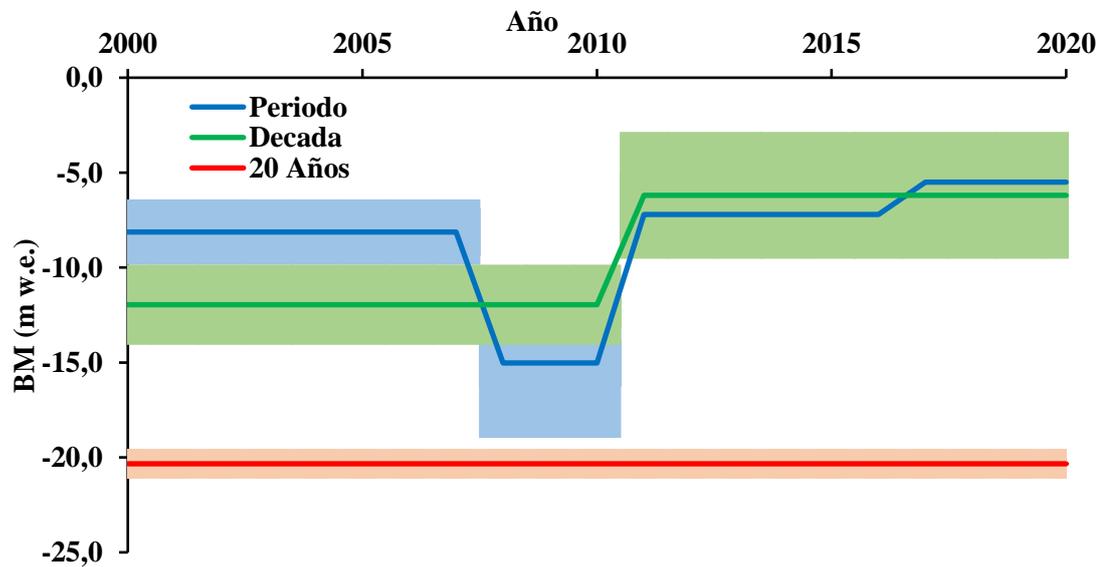
**Figura 32**

*Balance de masa en el glaciar Yanamarey*



**Figura 33**

*Balance de masa en el glaciar Artesonraju*

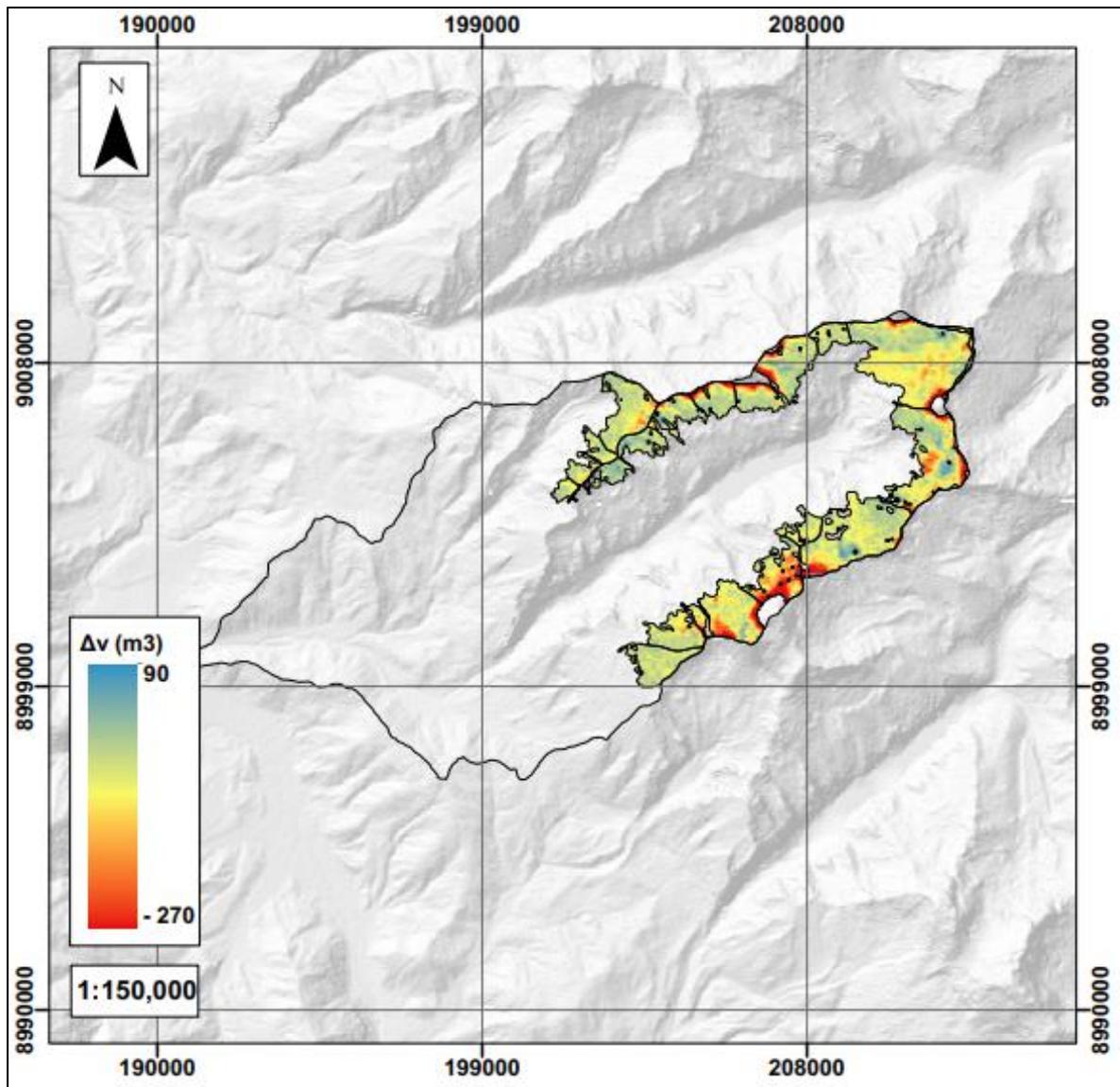


**b) A nivel de Unidades hidrográficas**

El balance de masa glaciar en las unidades hidrográficas de Lullán, Quillcay y Yanayacu, se muestra en la Tabla 18, en las Figuras 34 a 36 la variación de volumen y en la Figura 37 la comparación del balance de masa de las unidades.

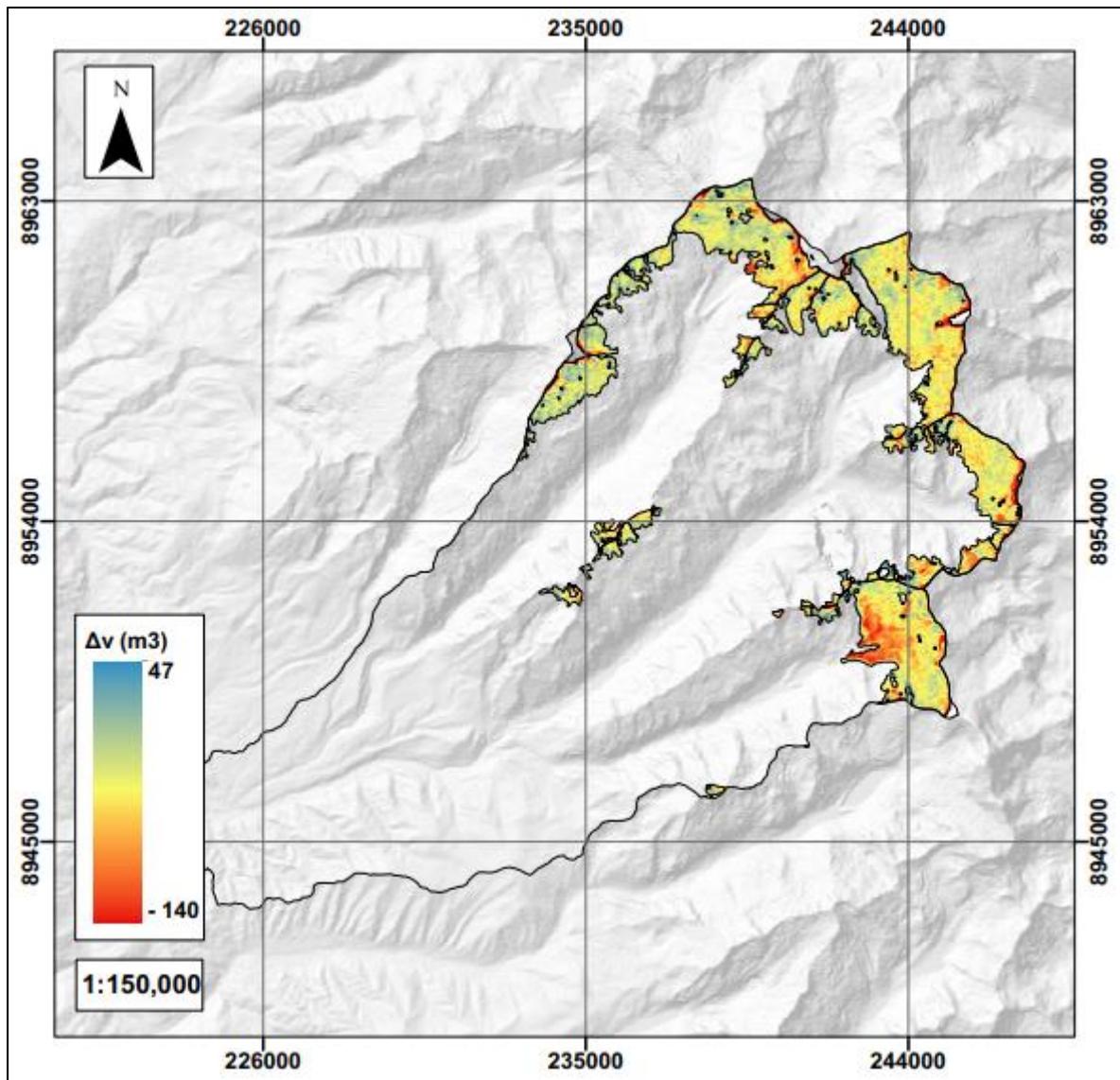
**Figura 34**

*Variación de volumen de 2000-2020 en la unidad hidrográfica de Lullán*



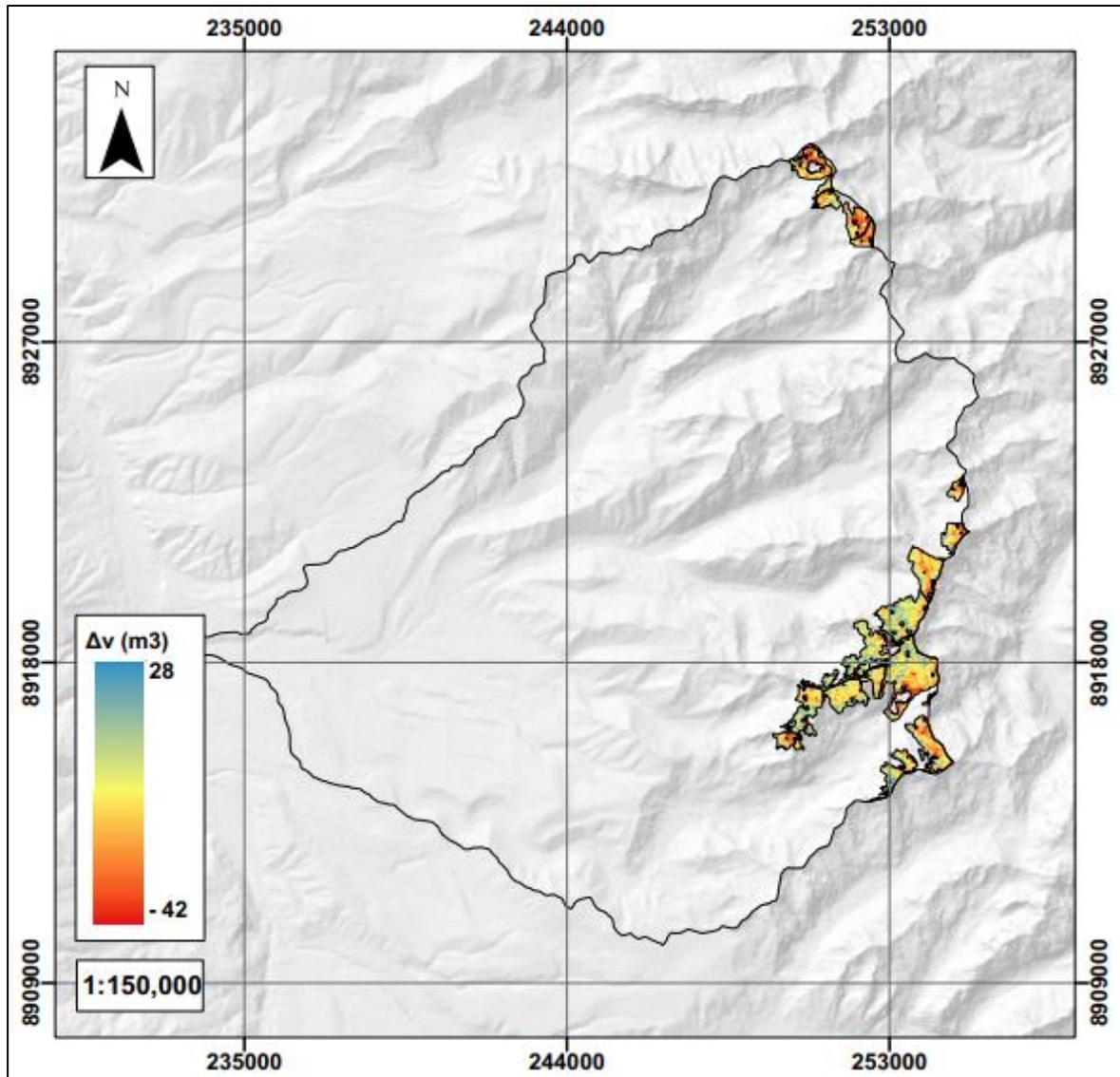
**Figura 35**

*Variación de volumen de 2000-2020 en la unidad hidrográfica de Quillcay*



**Figura 36**

*Variación de volumen de 2000-2020 en la unidad hidrográfica de Yanayacu*



**Tabla 19**

*Balance de masa glaciar en las unidades hidrográficas*

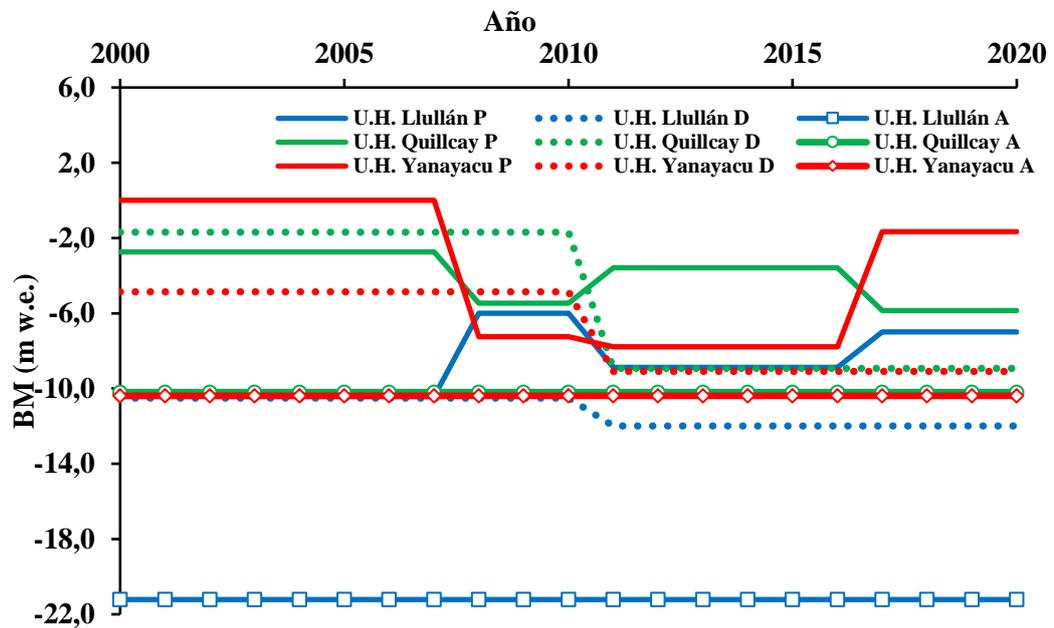
UH	Periodos	$\Delta h$ (m)	$\bar{S}$ (m <sup>2</sup> )	$t$	$\Delta v$ (m <sup>3</sup> )	$\Delta M$ (Kg)	BM (m w.e.)	BMa (m w.e. a-1)	STDEV	n	$\sigma$	$\epsilon$	Error BM	Error BMa	$\overline{\Delta h}$ (m a <sup>-1</sup> )
Lullán	2007-2000	-357795	26264558	7	-322015539	-273713208	-10.42	-1.49	20.9	116690	±0.12	0.5	0.46	0.07	-2.57
	2010-2007	-182616	23286711	3	-164354756	-139701543	-5.99	-2.00	19.6	115738	±0.12	-2.7	2.68	0.89	-0.71
	2016-2010	-237968	20504048	6	-214171401	-182045691	-8.87	-1.48	19.8	115906	±0.12	0.0	0.12	0.02	-2.36
	2020-2016	-186688	20410898	4	-168019429	-142816515	-6.99	-1.75	20.8	116527	±0.12	0.5	0.50	0.12	-3.79
	2010-2000	-360299	26222567	10	-324269681	-275629229	-10.51	-1.05	21.4	116968	±0.13	-0.8	0.85	0.08	-0.80
	2020-2010	-354919	22647479	10	-319426666	-271512666	-11.99	-1.19	19.7	116805	±0.12	1.3	1.25	0.13	-1.16
	2020-2000	-699799	25232371	20	-629819557	-535346623	-21.22	-1.06	23.3	116856	±0.14	0.7	0.71	0.04	-1.04
Quilcay	2007-2000	-125627	35076605	7	-113064147	-96104525	-2.74	-0.39	13.4	394215	±0.04	-0.7	0.71	0.10	-0.26
	2010-2007	-219147	30634861	3	-197232272	-167647431	-5.47	-1.82	8.7	384605	±0.03	-1.1	1.07	0.36	-1.41
	2016-2010	-132363	28220817	6	-119126292	-101257348	-3.58	-0.59	7.9	387324	±0.03	-0.8	0.82	0.14	-0.63
	2020-2016	-208836	27279783	4	-187952421	-159759558	-5.86	-1.46	9.6	379871	±0.03	-0.8	0.88	0.22	-1.32
	2010-2000	-74787	33810939	10	-67308243	-57212007	-1.69	-0.17	17.6	393973	±0.06	-1.4	1.41	0.14	-0.10
	2020-2010	-337378	28897534	10	-303639848	258093871	-8.93	-0.89	11.4	392987	±0.04	-0.3	0.30	0.03	-0.75
	2020-2000	-440941	33098715	20	-396846870	-337319839	-10.19	-0.51	14.5	394778	±0.05	-1.0	1.01	0.05	-0.35
Yanayacu	2007-2000	72	7768573	7	65544	55713	0.01	0.01	12.1	475757	±0.04	-1.7	1.67	0.24	0.22
	2010-2007	-69499	7329237	3	-62549269	-53166879	-7.25	-2.42	15.1	495681	±0.04	-0.5	0.49	0.16	-2.77
	2016-2010	-65385	6428561	6	-58846444	-50019477	-7.78	-1.29	10.3	492729	±0.03	-0.6	0.57	0.10	-1.20
	2020-2016	-12149	5603712	4	-10934513	-9294336	-1.66	-0.42	16.3	493307	±0.05	0.2	0.22	0.05	-0.81
	2010-2000	-56886	8952196	10	-51197459	-43517839	-4.86	-0.49	13.5	494981	±0.04	-0.6	0.64	0.06	-0.34
	2020-2010	-72915	6135768	10	-65623562	-55780027	-9.09	-0.91	14.2	493270	±0.04	0.1	0.07	0.01	-1.02
	2020-2000	-105743	7788507	20	-95168275	-80893034	-10.39	-0.52	11.5	488801	±0.03	-0.4	0.35	0.02	-0.44

NOTA:  $f\Delta v$ : Factor de cambio volumétrico (0.850),  $p^2$ : Área de pixel (900 m<sup>2</sup>),  $\Delta h$ : Suma de la diferencia de cotas (m),  $\bar{S}$ : Área promedio de los periodos (m<sup>2</sup>),  $t$ : Años transcurridos del periodo de análisis,  $\Delta v$ : Variación de volumen (m<sup>3</sup>),  $\Delta M$ : Variación de masa (Kg), **BM**: Balance de masa (m w.e.), **BMa**: Balance de masa anual (m w.e. a<sup>-1</sup>), **n**: Número de pixeles evaluados en terrenos estables,  $\sigma$ : Error aleatorio,  $\epsilon$ : Error sistemáticos, **Error BM**: Error de balance de masa, **Error BMa**: Error de balance de masa anual y  $\overline{\Delta h}$ : Altura promedio (m a<sup>-1</sup>).



**Figura 37**

*Balance de masa en las unidades hidrográficas*



El balance de masa glaciar en las unidades hidrográficas de Llullán, Quillcay y Yanayacu entre el 2000 y 2020 es de  $-21.217 \pm 0.713$  m w.e.,  $-10.190 \pm 1.01$  m w.e. y  $-10.386 \pm 0.35$  m w.e. respectivamente y balance anual de  $-1.061 \pm 0.035$  m w.e.  $a^{-1}$ ,  $-0.510 \pm 0.029$  m w.e.  $a^{-1}$  y  $-0.519 \pm 0.007$  m w.e.  $a^{-1}$ .

Los balances de masa decanal (líneas punteadas) son más negativos en las tres unidades hidrográficas para el periodo de 2010-2020, con  $-11.989 \pm 1.254$  m w.e.,  $-8.931 \pm 0.295$  m w.e. y  $-9.091 \pm 0.072$  m w.e. y balance anual de  $-1.199 \pm 0.125$  m w.e.  $a^{-1}$ ,  $-0.893 \pm 0.030$  m w.e.  $a^{-1}$  y  $-0.909 \pm 0.007$  m w.e.  $a^{-1}$ . El balance anual más negativo se registró para el periodo de 2007-2010 con  $-2.000 \pm 0.892$  m w.e.  $a^{-1}$ ,  $-1.824 \pm 0.358$  m w.e.  $a^{-1}$  y  $-2.418 \pm 0.162$  m w.e.  $a^{-1}$ . La pérdida de espesores mayores fue entre 2016-2020 en Llullán de  $-3.79$  m  $a^{-1}$ , 2007-2010 en Quillcay y Yanayacu de  $-1.41$  m  $a^{-1}$  y  $-2.77$  m  $a^{-1}$  respectivamente.

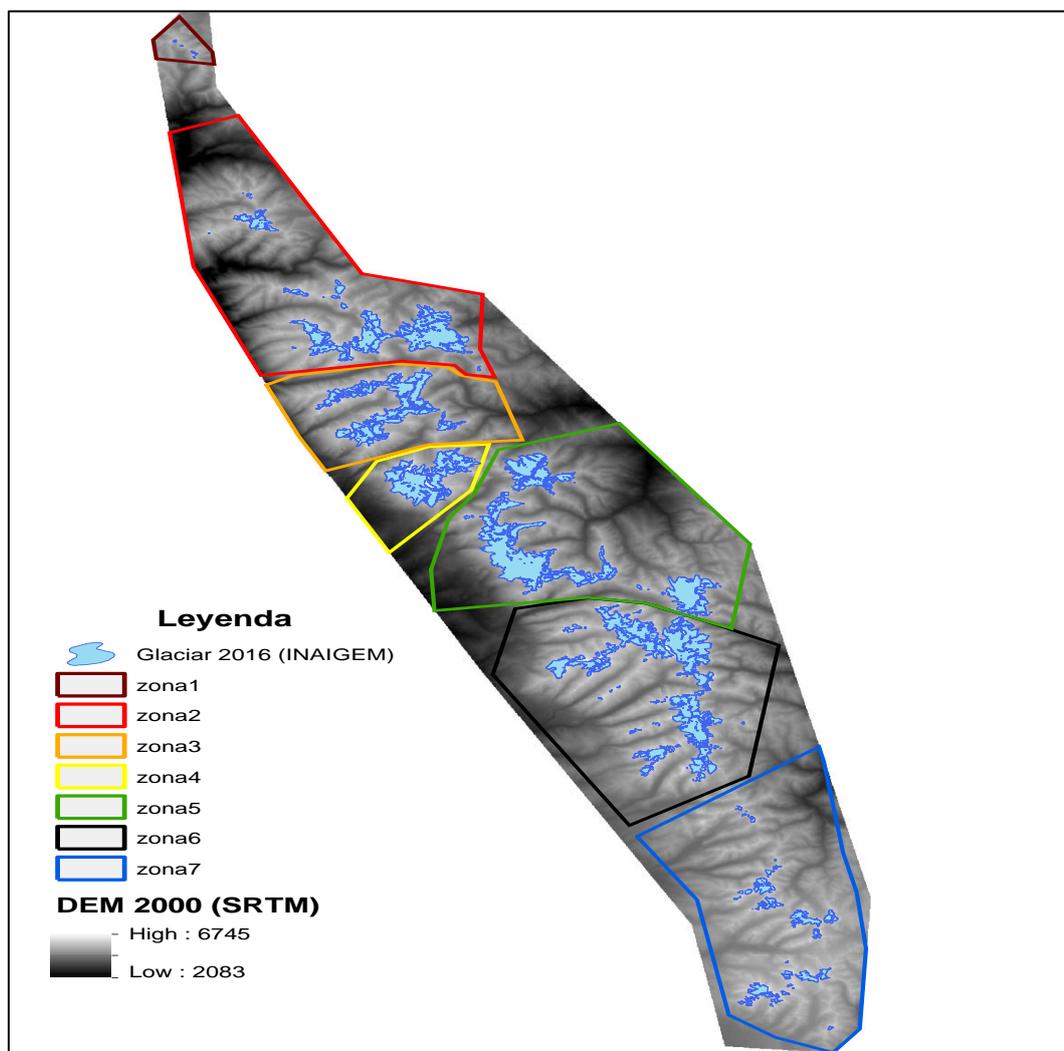
**c) A nivel de Cordillera Blanca**

El balance de masa de la Cordillera Blanca con DEMs de 30 m, en la Figura 38 se muestra las siete zonas trabajadas, estas zonas fueron elegidas con la finalidad de

mejorar los tiempos de procesamiento y corregir aquellas zonas donde el mosaico de los DEMs no son los adecuados. En las Figuras 39-45 se muestra los desplazamientos de co-registro con base al DEM de referencia SRTM del 2000 y los demás años con ASTER. Cada uno de ellos por sus respectivas zonas, mayor información en el link: [Dispersión de las diferencias de elevación entre DEMs Cordillera Blanca.pdf](#), con todas las iteraciones. En las Figuras 46-52 muestra las variaciones de volúmenes por zonas para el periodo de 2000-2020.

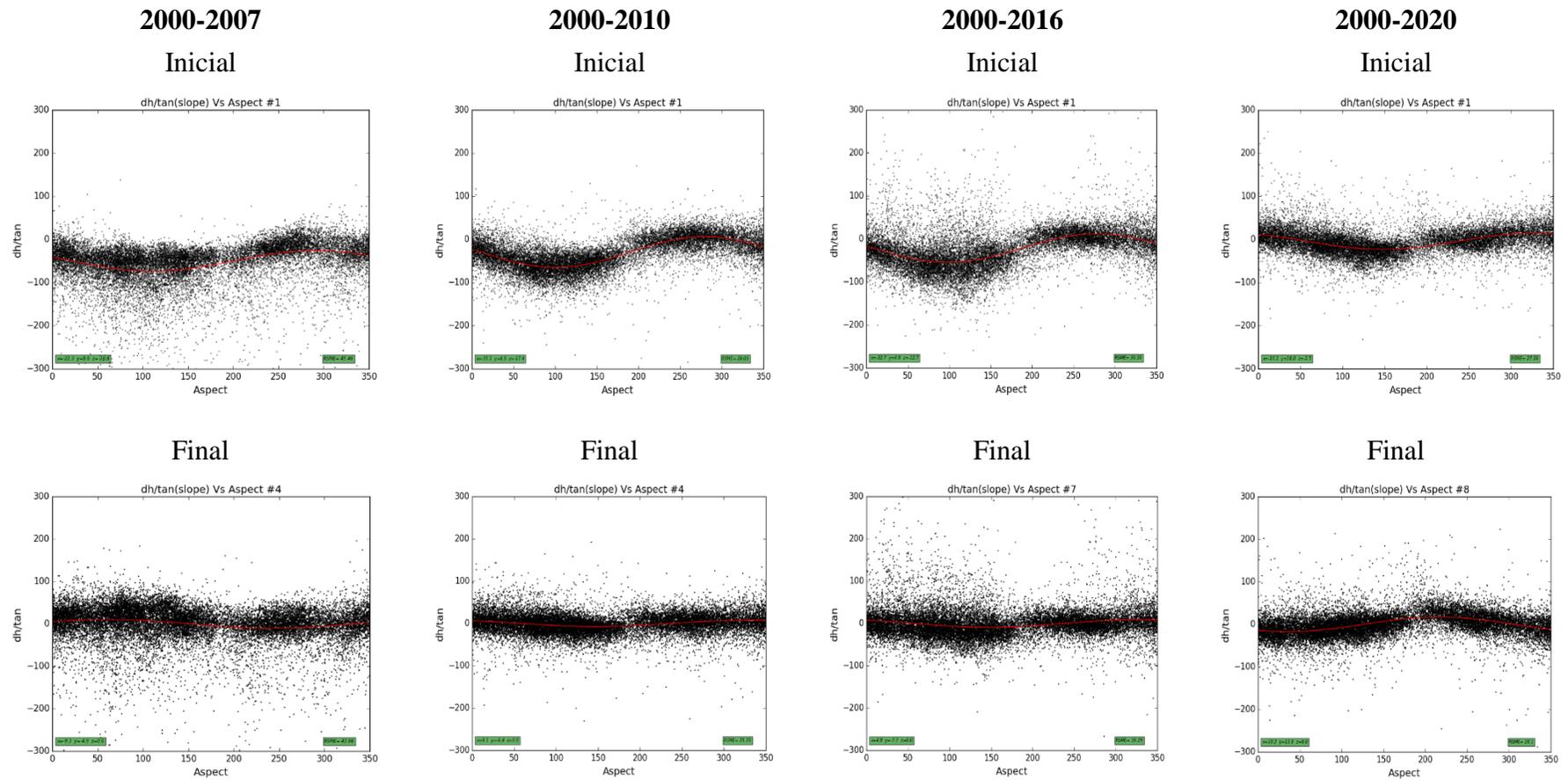
### Figura 38

*Zonas de trabajo en la Cordillera Blanca*



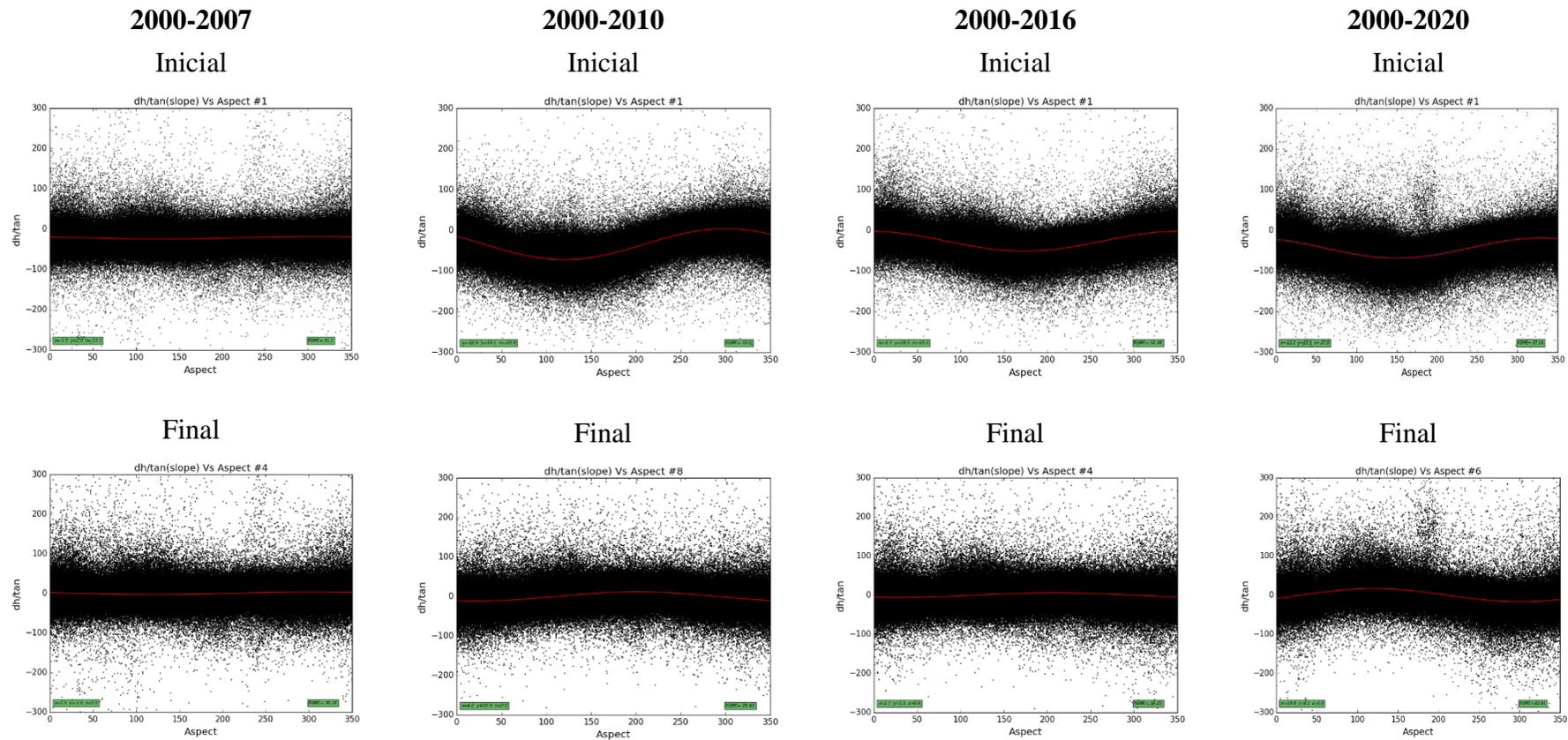
**Figura 39**

*Dispersión de las diferencias de elevación entre DEMs de la Zona 1*



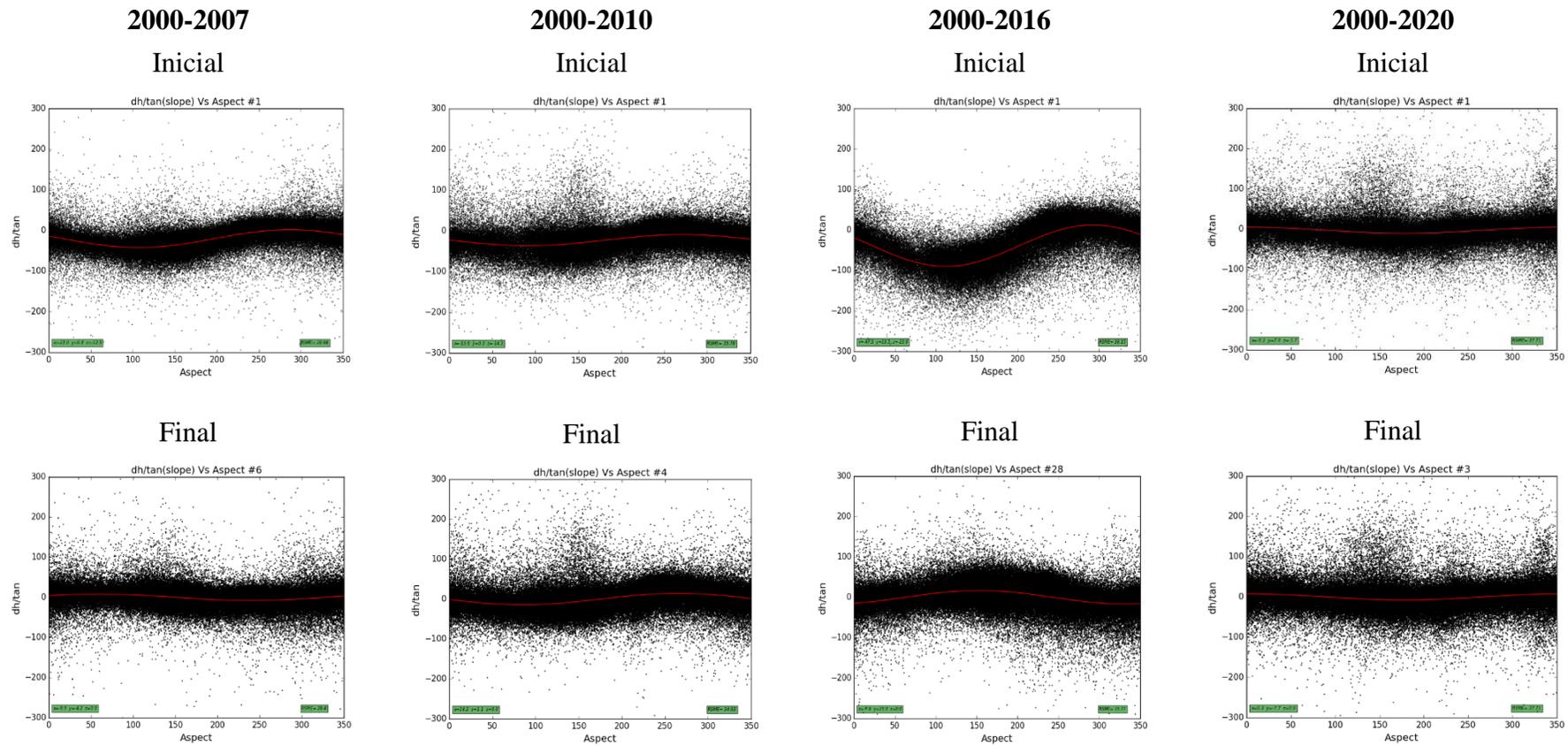
**Figura 40**

*Dispersión de las diferencias de elevación entre DEMs de la Zona 2*



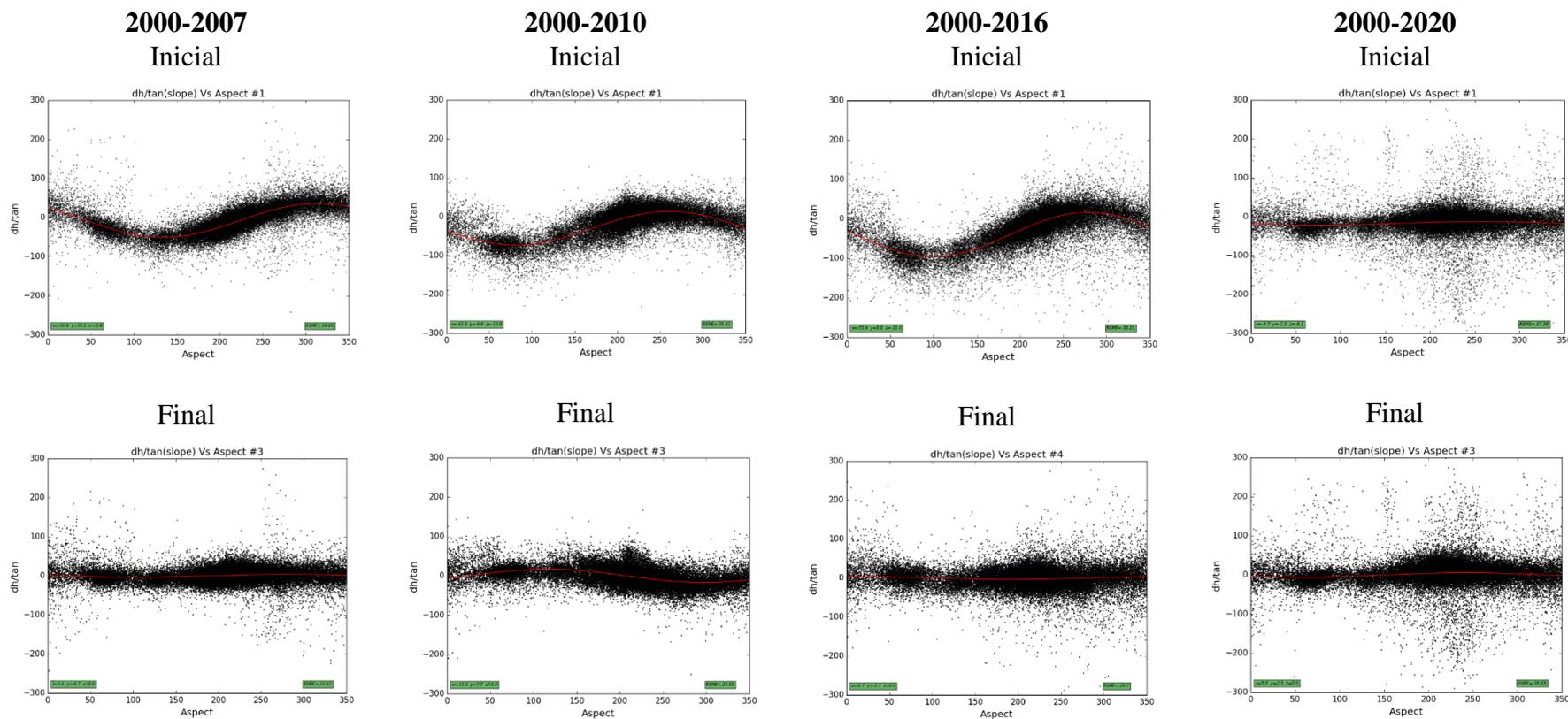
**Figura 41**

*Dispersión de las diferencias de elevación entre DEMs de la Zona 3*



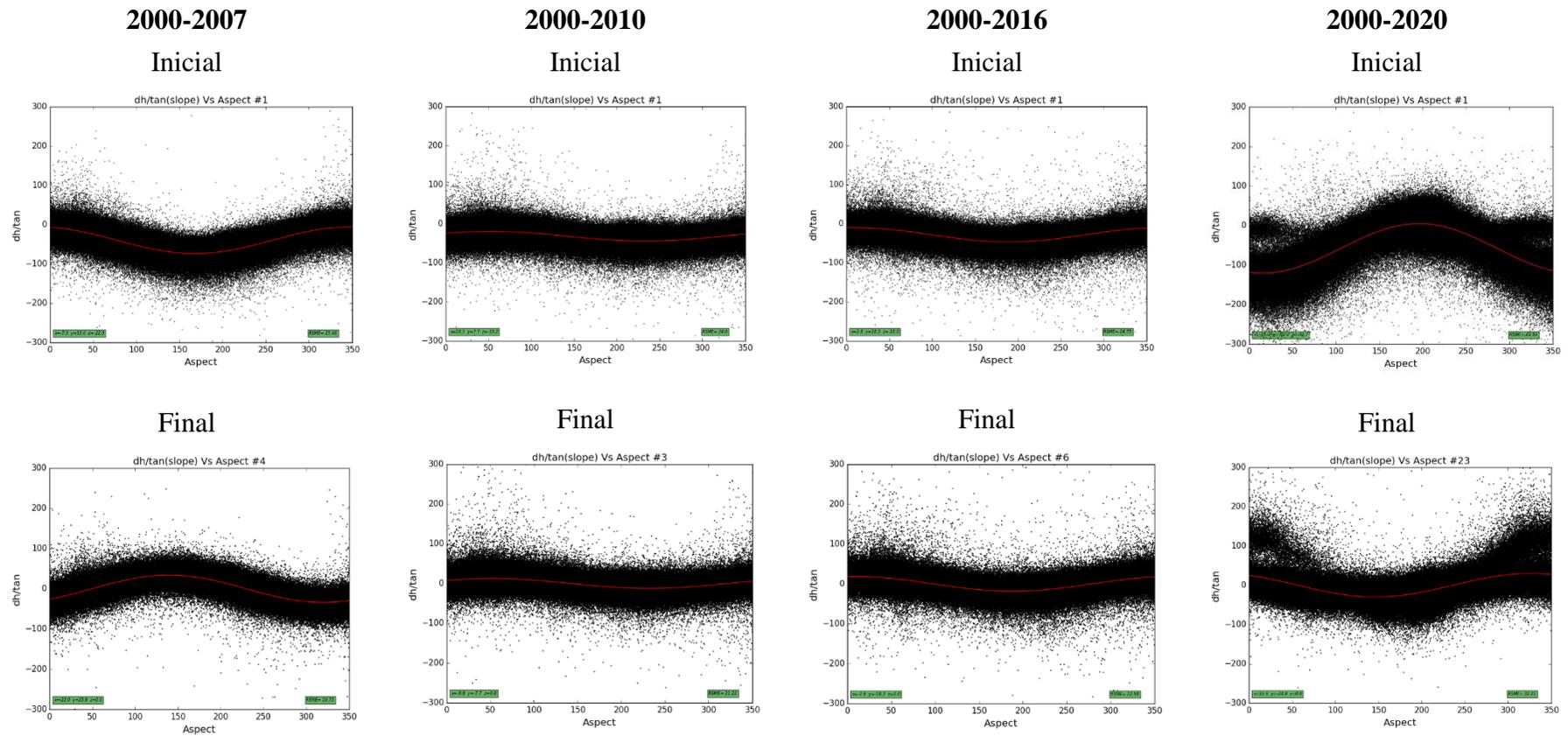
**Figura 42**

*Dispersión de las diferencias de elevación entre DEMs de la Zona 4*



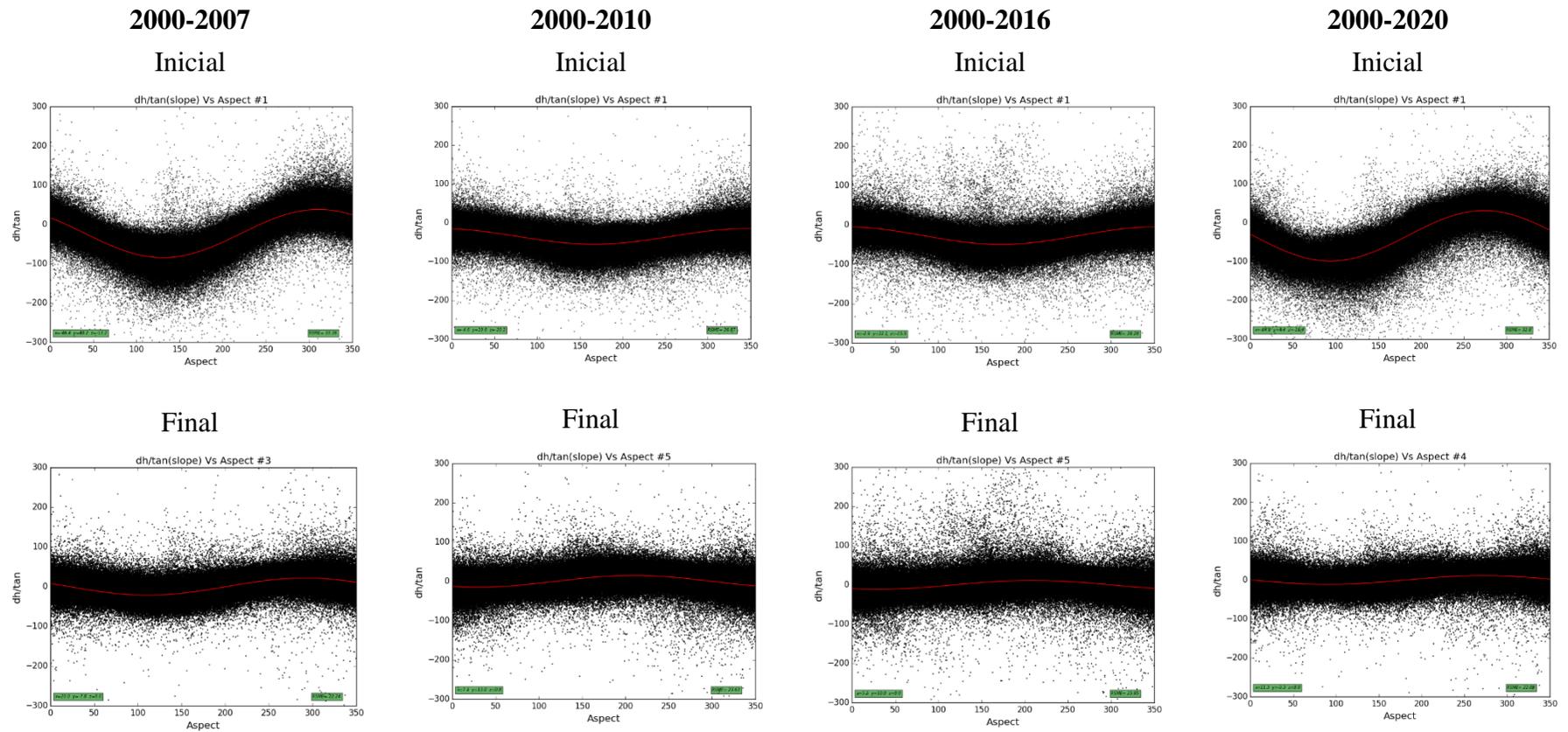
**Figura 43**

*Dispersión de las diferencias de elevación entre DEMs de la Zona 5*



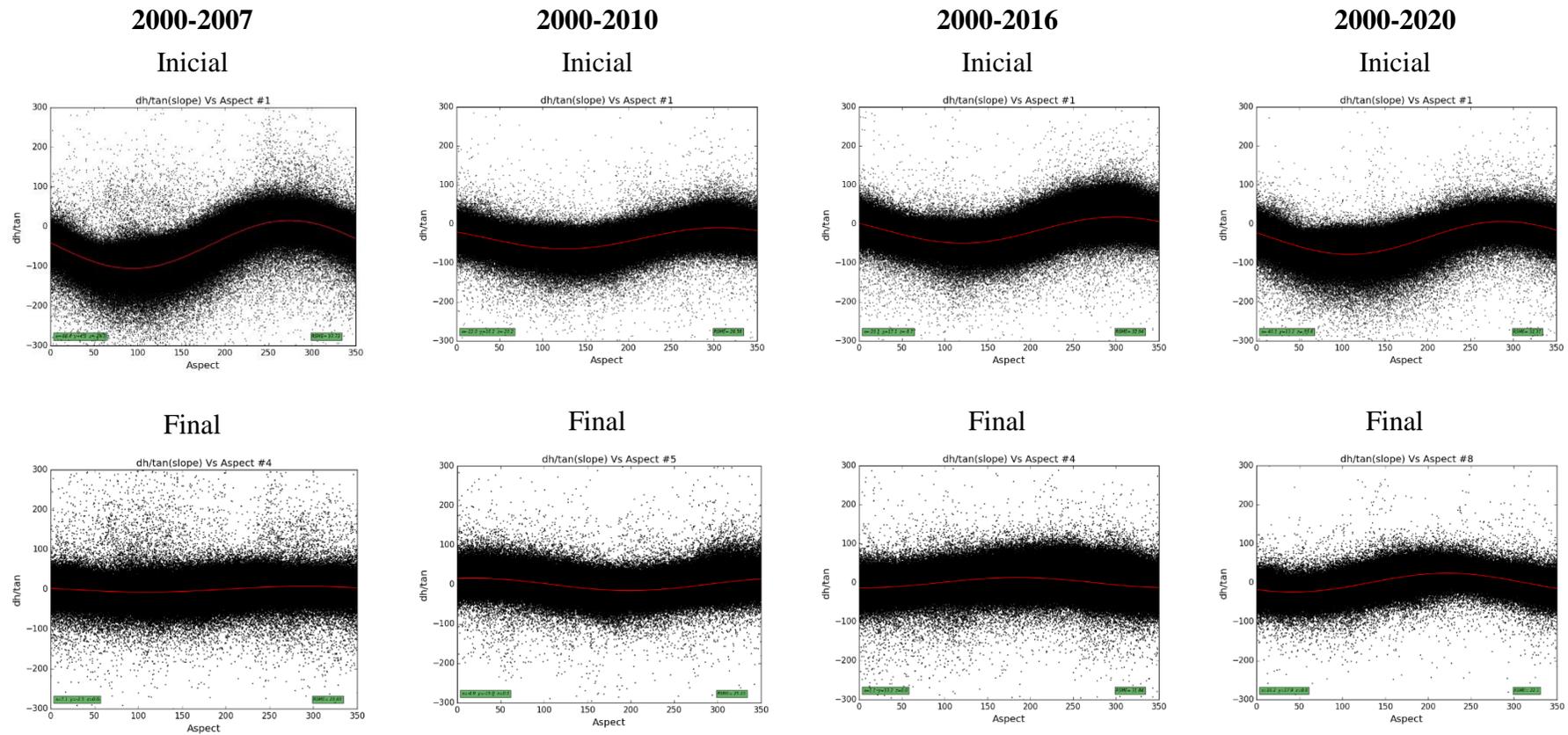
**Figura 44**

*Dispersión de las diferencias de elevación entre DEMs de la Zona 6*



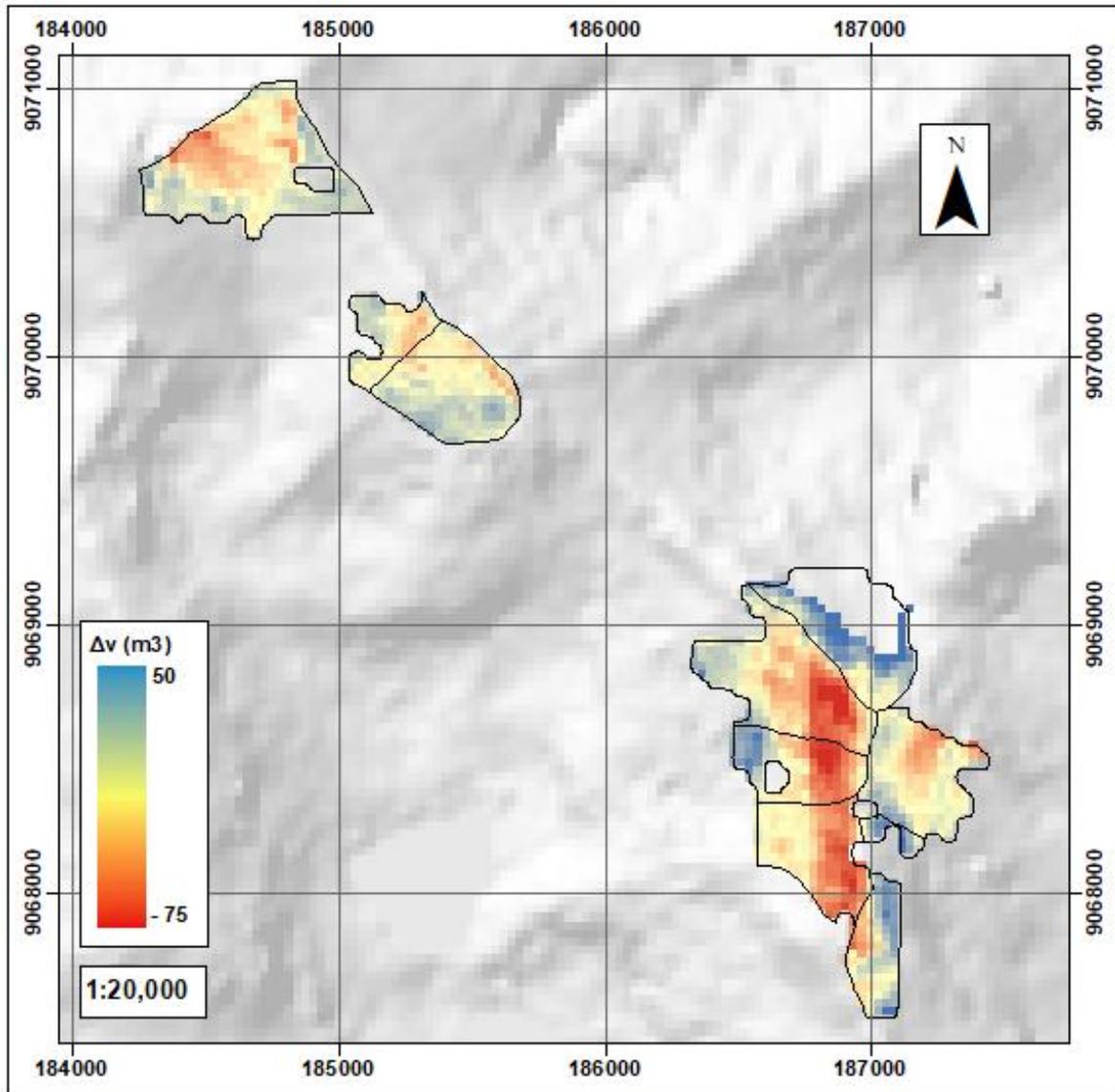
**Figura 45**

*Dispersión de las diferencias de elevación entre DEMs de la Zona 7*



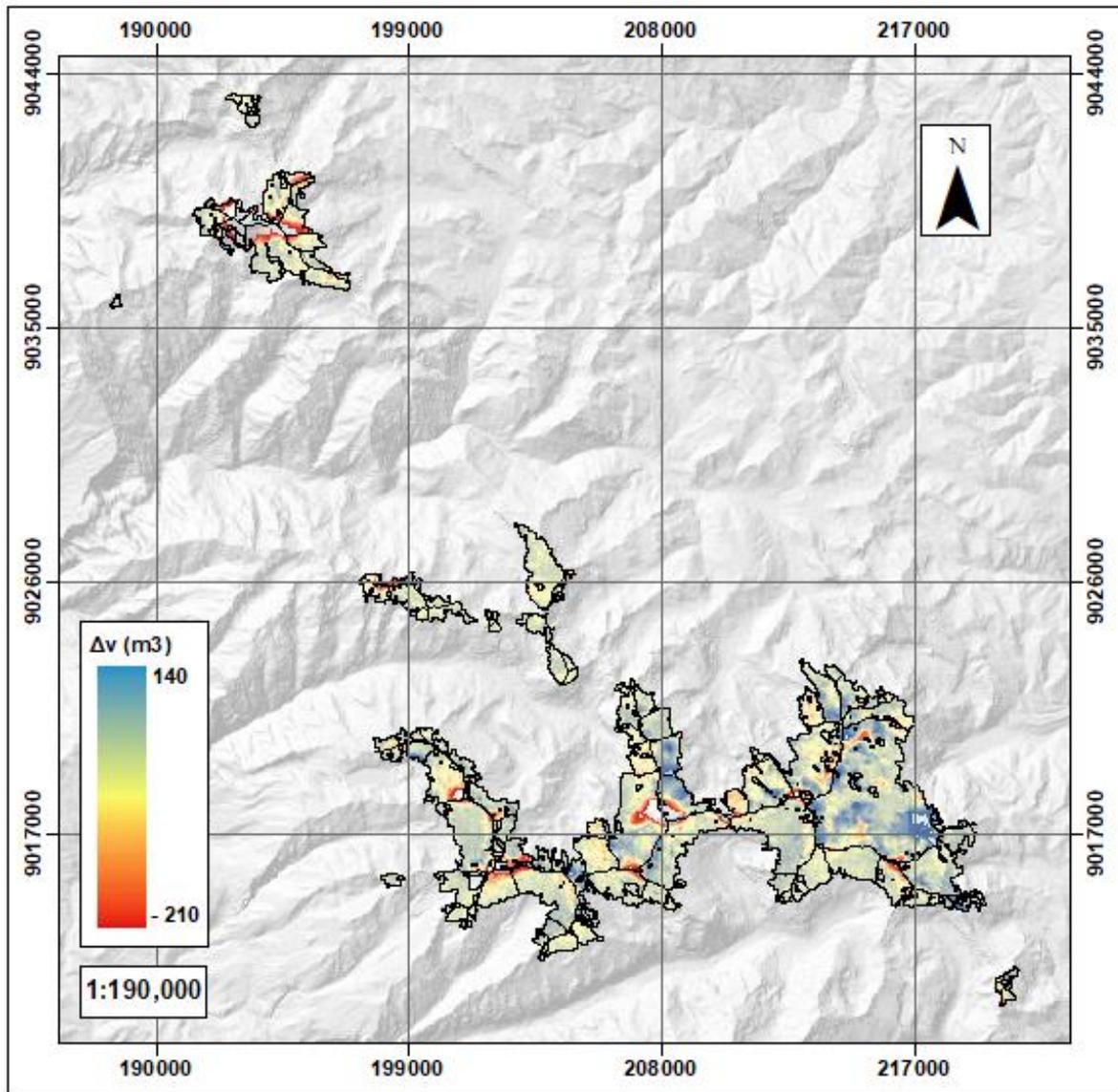
**Figura 46**

*Variación de Volumen de 2000-2020 en la Zona 1*



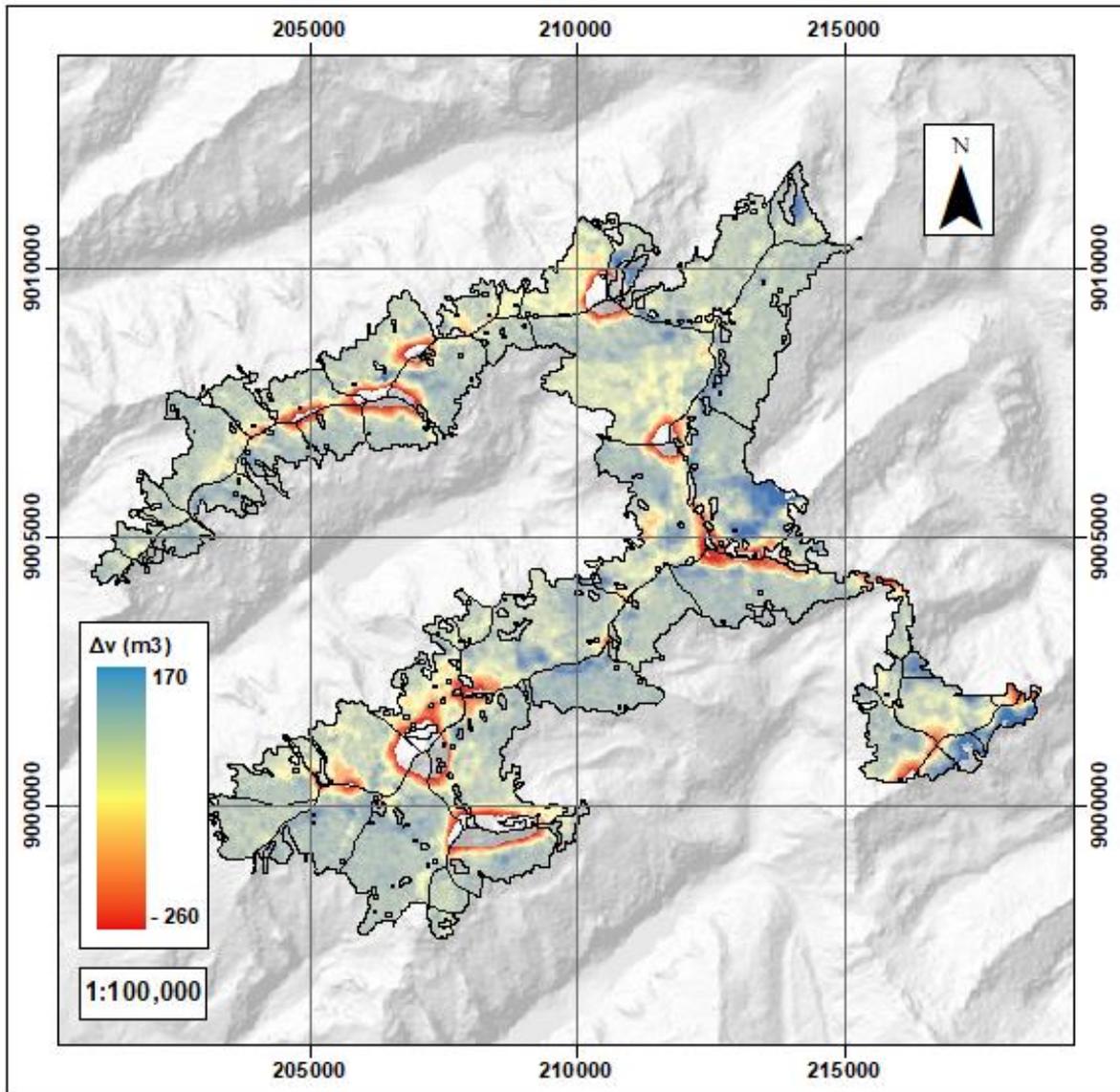
**Figura 47**

*Variación de Volumen de 2000-2020 en la Zona 2*



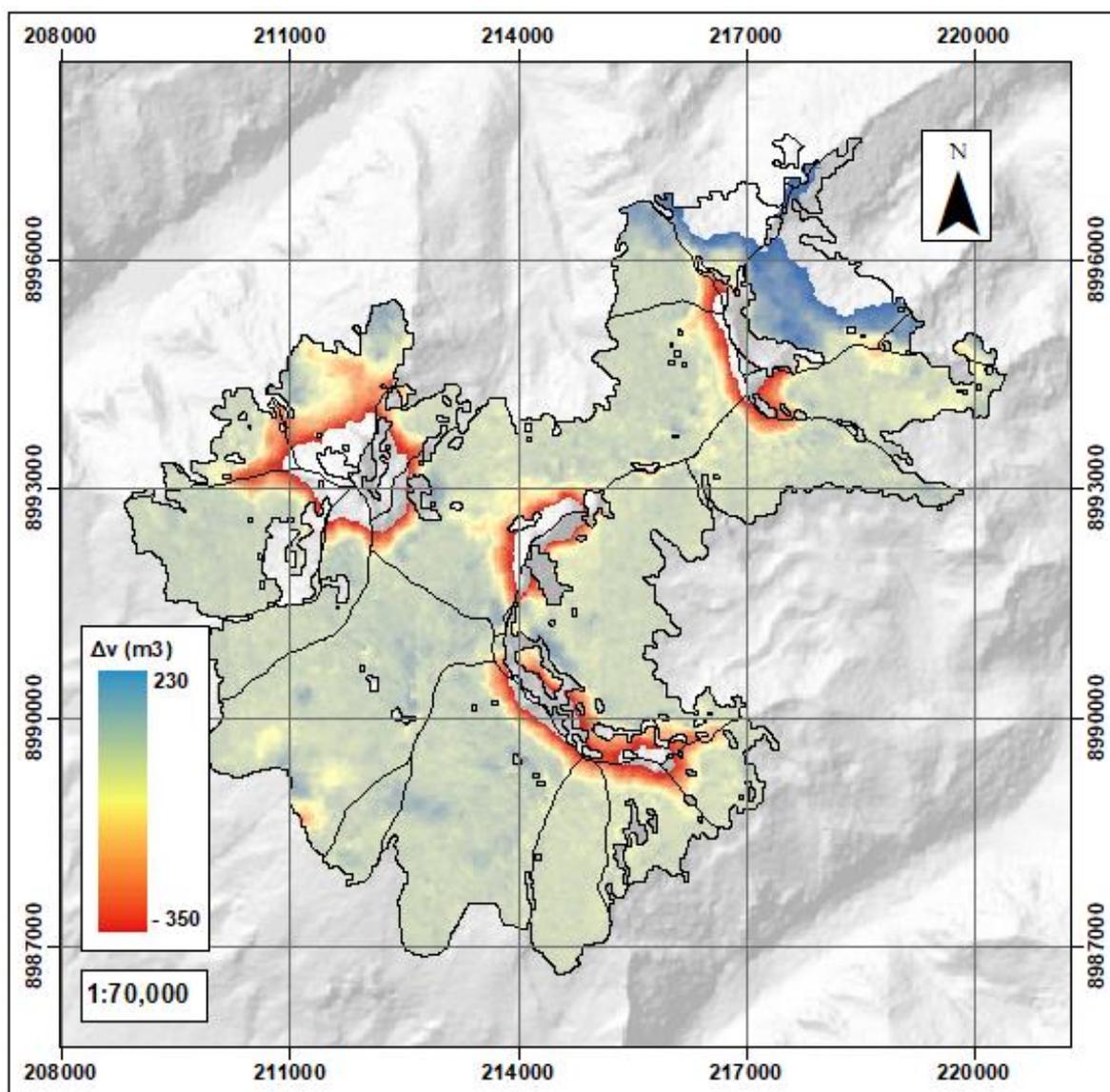
**Figura 48**

*Variación de Volumen de 2000-2020 en la Zona 3*



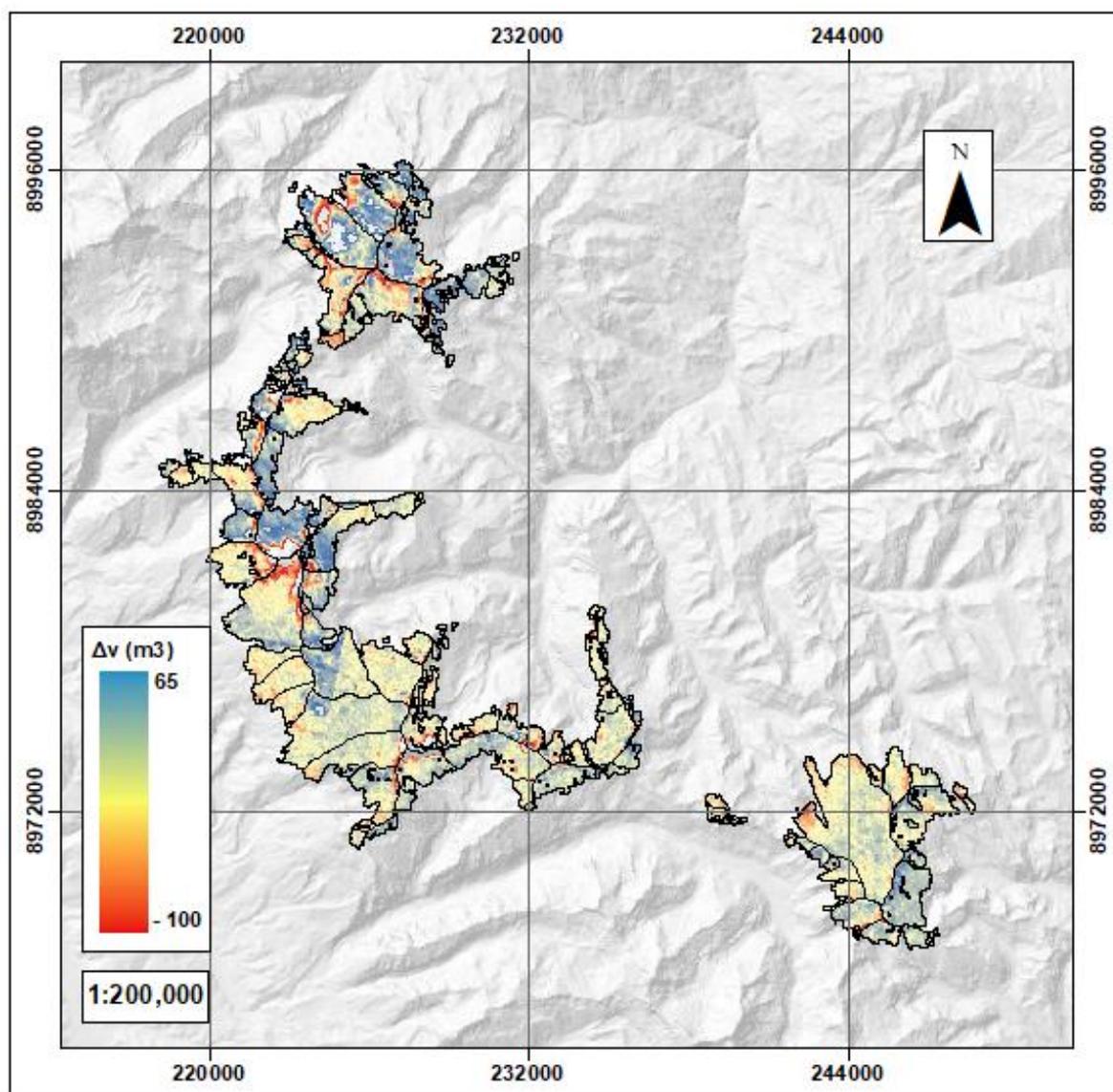
**Figura 49**

*Variación de Volumen de 2000-2020 en la Zona 4*



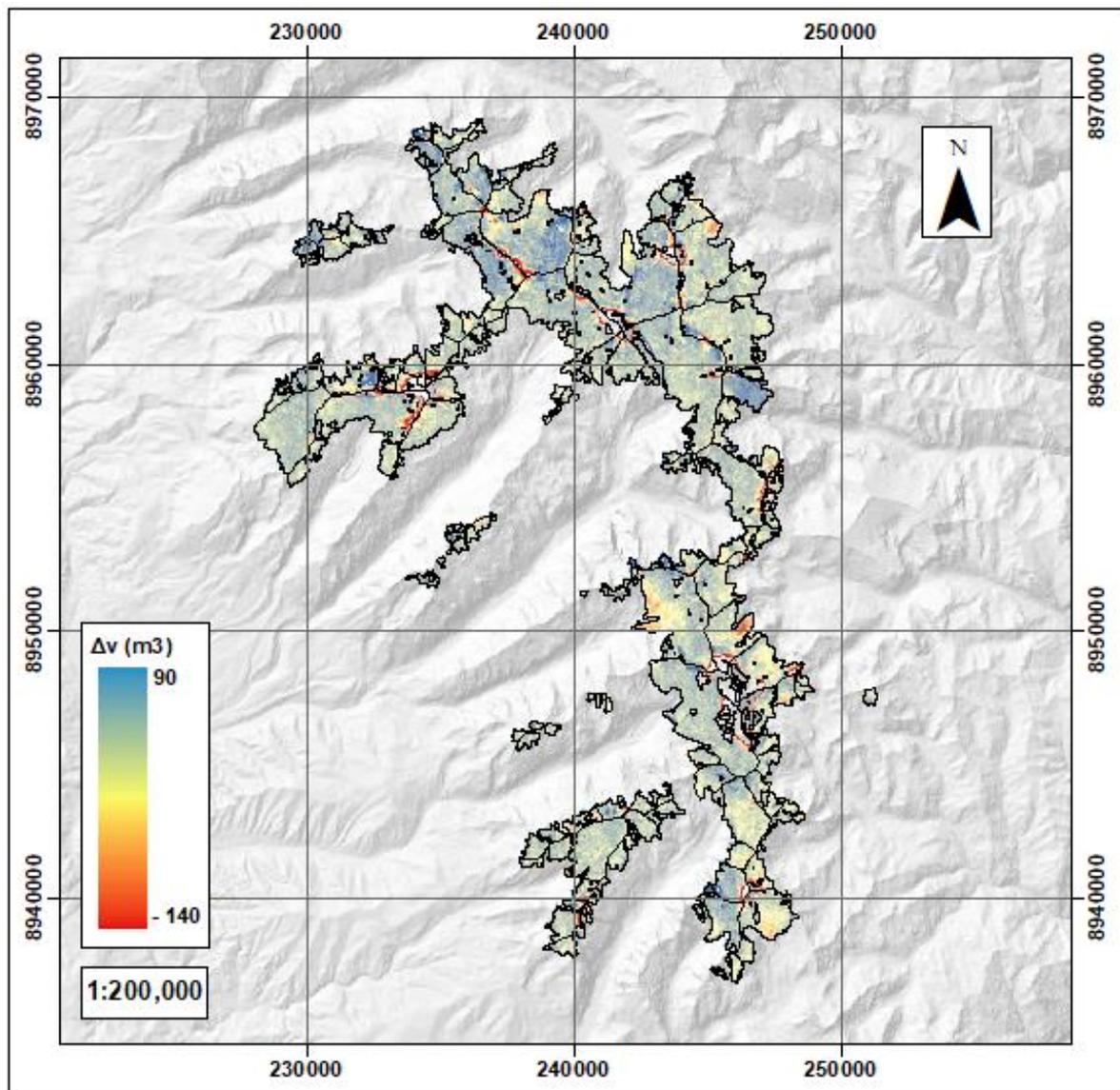
**Figura 50**

*Variación de Volumen de 2000-2020 en la Zona 5*



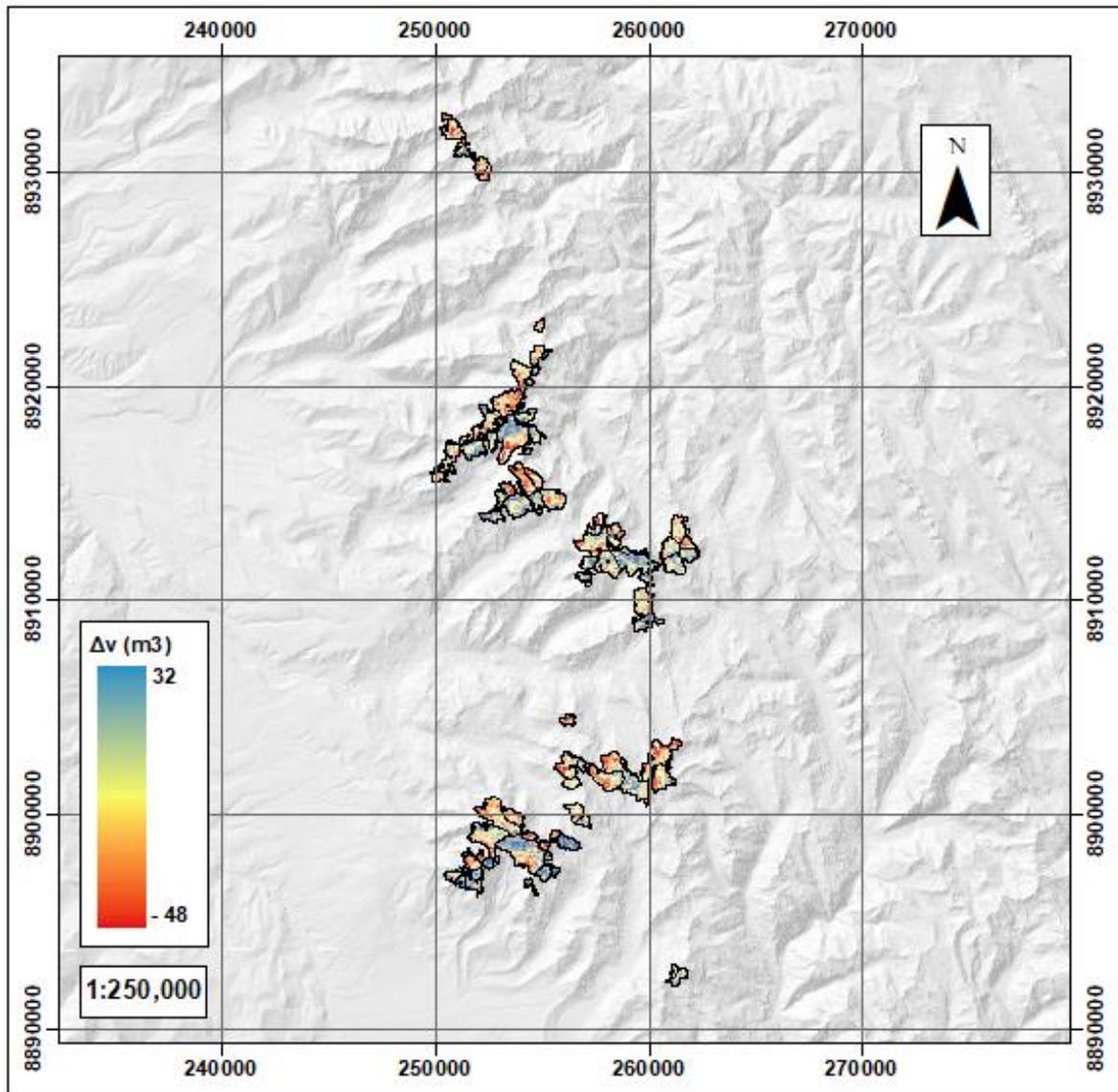
**Figura 51**

*Variación de Volumen de 2000-2020 en la Zona 6*



**Figura 52**

*Variación de Volumen de 2000-2020 en la Zona 7*



En la Tabla 20 se observa el resumen por zonas del desplazamiento y valores del error cuadrático medio y en la Tabla 21 el balance de masa glaciar de la Cordillera Blanca, En las Figuras 53 y 54 se muestra los balances de masa por periodo, anual y decenal de la Cordillera Blanca.

**Tabla 20**

*Resultados de los diferentes desplazamientos por zonas*

	<b>Periodos</b>	<b>Iteración</b>	<b><math>\Delta X</math></b>	<b><math>\Delta Y</math></b>	<b><math>\Delta Z</math></b>	<b>RSME</b>
Zona 1	2000-2007	4	9.3	4.9	0	43.66
	2007-2010	4	-4.1	6.4	0	25.35
	2010-2016	7	-4.8	7.7	0	36.29
	2016-2020	8	-10.2	-13.8	0	28.1
Zona 2	2000-2007	4	-2.5	1.6	0	30.14
	2007-2010	8	-4.2	-10.9	0	28.43
	2010-2016	4	-2.7	-5.1	0	30.25
	2016-2020	8	-10.2	-13.8	0	28.1
Zona 3	2000-2007	6	6.9	4.2	0	28.4
	2007-2010	4	-14.2	-1.1	0	34.93
	2010-2016	28	7.6	-15	0	35.77
	2016-2020	3	-0.3	7.7	0	37.71
Zona 4	2000-2007	3	-3.6	0.7	0	22.67
	2007-2010	3	15.2	-7.7	0	23.09
	2010-2016	4	0.7	3.7	0	29.7
	2016-2020	3	-5	-2.5	0	36.85
Zona 5	2000-2007	4	22	-25.9	0	19.75
	2007-2010	3	9.8	7.7	0	21.22
	2010-2016	6	2.6	18.3	0	22.58
	2016-2020	23	-16.6	24.9	0	32.21
Zona 6	2000-2007	3	-20	7.8	0	22.24
	2007-2010	5	-7.3	-13	0	23.63
	2010-2016	5	-5.5	-10	0	25.95
	2016-2020	4	-11.3	0.3	0	22.09
Zona 7	2000-2007	4	-7.1	2.5	0	28.65
	2007-2010	5	4.9	15	0	25.23
	2010-2016	4	-1.1	-13.2	0	31.84
	2016-2020	8	-16.2	-17.9	0	22.1

NOTA: **RSME**: Error cuadrática medio con pendiente de 15°.

**Tabla 21**

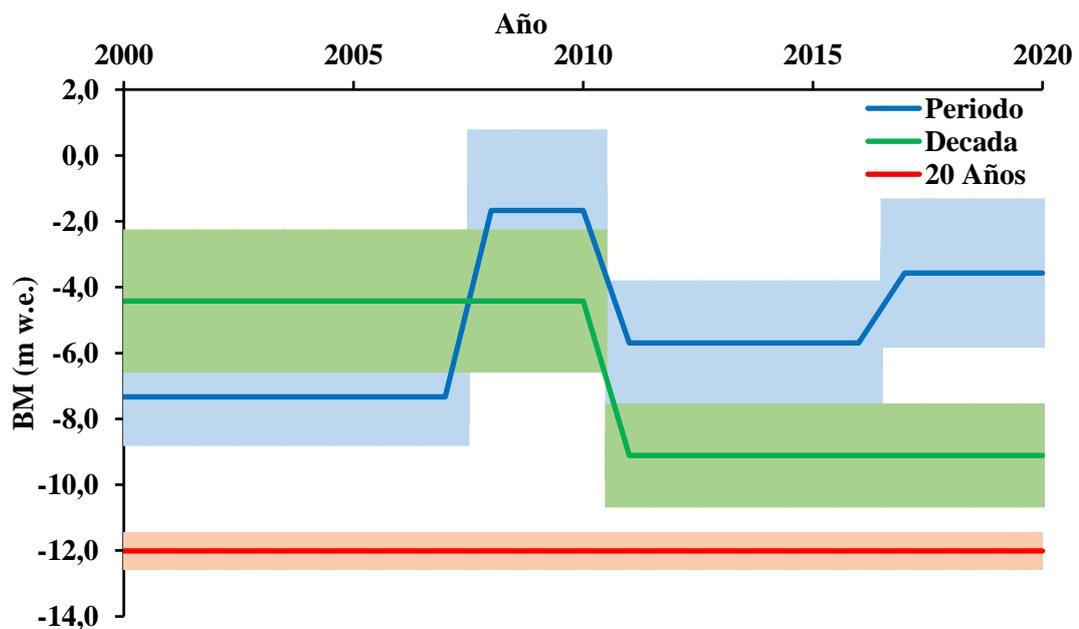
*Balace de masa glaciár de la Cordillera Blanca*

Año	$\Delta h$	$\overline{\Delta h}$	$\overline{S}$	$\Delta v$	Kg	BM	BMa
2000-2007	-3414909	-1.3	70315026	-3073418711	-2673874278	-7.33 ± 0.77	-1.05 ± 0.11
2007-2010	-1555228	-0.4	62903631	-1399705370	-1217743672	-1.67 ± 1.74	-0.56 ± 0.58
2010-2016	-2881252	-1.0	59457049	-2593126949	-2256020445	-5.69 ± 1.17	-0.95 ± 0.19
2016-2020	-948948	-1.2	55475676	-854053468	-743026517	-3.57 ± 1.54	-0.89 ± 0.39
2010-2000	-2843435	-0.5	69712906	-2559091300	-2226409431	-4.42 ± 1.45	-0.44 ± 0.15
2020-2010	-2873174	-0.8	58954914	-2585856147	-2249694848	-9.11 ± 0.85	-0.91 ± 0.06
2020-2000	-5206809	-0.5	66929098	-4686128079	-4076931429	-12.01 ± 1.17	-0.60 ± 0.06

NOTA:  $\Delta h$ : Suma de la diferencia de cotas (m),  $\overline{\Delta h}$ : Altura promedio (m a<sup>-1</sup>),  $\overline{S}$ : Área promedio de los periodos (m<sup>2</sup>),  $\Delta v$ : Variación de volumen (m<sup>3</sup>),  $\Delta M$ : Variación de masa (Kg), **BM**: Balance de masa (m w.e.) y **BMa**: Balance de masa anual (m w.e. a<sup>-1</sup>).

**Figura 53**

*Balace de masa en la Cordillera Blanca*

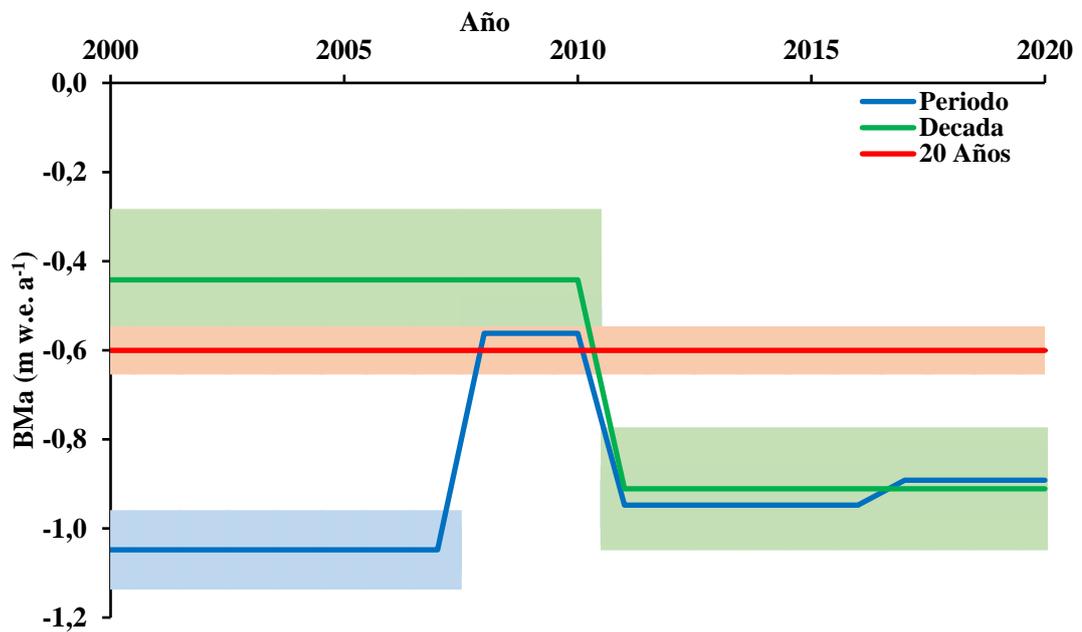


El balance de masa glaciár estimado para la cordillera Blanca, como se muestra en las Figuras 53 y 54 para el periodo comprendida entre 2000 – 2020, es de  $-12.008 \pm 1.167$  m w.e, representado por la línea de color rojo y balance anual de  $-0.600 \pm 0.058$  m w.e. a<sup>-1</sup> con un retroceso de espesor de  $0.509$  m a<sup>-1</sup>, la pérdida total en este periodo es de 4 Gt de hielo. La mayor perdida decanal se registró entre 2010 - 2020 con  $-9.114 \pm 0.854$  m w.e y balance anual de  $-0.911 \pm 0.085$  m w.e. a<sup>-1</sup> representado por

línea de color verde. En tanto que los balances por periodos varían unos a otros (línea de color azul), siendo mayor en el periodo de 2000 - 2007 de  $-7.334 \pm 0.768$  m w.e y balance anual de  $-1.048 \pm 0.110$  m w.e.  $a^{-1}$  con un retroceso de espesor de  $-1.305$  m  $a^{-1}$ . En general, predomina la pérdida de masa en los periodos analizados en toda la cordillera Blanca.

**Figura 54**

*Balace de masa anual en la Cordillera Blanca*



#### 4.3. Comportamiento de la temperatura y precipitación

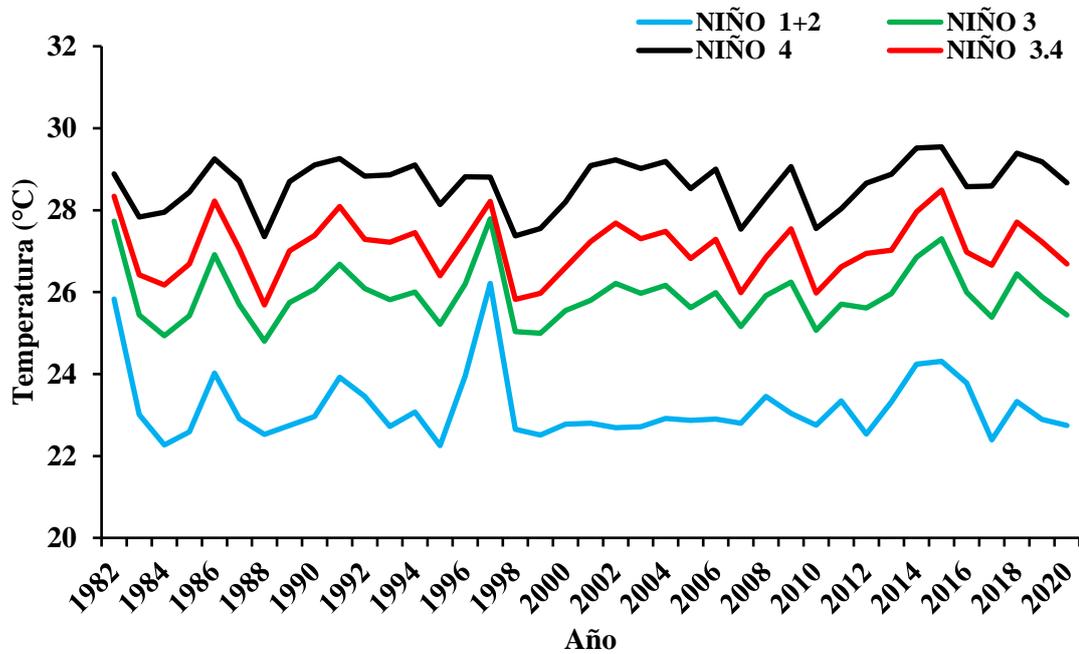
La temperatura superficial del mar del el NIÑO 1+2, 3, 4 y 3.4 se muestra en la Figura 55, la temperatura de anomalías en la Figura 56 y reanálisis en la Figura 57. En general se muestra comportamientos muy similares del NIÑO, información complementaria en el Anexo 6.

En la Figura 55 se muestra la temperatura de la superficie del mar (SST), se observa comportamientos similares del NIÑO a lo largo de los años con diferentes valores de temperatura, siendo de mayor los valores del el NIÑO 4 y menor el NIÑO 1+2. Las anomalías de la temperatura superficial del mar se muestran en la Figura 56,

manteniendo las mismas tendencias en los años de análisis, con valores altos entre los años de 1996-1998.

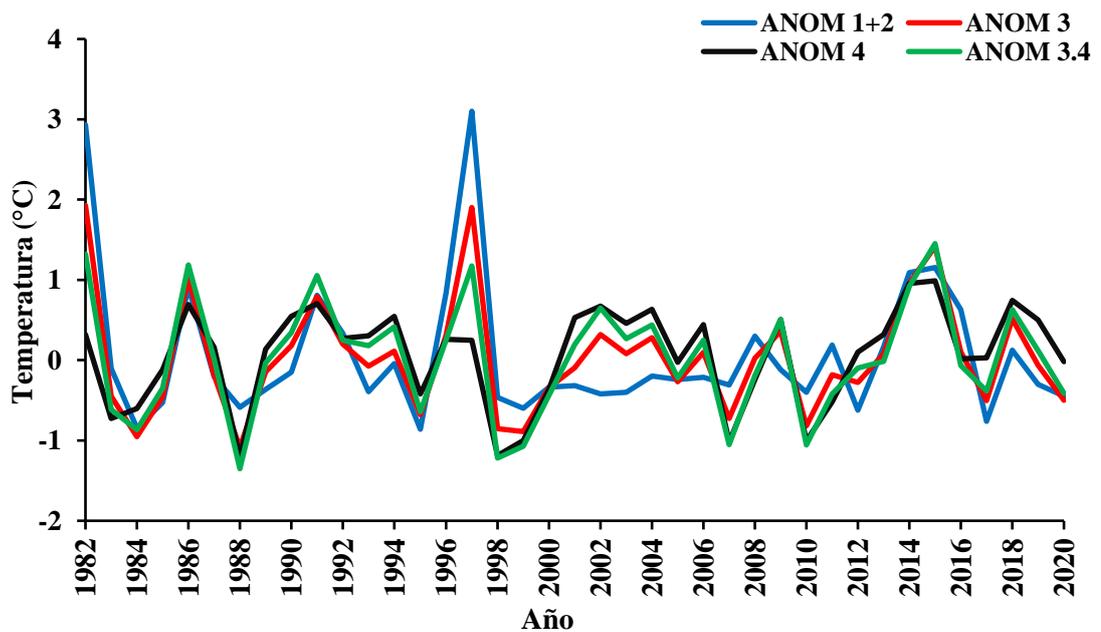
**Figura 55**

*Temperatura de la superficie del mar (SST)*



**Figura 56**

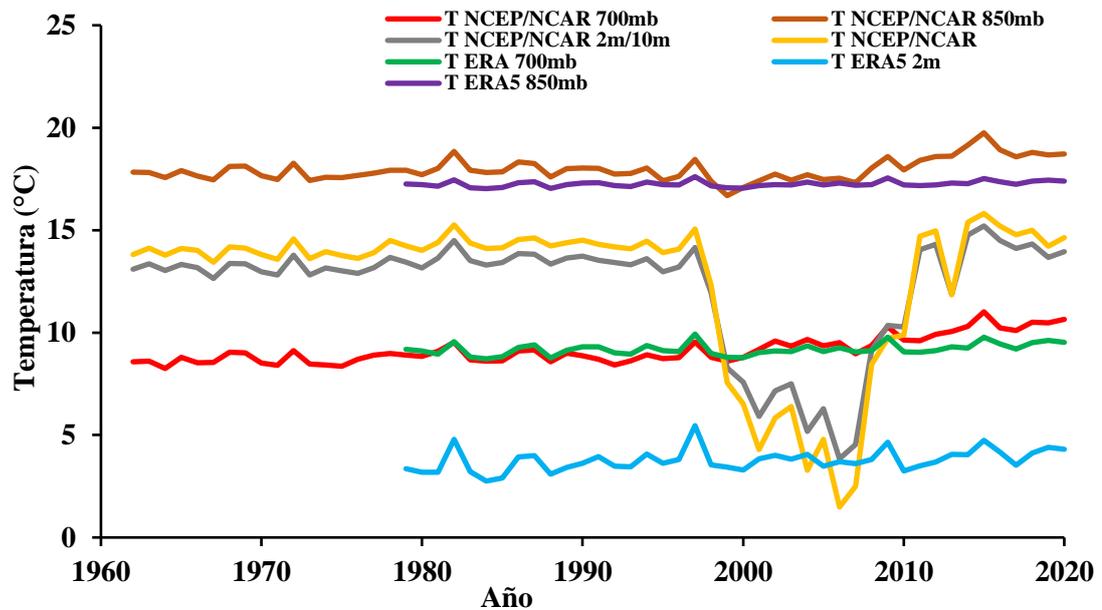
*Anomalías de la temperatura superficial del mar*



En la Figura 57 se muestra la temperatura de reanálisis, teniendo valores altos los de ERA5 T 850 mb y NCEP/NCAR T 850 mb a diferencia de los demás.

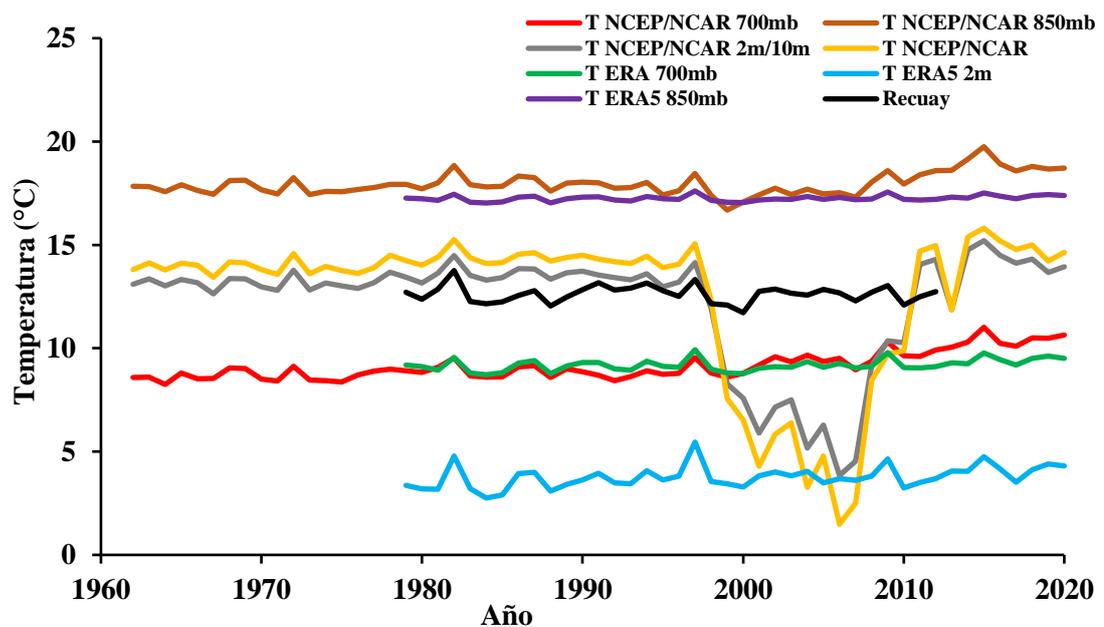
**Figura 57**

*Temperatura de reanálisis*



**Figura 58**

*Comportamiento de la Temperatura con referencia a la estación de Recuay*



En la Figura 58 se muestra la temperatura de reanálisis con referencia a la estación meteorológica de Recuay.

**Tabla 22**

*Estadística descriptiva de la temperatura de reanálisis*

Variable	Observaciones	Mínimo	Máximo	Media	Desv. típica
NCEP/NCAR 700mb	34	8.427	10.293	9.096	0.447
NCEP/NCAR 850mb	34	16.685	18.838	17.842	0.453
NCEP/NCAR 2m/10m	34	3.842	14.492	11.290	3.349
NCEP/NCAR	34	1.486	15.264	11.341	4.403
ERA 700mb	34	8.719	9.928	9.131	0.271
ERA5 2m	34	2.752	5.458	3.675	0.531
ERA5 850mb	34	17.028	17.609	17.229	0.133
Recuay	34	11.719	13.760	12.629	0.414

En la Tabla 23 se muestra el coeficiente de determinación de Pearson de la temperatura de reanálisis y la estación meteorológica de Recuay, todos los datos han sido recopilados sobre la base de la ubicación de la estación de Recuay.

**Tabla 23**

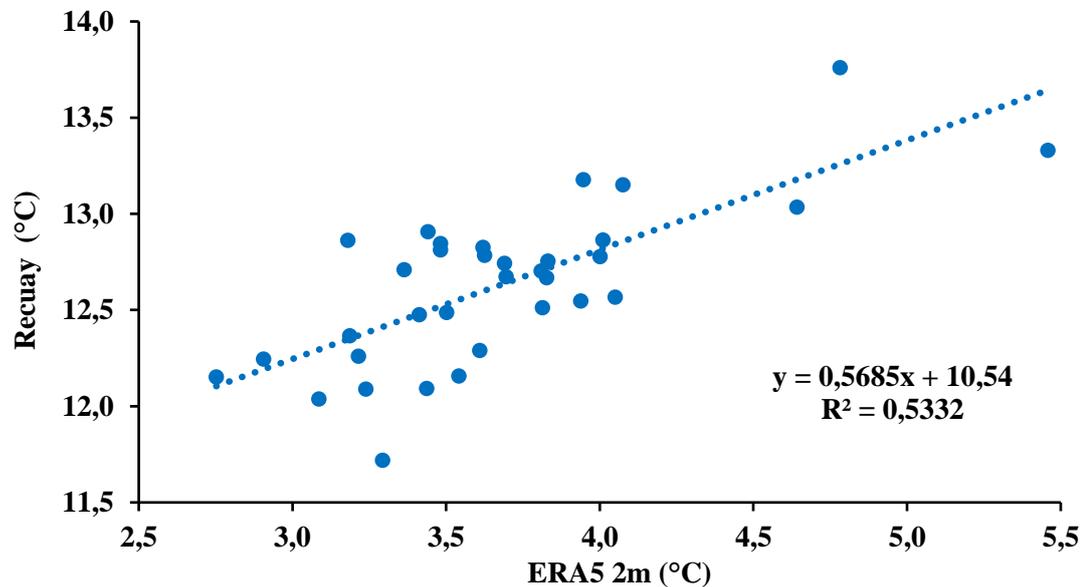
*Coefficiente de determinación de Pearson de temperatura*

Variables	NCEP/NCA R 700mb	NCEP/NCA R 850mb	NCEP/NCA R 2m/10m	NCEP/ NCAR	ERA 700mb	ERA 5 2m	ERA5 850mb	Recuay
NCEP/NCAR 700mb	<b>1</b>	0.264	0.083	0.100	0.367	0.319	0.361	0.138
NCEP/NCAR 850mb	0.264	<b>1</b>	0.331	0.302	0.382	0.227	0.376	0.359
NCEP/NCAR 2m/10m	0.083	0.331	<b>1</b>	0.999	0.008	0.000	0.008	0.047
NCEP/NCAR	0.100	0.302	0.999	<b>1</b>	0.005	0.001	0.005	0.041
ERA 700mb	0.367	0.382	0.008	0.005	<b>1</b>	0.807	0.998	0.549
ERA5 2m	0.319	0.227	0.000	0.001	0.807	<b>1</b>	0.800	0.533
ERA5 850mb	0.361	0.376	0.008	0.005	0.998	0.800	<b>1</b>	0.555
Recuay	0.138	0.359	0.047	0.041	0.549	0.533	0.555	<b>1</b>

En la Figura 59 se muestra la correlación moderada a fuerte con los productos de la temperatura de reanálisis de ERA5 2 m. El coeficiente de determinación de Pearson es de 53% con la estación de Recuay con P-valor de <0.0001 al 95% de confianza.

**Figura 59**

*Correlación de la Temperatura entre ERA5 2m a la estación de Recuay*



La temperatura de reanálisis del producto ERA5 2 m tiene mayor correlación con la estación de Recuay a diferencia de los demás productos, a base de ello se estimó para toda la Cordillera Blanca en la plataforma de Google Earth Engine.

En la Tabla 24 y la Figura 60 se muestra la temperatura estimada del ERA5 2 m máximo, mínimo y promedio anual en un año hidrológico con respecto a la temperatura de los glaciares de Artesonraju, Cuchillacocha y Shallap.

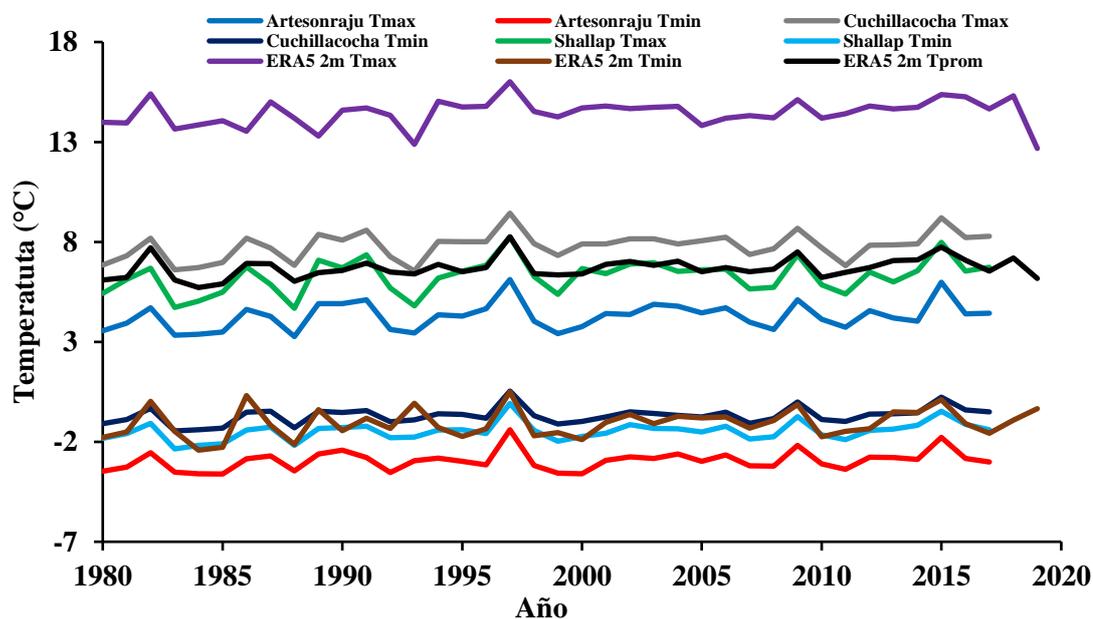
**Tabla 24**

*Estadística descriptiva de la temperatura en los glaciares*

Variable	Observaciones	Mínimo	Máximo	Media	Desv. típica
Artesonraju Tmax	38	3.264	6.119	4.287	0.677
Artesonraju Tmin	38	-3.611	-1.397	-2.945	0.487
Cuchillacocha Tmax	38	6.549	9.436	7.807	0.669
Cuchillacocha Tmin	38	-1.456	0.538	-0.695	0.408
Shallap Tmax	38	4.677	8.253	6.284	0.830
Shallap Tmin	38	-2.358	-0.083	-1.474	0.450
ERA5 2m Tmax	38	12.881	16.013	14.478	0.612
ERA5 2m Tmin	38	-2.418	0.495	-1.081	0.713
ERA5 2m Tprom	38	5.717	8.254	6.698	0.519

**Figura 60**

*Temperatura en la Cordillera Blanca*



En la Tabla 25 se observa los resultados de la prueba de homogeneidad de la temperatura ERA5 2 m, basándose en las diferentes pruebas, y en la Tabla 26 con respecto a la temperatura de los glaciares de Artesonraju, Cuchillacocha y Shallap. Se utilizó 10000 simulaciones Monte Carlo para calcular el valor-p, con intervalo de confianza para el valor-p al 99%.

Los resultados de las Tablas 25 y 26 indican que hay homogeneidad en los datos, las interpretaciones de hipótesis son las siguientes.

H0: Los datos son homogéneos

Ha: Hay una fecha en la que hay un cambio en los datos

Puesto que el valor-p calculado es mayor que el nivel de significación  $\alpha=0.05$ , no se puede rechazar la hipótesis nula H0.

**Tabla 25**

*Pruebas de homogeneidad de la temperatura de ERA5 2m*

	<b>Prueba</b>				
	<b>Pettitt</b>	<b>SNHT</b>	<b>Buishand</b>	<b>Von Neumann</b>	
<b>ERA5 2m Tmax</b>	K	204.000	-	-	-
	T0	-	7.254	-	-
	Q	-	-	7.641	-
	N	-	-	-	1.859
	t	1993	2018	1993	-
	valor-p	0.062	0.089	0.072	0.318
	alfa	0.05	0.05	0.05	0.05
	Intervalo de confianza	]0.056; 0.068[	]0.081; 0.096[	]0.065; 0.079[	]0.306; 0.330[
	<b>ERA5 2m Tmin</b>	K	156.000	-	-
T0		-	4.448	-	-
Q		-	-	5.144	-
N		-	-	-	2.064
t		2000	1985	1985	-
valor-p		0.341	0.345	0.431	0.577
alfa		0.05	0.05	0.05	0.05
Intervalo de confianza		]0.329; 0.353[	]0.332; 0.357[	]0.418; 0.443[	]0.564; 0.590[
<b>ERA5 2m Tprom</b>		K	190.000	-	-
	T0	-	4.952	-	-
	Q	-	-	6.949	-
	N	-	-	-	1.841
	t	2000	1993	1993	-
	valor-p	0.108	0.271	0.126	0.292
	alfa	0.05	0.05	0.05	0.05
	Intervalo de confianza	]0.100; 0.116[	]0.259; 0.282[	]0.117; 0.135[	]0.281; 0.304[

**Tabla 26***Pruebas de homogeneidad de la temperatura en los glaciares*

	<b>Pettitt</b>	<b>Prueba SNHT</b>	<b>Buishand</b>	<b>Von Neumann</b>
Artesonraju Tmax	0.338	0.279	0.203	0.227
Artesonraju Tmin	0.763	0.347	0.361	0.386
Cuchillacocha Tmax	0.299	<b>0.049</b>	0.051	0.083
Cuchillacocha Tmin	0.685	0.164	0.178	0.228
Shallap Tmax	0.370	0.080	0.095	0.129
Shallap Tmin	0.615	0.238	0.174	0.185
ERA5 2m Tmax	0.062	0.089	0.072	0.318
ERA5 2m Tmin	0.341	0.345	0.431	0.577
ERA5 2m Tprom	0.108	0.271	0.126	0.292

En la Tabla 27 se muestra los resultados de la prueba de Mann-Kendall de la temperatura ERA5 2m.

**Tabla 27***Prueba de Mann - Kendall de temperatura ERA5 2m*

	<b>ERA5 2m Tmax</b>	<b>ERA5 2m Tmin</b>	<b>ERA5 2m Tprom</b>
Tau de Kendall	0.257	0.166	0.300
S	181	117	211
Var(S)	2817.514	2915.021	2530.308
valor-p (bilateral)	<b>0.001</b>	<b>0.032</b>	<b>&lt;0.0001</b>
alfa	0.05	0.05	0.05
Pendiente	0.021	0.018	0.018

Se ha utilizado una aproximación para calcular el valor-p.

Interpretación de la prueba:

H0: No existe una tendencia en la serie

Ha: Hay una tendencia en la serie

Puesto que el valor-p computado es menor que el nivel de significación  $\alpha=0.05$ , se debe rechazar la hipótesis nula H0, y aceptar la hipótesis alternativa Ha.

En la Tabla 28 se muestra la estadística descriptiva de precipitación estimada de ERA5 2 m, estaciones meteorológicas de Querococha, Paron y Recuay y glaciares de Artesonraju, Cuchillacocha y Shallap.

**Tabla 28**

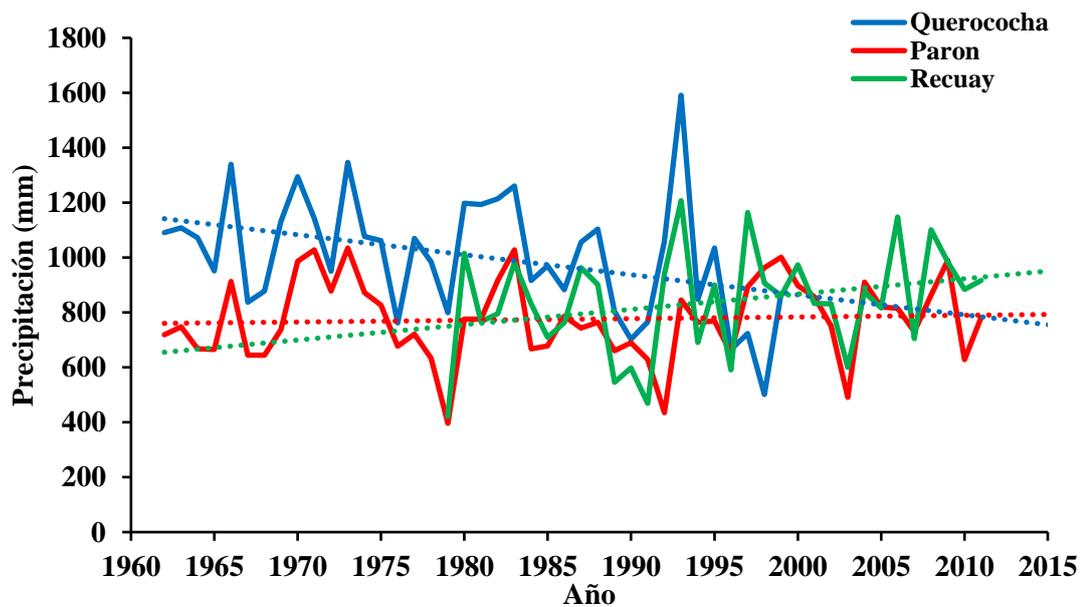
*Estadística descriptiva de la precipitación*

Estación	Observaciones	Mínimo	Máximo	Media	Desv. típica
Querococha	38	501.1	1590.9	967.8	253.3
Paron	38	435.3	1028.0	780.3	137.4
Artesonraju	38	834.6	1759.1	1289.1	192.8
Cuchillacocha	38	844.9	1619.3	1241.8	178.5
Shallap	38	773.3	1422.4	1147.9	137.6
ERA 2m	38	1674.0	2644.0	2219.2	204.3
Recuay	38	469.2	1206.9	852.1	180.3

En la Figura 61 se muestra la precipitación de las estaciones meteorológicas en un año hidrológico, y en la Figura 62 la precipitación de los glaciares y la estimada para la Cordillera Blanca del producto ERA5 2 m.

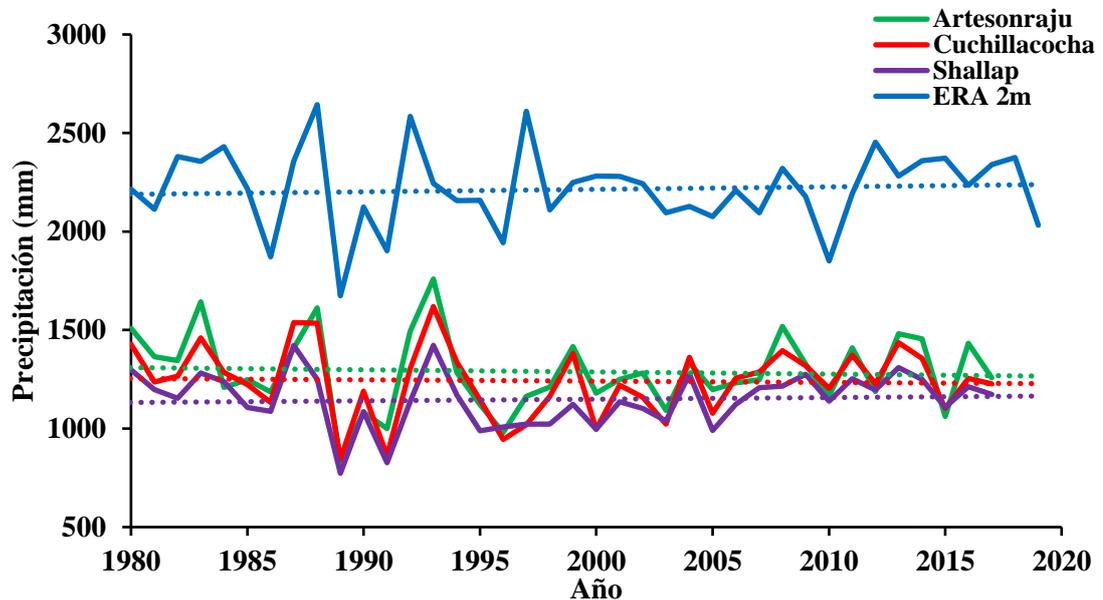
**Figura 61**

*Precipitación de las estaciones meteorológicas en la Cordillera Blanca*



**Figura 62**

*Precipitación estimada en glaciares de la Cordillera Blanca*



Los datos precipitación estimados en los glaciares (Artesonraju, Cuchillacocha y Shallap) y de ERA5 2 m tiene comportamientos muy parecidos en los diferentes años de comparación, siendo esta última con valores más altos al promedio de los glaciares.

En la Tabla 29 se muestra la prueba de homogeneidad de la precipitación. En la Tabla 30 se muestra la prueba de correlación de determinación de Pearson de las precipitaciones. La precipitación ERA5 tiene una baja correlación positiva con las demás precipitaciones.

**Tabla 29**

*Pruebas de homogeneidad de la precipitación*

Estación	Pettitt	Prueba SNHT	Buishand	Von Neumann
Querococha	0.060	0.180	0.122	<b>0.041</b>
Paron	0.336	0.587	0.282	0.136
Artesonraju	0.923	0.480	0.447	0.332
Cuchillacocha	0.849	0.474	0.354	0.310
Shallap	0.326	0.508	0.354	0.137
ERA 2m	0.842	0.760	0.770	0.853
Recuay	0.828	0.552	0.308	0.574

**Tabla 30***Coefficientes de determinación (Pearson) de precipitación*

<b>Variables</b>	<b>Querococha</b>	<b>Paron</b>	<b>Artesonraju</b>	<b>Cuchillacocha</b>	<b>Shallap</b>	<b>Recuay</b>	<b>ERA5</b>
Querococha	<b>1</b>	0.018	0.603	0.486	0.478	0.273	0.115
Paron	0.018	<b>1</b>	0.113	0.093	0.058	0.182	0.015
Artesonraju	0.603	0.113	<b>1</b>	0.848	0.725	0.522	0.404
Cuchillacocha	0.486	0.093	0.848	<b>1</b>	0.875	0.419	0.360
Shallap	0.478	0.058	0.725	0.875	<b>1</b>	0.420	0.326
Recuay	0.273	0.182	0.522	0.419	0.420	<b>1</b>	0.450
ERA5	0.115	0.015	0.404	0.360	0.326	0.450	<b>1</b>

**Tabla 31***Tendencia de Mann-Kendall de precipitación*

<b>Serie/Prueba</b>	<b>Tau de Kendall</b>	<b>Valor-p</b>	<b>Pendiente de Sen</b>
Querococha	-0.571	<b>0.002</b>	-68.765
Paron	0.083	0.624	36.998
Artesonraju	-0.083	0.850	16.295
Cuchillacocha	-0.083	0.850	-18.095
Shallap	-0.167	0.571	-13.743
Recuay	0.154	0.588	112.200
ERA5 2m	-0.231	0.367	-31.500

Se ha utilizado una aproximación para calcular el valor-p.

Interpretación de la prueba:

H0: No existe una tendencia en la serie

Ha: Hay una tendencia en la serie

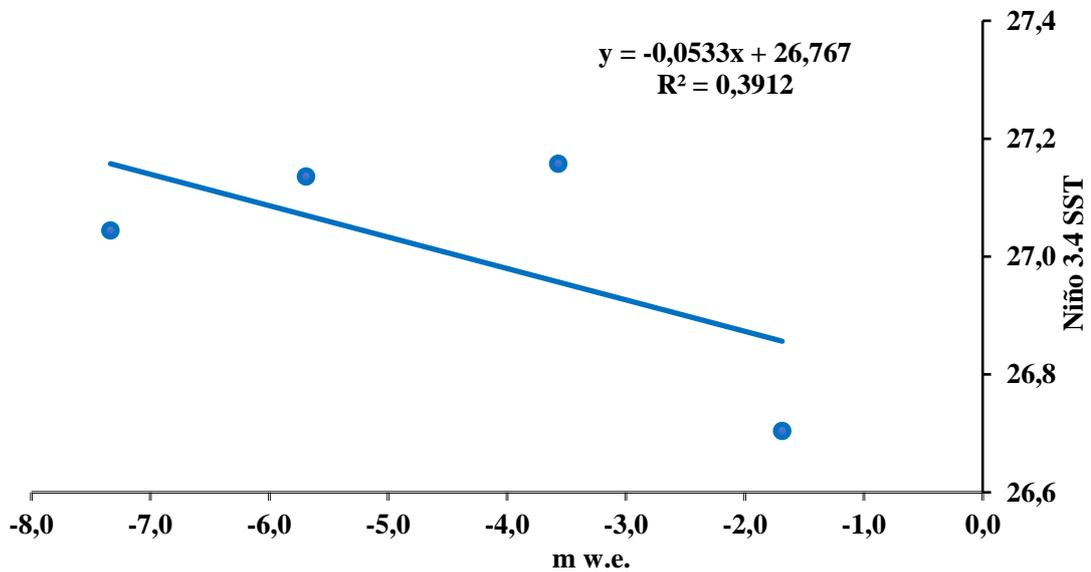
Puesto que el valor-p calculado es mayor que el nivel de significación  $\alpha=0.05$ , no se puede rechazar la hipótesis nula H0. Esto para las demás estaciones acepción de Querococha.

#### 4.4. Balance de masa glaciar con la temperatura y precipitación

La correlación de la temperatura El Niño 3.4 SST con el balance de masa glaciar es de 39% como se muestra en la Figura 63 y con anomalías 3.4 de 43% ver la Figura 64.

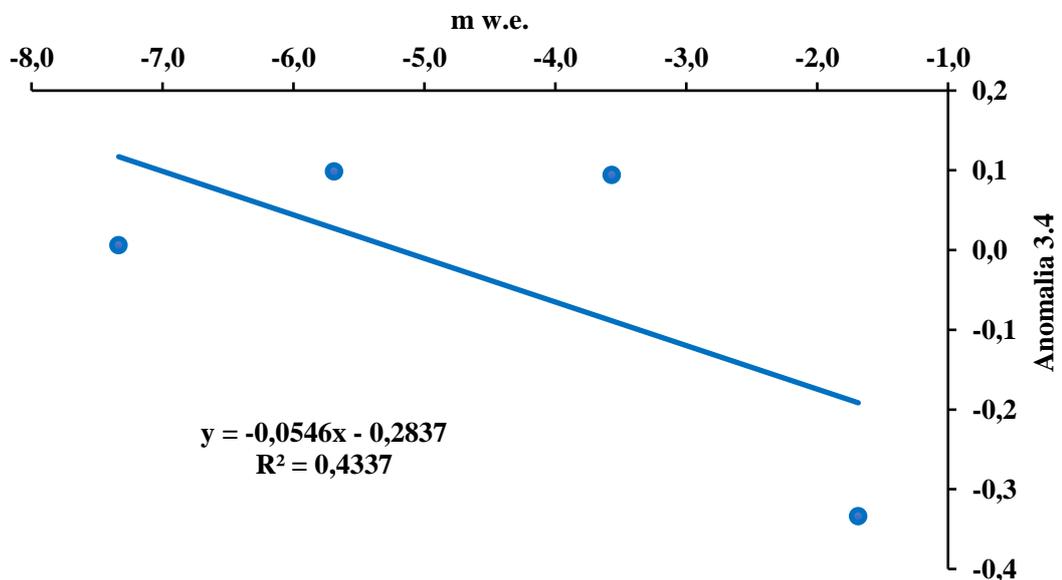
**Figura 63**

*Correlación del balance de masa con el Niño 3.4 SST*



**Figura 64**

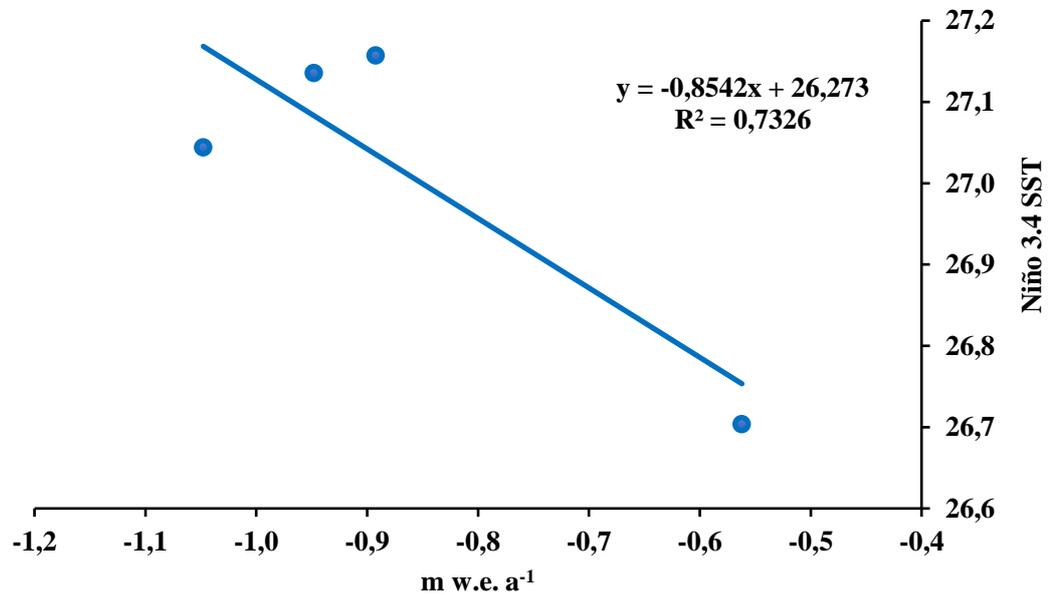
*Correlación del balance de masa con la anomalía 3.4*



La correlación de la temperatura El Niño 3.4 SST con el balance de masa anual es de 73% como se muestra en la Figura 65 y con anomalías 3.4 de 76% ver la Figura 66.

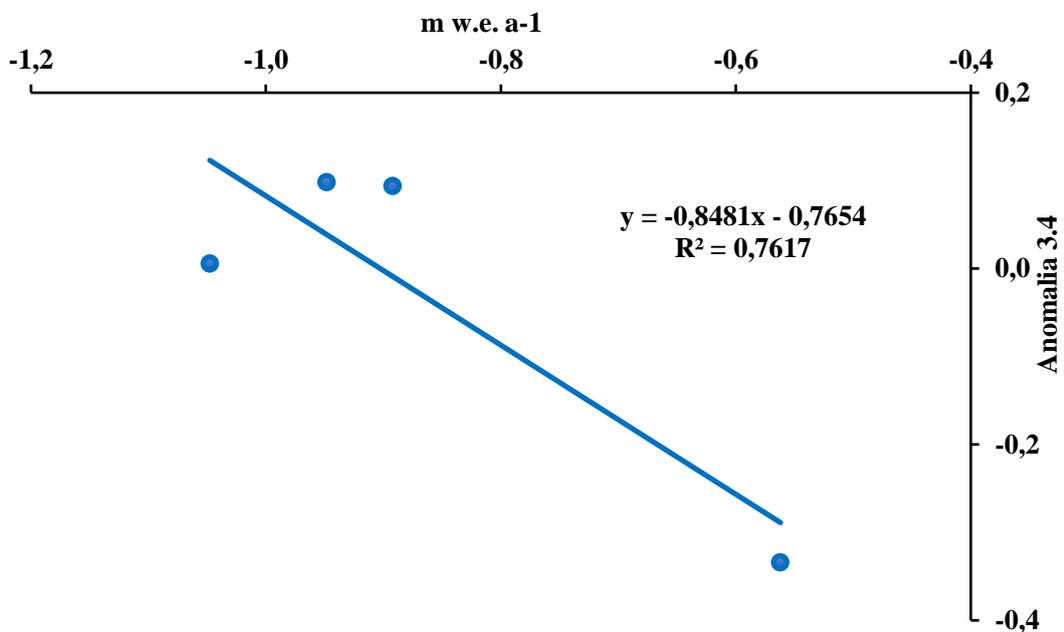
**Figura 65**

*Correlación del balance de masa anual con el Niño 3.4 SST*



**Figura 66**

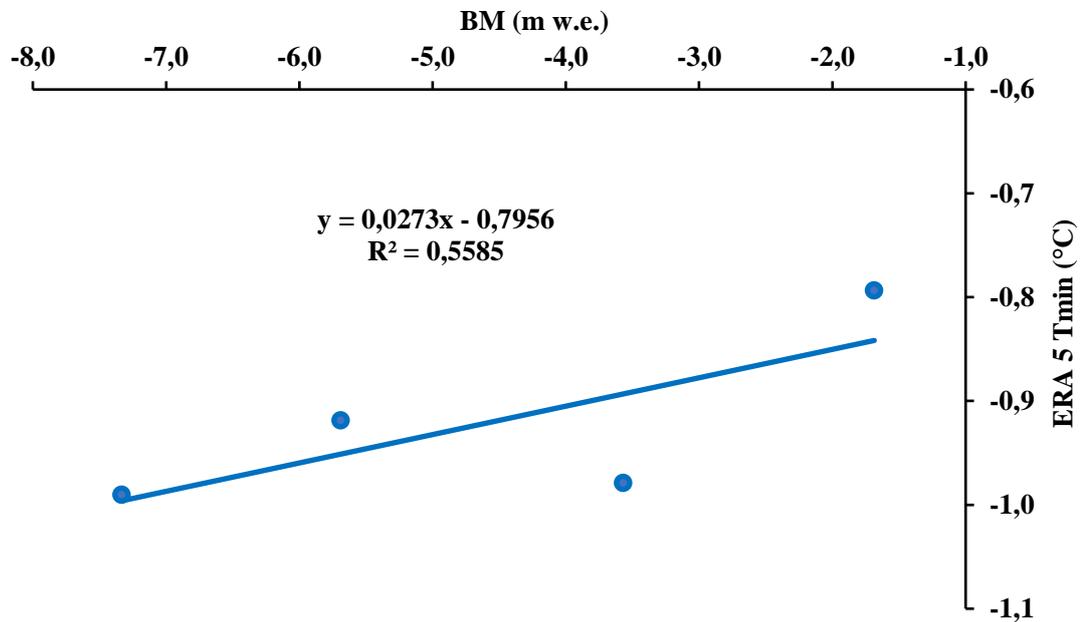
*Correlación del balance de masa anual con la anomalía 3.4*



La correlación entre el balance de masa y la temperatura mínima del ERA5 2m es de 56% ver la Figura 67 y con el balance de masa anual de 85% ver la Figura 68.

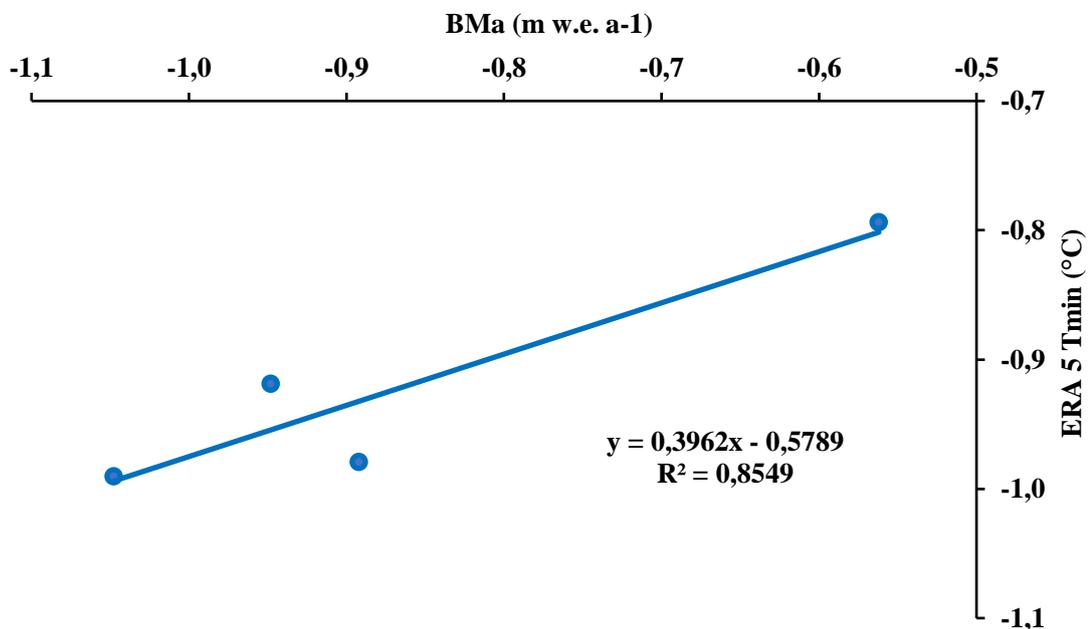
**Figura 67**

*Correlación del balance de masa con ERA5 2m Tmin*



**Figura 68**

*Correlación del balance de masa anual con ERA5 2m Tmin*

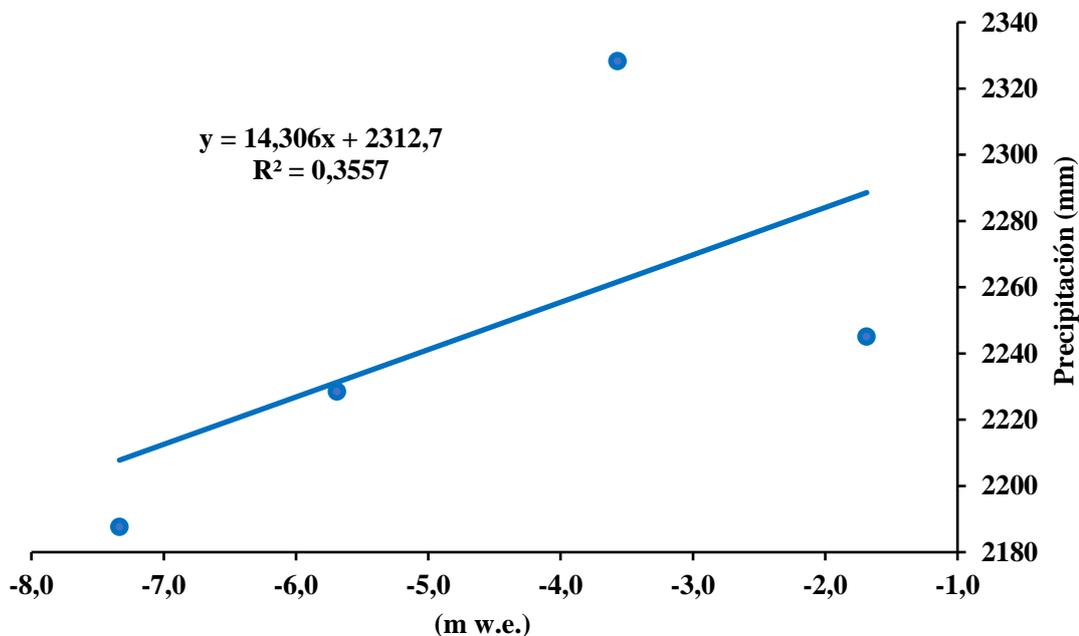


Las correlaciones del balance con la temperatura máxima con las estaciones de Artesonraju y Shallap es de 81% y 38, con el balance de masa anual de 99% y 62%, en Cuchillacocha es de 8% de los más resaltantes.

La correlación de determinación de Pearson entre el balance de masa de la Cordillera Blanca con la precipitación promedio es de 36% con se muestra en la Figura 69.

### Figura 69

*Correlación del balance de masa con la precipitación*



Las correlaciones con las estaciones de Artesonraju, Cuchillacocha y Shallap es de 93%, 67% y 67% respectivamente. La correlación entre en balance anual y la precipitación ERA5 2m es de 7% y con las estaciones mencionadas antes y en ese orden de 68%, 71% y 56%.

## CAPÍTULO V

### DISCUSIÓN DE RESULTADOS

#### 5.1. Cambios de área glaciar

El área glaciar determinado en la Cordillera Blanca por la plataforma de Google Earth Engine (GEE) fue de 425.6997 Km<sup>2</sup> y comparado con el inventario de glaciares elaborado por Instituto Nacional de Investigación en Glaciares y Ecosistemas de Montaña (INAIGEM) para el año de 2016 fue de 425.8184 Km<sup>2</sup>, con diferencia de 0.120 km<sup>2</sup>, esta variación se debe a la diferencia de resolución de imágenes satelitales, mientras que en la clasificación realizada en la plataforma de GEE es a partir de imágenes Landsat 5 y 8 de 30 m de resolución, y en el inventario con imágenes Sentinel-2 de 10-12 m.

Esto también se debe a otros factores como lo mencionado por Veettil (2018) que indica la sensibilidad del índice de NDSI para el mapeo de glaciares. Siendo menos sensibles a las sombras proyectadas y al terreno empinado, las imágenes del Sentinel-2 en comparación con los datos Landsat. El retroceso glaciar entre 1962-2020 es de 327.056 km<sup>2</sup> representando una pérdida del 56%.

#### 5.2. Dinámica del balance de masa glaciar

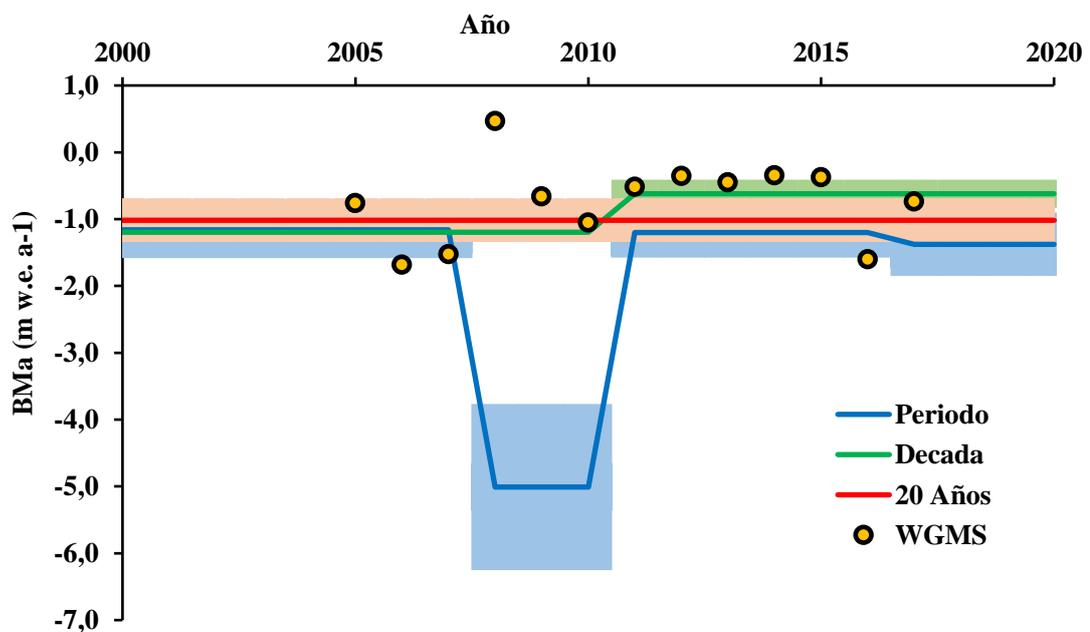
El balance de masa en el glaciar Gueshgue en el periodo de 1962-2020 es de -1.949 m w.e. a<sup>-1</sup>, lo cual equivale a un volumen glaciar de -126,103,423 m<sup>3</sup>. El balance de masa para los glaciares de Artesonraju y Llaca no se realizó debido a las dificultades al momento de generar los modelos de elevación digital a partir de las fotografías

aéreas del año 1962. Estas sobrestiman la altitud en las partes altas de los glaciares, la información de las fotografías aéreas es limitada por tener la Metadatos incompleta como la distancia focal, tipo de cámara, etc., asimismo, estos glaciares presentan una topografía accidentada a diferencia del glaciar Gueshgue, los cuales dificultan la coincidencia de puntos en común entre una fotografía a otra. Además, la información de campo como los puntos de control está en PSAD 56 y al momento de realizar la conversión a UTM WGS 84 18 S no coinciden con la información de campo del año 2020.

Los glaciares de Artesonraju y Yanamarey son los más representativos de las unidades hidrográficas de Lullán y Yanayacu, respectivamente, y con registro de balances glaciológicos anuales desde el 2004 en adelante; información disponible en los reportes del Servicio Mundial de Monitoreo de Glaciares [WGMS] ([https://wgms.ch/data\\_exploration/](https://wgms.ch/data_exploration/)). En las Figuras 70 y 71 se presenta la comparación de los balances de masa de los glaciares Artesonraju y Yanamarey del WGMS con lo estimado por el método geodésico.

**Figura 70**

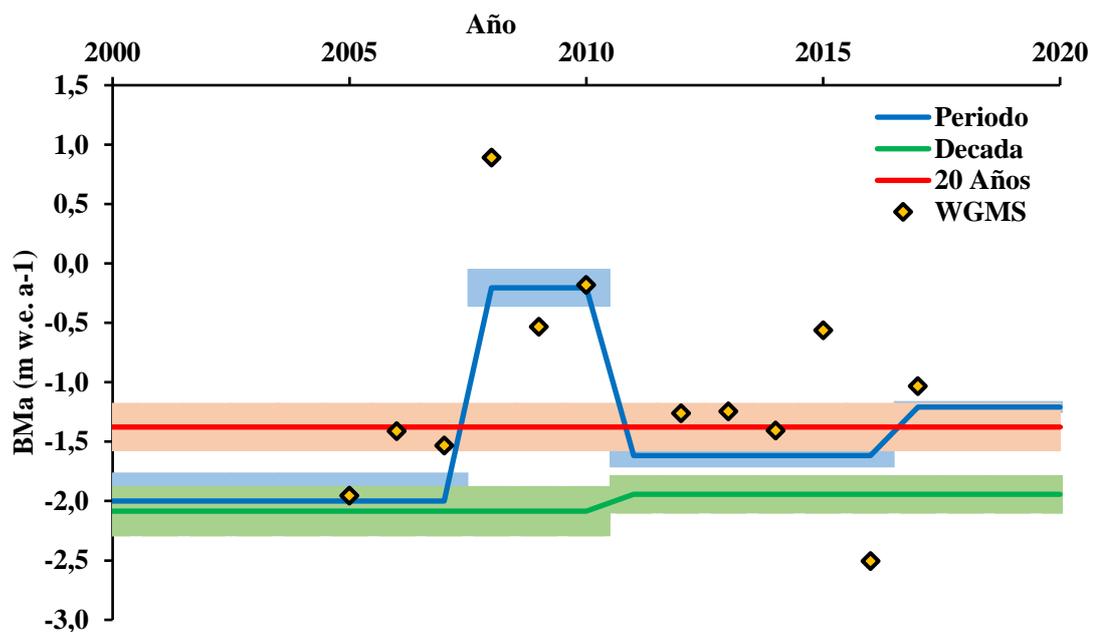
*Balance de masa geodésico y glaciológico (WGMS) del glaciar Artesonraju*



El balance de masa del glaciar Artesonraju como se observa en la Figura 70, entre los años 2005-2006 y 2006-2007, es de  $-1.16 \pm 0.07$  m w.e.  $a^{-1}$ , lo cual es similar a lo reportado por la WGMS con valores de  $-1.679$  y  $-1.522$  m w.e. $a^{-1}$ ; de manera similar sucede entre 2009-2010 y 2015-2016  $-1.202$  m w.e. $a^{-1}$  y  $-1.598$  m w.e. $a^{-1}$ . Los balances de masa del WGMS es menor al balance anual (línea de color roja), así mismo los balances decanales (línea de color verde) son similares al WGMS, con menores valores de 2010 en adelante, con respecto a los balances por periodos (línea de color azul) son más negativos que la mayoría del WGMS con algunos balances que están dentro de error. Entre en periodo de 2007-2010 hay una sobreestimación del balance, esto se debe a la temporalidad (3 años) estimado en el método geodésico.

**Figura 71**

*Balance de masa geodésico y glaciológico (WGMS) del glaciar Yanamarey*



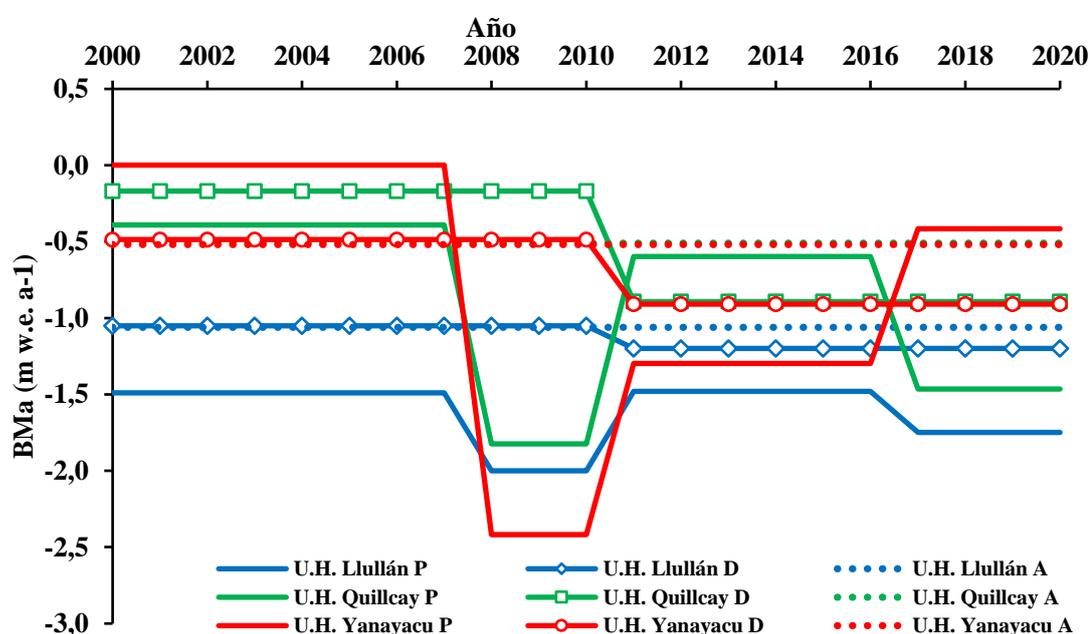
El balance de masa del glaciar Yanamarey como se observa en la Figura 71, entre los años 2004-2005, 2005-2006 y 2006-2007, es de  $-2.00 \pm 0.24$  m w.e.  $a^{-1}$  y según WGMS  $-1.955$ ,  $-1.712$  y  $-1.532$  m w.e. $a^{-1}$  respectivamente y caso similar sucede para el año de 2013-2014 con balance geodésico de  $-1.617 \pm 0.10$  m w.e. $a^{-1}$  y según WGMS  $-1.407$  m w.e. $a^{-1}$ . Los balances de masa del WGMS es menor al balance anual (línea de color roja), así mismo los balances decanales (línea de color verde) son más negativos al

WGMS, con respecto a los balances por periodos (línea de color azul) no hay mucha coincidencia con del WGMS con algunos balances que están dentro de error.

El balance de masa estimado por el método geodésico en los glaciares de Artesonraju y Yanamarey son más negativo que los reportes por la WGMS. Esto se puede deber a los errores propios de cada método que sobreestimación o subestimación, también a los límites de los glaciares que se consideran para cada balance de masa.

**Figura 72**

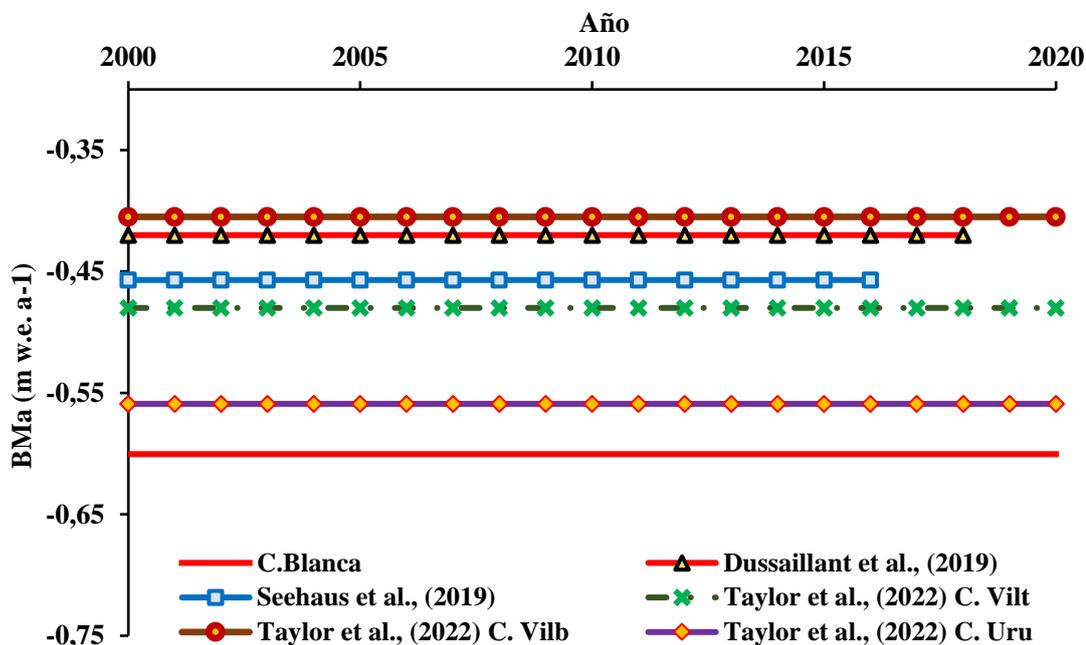
*Balance de masa en distintos tiempos en las unidades hidrográficas*



El balance de masa en las unidades hidrográficas de Llullán, Quillcay y Yanayacu como se observa en la Figura 72 entre 2000-2020, es mayor en la U.H. de Llullán con  $-1.061 \pm 0.036$  m w.e. a<sup>-1</sup>, seguida de la U.H. de Yanayacu con  $-0.519 \pm 0.018$  m w.e. a<sup>-1</sup> y  $-0.510 \pm 0.051$  m w.e. a<sup>-1</sup> U.H. de Quillcay. Los mayores balances por periodos se observan entre 2007-2010 con  $-2.000 \pm 0.892$  m w.e. a<sup>-1</sup>,  $-1.824 \pm 0.358$  m w.e. a<sup>-1</sup> y  $-2.418 \pm 0.162$  m w.e. a<sup>-1</sup> respectivamente, esto se debe a un periodo más corto a diferencia de otros. Los balances de masa decanales son más negativos en la última década con  $-11.989 \pm 1.254$  m w.e.,  $-8.931 \pm 0.295$  m w.e. y  $-9.091 \pm 0.071$  m w.e. en las tres unidades hidrográficas.

**Figura 73**

*Balance de masa en las cordilleras nevadas*



El balance de masa glaciar anual en la cordillera Blanca, como se observa en la Figura 73, entre 2000-2020, es de  $-0.600 \pm 0.058$  m w.e.  $a^{-1}$ . Este valor es mayor a lo reportado por Dussailant et al. (2019) entre los Andes tropicales ( $-0.42 \pm 0.24$  m w.e.  $a^{-1}$ ) entre el 2000 y 2018. Asimismo, resulta mayor comparado con los  $-0.457 \pm 0.064$  m w.e.  $a^{-1}$  reportado por Seehaus et al. (2019) para el periodo 2000-2016 en las cordilleras de Perú.

En comparación con otras cordilleras nevadas del Perú, el balance de masa entre 2000-2020 para la Cordillera Blanca es de  $-0.600 \pm 0.058$  m w.e.  $a^{-1}$ . Mientras que lo estimado por Taylor et al. (2022) para las Cordilleras de Vilcanota, Vilcabamba y Urubamba es de  $-0.48 \pm 0.07$  m w.e. $a^{-1}$   $-0.405 \pm 0.451$  m w.e. $a^{-1}$  y  $-0.559 \pm 1.575$  m w.e. $a^{-1}$  respectivamente, siendo muy similares.

El balance de masa por década en la Cordillera Blanca entre 2000-2010 es de  $-0.442 \pm 0.145$  m w.e.  $a^{-1}$  y entre 2010-2020 es de  $-0.911 \pm 0.085$  m w.e.  $a^{-1}$  siendo mayor en la última década. La primera década es ligeramente menor a lo obtenido por Taylor et al.

(2022) en Cordillera Vilcanota  $-0,49 \pm 0,17$  m w.e.a<sup>-1</sup> y mayor a la última década  $-0,44 \pm 0,16$  m w.e.a<sup>-1</sup>.

Los balances de masa altos pueden deberse al modelo de elevación digital de referencia SRTM para el año 2000, si bien en cuanto a los errores verticales representa mejor a los del terreno con error cuadrático medio de 5.113 m como lo mencionado por González-Moradas & Viveen, (2020) a diferencia del ASTER con 6.907 m.

El DEM SRTM es muy fundamental para el co-registro (ajustes de desplazamientos) de los DEM ASTER, el punto débil de este DEM es que se obtuvo a partir de la interferometría de radar de banda C que tiene penetración en nieve y hielo, esto puede influir en los resultados de los cambios de elevación de la superficie de los glaciares. En glaciares son High Mountain Asia Li et al. (2021) encontró una profunda de penetración de  $7.63 \pm 0.99$  m o de 3 m en glaciares de Karakoram Gardelle et al. (2012), esto puede considerar por debajo de la superficie real especialmente en área de acumulación Langley et al. (2008), llevando a estimaciones sesgadas de los cambios de elevación.

Es podría explicar balance de masa mayor en la cordillera Blanca a los registrados por Dussaillant et al. (2019) y Seehaus et al. (2019) teniendo topografías más accidentadas en la cordillera Blanca, y esto también se muestra que el periodo de mayor pérdida es entre 2000-2007 de  $-7.334 \pm 0.768$  m w.e, balance anual de  $-1.048 \pm 0.110$  m w.e. a<sup>-1</sup> y un retroceso de espesor de  $-1.305$  m a<sup>-1</sup>.

El adelgazamiento de los glaciares en todo Perú entre 2000-2016 estimado por Seehaus et al. (2019) es de  $-0.359 \pm 0.068$  m a<sup>-1</sup> y en la cordillera Blanca entre 2000-2020 de  $-0.509$  m a<sup>-1</sup>. Estas tasa de adelgazamiento se dan tanto en las elevaciones altas y bajas como lo indicado por Dussaillant et al. (2019).

### 5.3. Influencia de la temperatura y precipitación en el balance

La temperatura aumentó ligeramente. Existe una correlación negativa entre el balance de masa con el Niño 3.4 SST de 39% y con anomalías 3.4 de 43%. Este resultado concuerda con lo mencionado por (Vuille et al. 2008) quien encontró una relación muy

significativa con Niño 3.4 SST. El balance de masa anual tiene una correlación del 73% con el Niño 3.4 SST y una correlación del 76% con la anomalía de 3.4.

La correlación entre el balance de masa con la temperatura mínima del producto ERA5 2 m es de 56% y con el balance de masa anual de 85%. Las correlaciones del balance con la temperatura máxima con las estaciones de Artesonraju y Shallap es de 81% y 38, con el balance de masa anual de 99% y 62%, en Cuchillacocha es de 8%. La prueba de Mann-Kendall indica que hay una tendencia en la serie en la Temperatura de ERA5 2 m.

La correlación entre el balance de masa con la precipitación es de 36%. La correlación con la información de las estaciones de Artesonraju, Cuchillacocha y Shallap de 93%, 67% y 67%. La correlación entre en balance anual es de 7% y con las estaciones mencionadas anteriormente y en ese orden de 68%, 71% y 56%. La prueba de Mann-Kendall indica que no hay una tendencia en la serie.

Este resultado es inconsistente con lo mencionado por Fyffe et al. (2021) quienes muestran que el balance de masa se ve más afectado por la precipitación que al aumento de la temperatura en la Cordillera Blanca.

En general, el balance de masa tiene una correlación relativamente baja con la temperatura y la precipitación. Indicando así que hay otras variables climáticas, topográficas y condiciones del lugar que intervienen en la pérdida del glaciar.

## CAPÍTULO VI

### CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

#### 6.1. Conclusiones

El retroceso glaciar en las unidades hidrológicas Lullán, Quillcay y Yanayacu durante 1962-2020, la unidad Lullán es la que más retrocedió con 12,164 km<sup>2</sup> representando el 64%, seguida por Quillcay con 17,238 km<sup>2</sup> representando el 63% y Yanayacu con 11,391 para el 32%, la Cordillera Blanca, un área de 327.056 km<sup>2</sup> perdió el 56%.

El balance de masa del glaciar Gueshgue fue de -126 103 423 m<sup>3</sup> de 1962 a 2020 y de -1 949 m w.e. a<sup>-1</sup> en 58 años. En los glaciares Artesonraju y Llaca no se pudieron obtener resultados por las dificultades antes mencionadas.

El balance de masa en las unidades hidrográficas de Lullán, Quillcay y Yanayacu entre 2000 al 2020 fueron de  $-21.217 \pm 0.713$  m w.e.,  $-10.190 \pm 1.01$  m w.e. y  $-10.386 \pm 0.35$  m w.e. respectivamente, y el balance anual fue de  $-1.061 \pm 0.035$  m w.e. a<sup>-1</sup>,  $-0.510 \pm 0.029$  m w.e. a<sup>-1</sup> y  $-0.519 \pm 0.007$  m w.e. a<sup>-1</sup>, el balance anual más negativo se registró durante 2007-2010 con  $-2.000 \pm 0.892$  m w.e. a<sup>-1</sup>,  $-1.824 \pm 0.358$  m w.e. a<sup>-1</sup> y  $-2.418 \pm 0.162$  m w.e. a<sup>-1</sup>. En la última década, los balances son más negativos en las tres unidades hidrográficas.

El balance de masa glaciar en la cordillera Blanca entre 2000–2020 es de  $-12.008 \pm 1.167$  m w.e, balance anual de  $-0.600 \pm 0.058$  m w.e. a<sup>-1</sup> y un retroceso de espesor de 0.509 m a<sup>-1</sup>. El balance decenal entre 2010-2020 presenta la mayor pérdida con  $-9.114 \pm 0.854$  m w.e, balance anual de  $-0.911 \pm 0.085$  m w.e. a<sup>-1</sup> y un retroceso de espesor

de  $-0.830 \text{ m a}^{-1}$ , el periodo de mayor pérdida fue 2000-2007 de  $-1.048 \pm 0.110 \text{ m w.e. a}^{-1}$  y un retroceso de espesor de  $-1.305 \text{ m a}^{-1}$ .

La temperatura ha sufrido un ligero incremento desde 1962-2020, la relación entre el balance de masa glaciario y la temperatura superficie de mar del Niño 3.4 fue de 39% y anomalías de 43%. El balance de masa anual con el Niño 3.4 SST fue de 73% y anomalía 3.4 de 76%. La correlación entre el balance de masa con la temperatura mínima del producto ERA5 2 m fue de 56% y con el balance de masa anual de 85%. La prueba de Mann-Kendall indica que hay una tendencia en la serie en la Temperatura de ERA5 2 m.

La correlación del balance de masa con la precipitación, es de 36% y de 93% con la estación de Artesonraju, y balance de masa anual fue de 7% y de 71% con la estación de Cuchillacocha. La prueba de Mann-Kendall muestra que no hay tendencia en la serie. En general hay una compleja interacción de la temperatura y precipitación con el balance de masa.

## 6.2. Recomendaciones

En futuras investigaciones, se recomienda complementar con datos de campo como la densidad, espesor, etc. Estimaciones de balance de masa a través de modelos digitales de elevación digital de mejor resolución espacial, temporalidad y calidad para reducir los errores aleatorios y sistemáticos. Replicar la investigación en otras Cordilleras peruanas para conocer el estado actual de los glaciares.

La fotogrametría en el balance de masa de los glaciares abre nuevas vías para determinar el estado de los glaciares y complementa en lugares de difíciles accesos, por lo que se recomienda continuar utilizando esta técnica para recopilar información en el área de estudio, incluyendo otros glaciares y otras Cordilleras nevadas del Perú.

Se recomienda contar con red más amplia de estaciones meteorológicas que proporcionen información de diferentes variables climáticas (velocidad de viento, dirección de viento, radiación, etc.) así como variables glaciológicas y topográficas (pendiente, orientación, etc.) que complemente el entendimiento del balance de masa.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Ahrens, C. D., & Henson, R. (2018). *Meteorology Today: An Introduction to Weather, Climate, and the Environment, Twelfth Edition*.
- Alata Quispe, C. M. (2019). *Evaluación del recurso hídrico superficial de la quebrada Pariac, cuenca del río Santa, para el proyecto de las centrales hidroeléctricas Pariac V y Pariac VI* [Universidad Nacional Mayor de San Marcos Facultad de Ciencias Físicas Escuela Profesional de Ingeniería Mecánica de Fluidos]. <https://cybertesis.unmsm.edu.pe/handle/20.500.12672/10774>
- ANA. (2014). Inventario de Glaciares y Lagunas-resumen grafico. *Unidad de Glaciología y Recursos Hídricos, Autoridad Nacional Del Agua (ANA)*. [https://www.ana.gob.pe/contenido/inventario\\_naci\\_99778220](https://www.ana.gob.pe/contenido/inventario_naci_99778220)
- Arora, M. K., Shukla, A., & Gupta, R. P. (2011). *Digital Image Information Extraction Techniques for Snow Cover Mapping from Reomte Sensing Data. January 2011*, 883–903. <https://doi.org/10.1007/978-90-481-2642-2>
- Bader, H. (1954). Sorge's Law of Densification of Snow on High Polar Glaciers. *Journal of Glaciology*, 2(15), 319–323. <https://doi.org/10.3189/s0022143000025144>
- Bhattacharya, A., Bolch, T., Mukherjee, K., King, O., Menounos, B., Kapitsa, V., Neckel, N., Yang, W., & Yao, T. (2021). High Mountain Asian glacier response to climate revealed by multi-temporal satellite observations since the 1960s. *Nature Communications*, 12(1), 1–13. <https://doi.org/10.1038/s41467-021-24180-y>
- Chander, G., Markham, B. L., & Helder, D. L. (2009). Summary of current radiometric calibration coefficients for Landsat MSS, TM, ETM+, and EO-1 ALI sensors. *Remote Sensing of Environment*, 113(5), 893–903. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2009.01.007>
- Chuvieco, E. (1990). *Fundamentos de teledetección espacial* (Riaf (ed.)).
- Cogley, J. G., Hock, R., Rasmussen, L. A., Arendt, A., Bauder, A., Braithwaite, R., Jansson, P., Kaser, G., Möller, M., Nicholson, L., and Zemp, M. (2011). *Glossary of Glacier Mass Balance and Related Terms, volume No. 86 of IHP-VII Technical Documents in Hydrology*.

- Dussaillant, I., Berthier, E., Brun, F., Masiokas, M., Hugonnet, R., Favier, V., Rabatel, A., Pitte, P., & Ruiz, L. (2019). Two decades of glacier mass loss along the Andes. *Nature Geoscience*, 12(10), 802–808. <https://doi.org/10.1038/s41561-019-0432-5>
- Elkhrachy, I. (2018). Vertical accuracy assessment for SRTM and ASTER Digital Elevation Models: A case study of Najran city, Saudi Arabia. *Ain Shams Engineering Journal*, 9(4), 1807–1817. <https://doi.org/10.1016/j.asej.2017.01.007>
- Falvey, M., & Garreaud, R. D. (2005). Moisture variability over the South American Altiplano during the South American low level jet experiment (SALLJEX) observing season. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 110(22), 1–12. <https://doi.org/10.1029/2005JD006152>
- Ferrando, F. A. (2014). *análisis y propuesta de definición de “Glaciar.” Departamento de Geografía-Universidad de Chile.* <https://www.camara.cl/verDoc.aspx?prmID=18201&prmTIPO=DOCUMENTOCOMISION>
- Fischer, M., Huss, M., & Hoelzle, M. (2015). Surface elevation and mass changes of all Swiss glaciers 1980-2010. *Cryosphere*, 9(2), 525–540. <https://doi.org/10.5194/tc-9-525-2015>
- Francou, B., & Pouyaud, B. (2008). Glaciares : ¿ cómo y dónde estudiarlos ? *Revista Virtual REDESMA*, 2(3), 9.
- Francou, B., Pouyaud, B., & Others, A. (2004). Métodos de observación de glaciares en los Andes Tropicales. Mediciones de terreno y procesamiento de datos. *Great Ice, IRD*, 1(May), 238. <https://doi.org/10.13140/RG.2.1.4220.8164>
- Fyffe, C.L.; Potter, E. ; Fugger, S.; Orr, A.; Fatichi, S.; Loarte, E.; Medina, K.; Hellström, R.Å.; Bernat, M.; Aubry-Wake, C.; Gurgiser, W.; Perry, L.B.; Suarez, W.; Quincey, D.J.; Pellicciotti, F. (2021). *Averaged WRF (Weather Research and Forecasting) data for the Rio Santa and Vilcanota regions, Peru, 1980-2018. NERC EDS E.* <https://doi.org/https://doi.org/10.5285/7dbb2d72-7032-4cfa-bc9b-aa02bebe8df5>
- Fyffe, C. L., Potter, E., Fugger, S., Orr, A., Fatichi, S., Loarte, E., Medina, K., Hellström, R., Bernat, M., Aubry-Wake, C., Gurgiser, W., Perry, L. B., Suarez, W., Quincey, D.

- J., & Pellicciotti, F. (2021). The Energy and Mass Balance of Peruvian Glaciers. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 126(23), 1–22. <https://doi.org/10.1029/2021JD034911>
- Gardelle, J., Berthier, E., Arnaud, Y., & Kääb, A. (2013). Region-wide glacier mass balances over the Pamir-Karakoram-Himalaya during 1999–2011. *Cryosphere*, 7(4), 1263–1286. <https://doi.org/10.5194/tc-7-1263-2013>
- Gardelle, Julie, Berthier, E., & Arnaud, Y. (2012). Impact of resolution and radar penetration on glacier elevation changes computed from DEM differencing. *Journal of Glaciology*, 58(208), 419–422. <https://doi.org/10.3189/2012JoG11J175>
- González-Moradas, M. del R., & Viveen, W. (2020). Evaluation of ASTER GDEM2, SRTMv3.0, ALOS AW3D30 and TanDEM-X DEMs for the Peruvian Andes against highly accurate GNSS ground control points and geomorphological-hydrological metrics. *Remote Sensing of Environment*, 237(April 2019), 111509. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2019.111509>
- Haeberli, W. (2011). Glacier mass balance. *Encyclopedia of Earth Sciences Series, Part 3*(June), 399–408. [https://doi.org/10.1007/978-90-481-2642-2\\_341](https://doi.org/10.1007/978-90-481-2642-2_341)
- Hall, D. K., & Riggs, G. A. (1995). Mapping global snow cover using Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS) data. *Report GD-30: Monitoring an Evolving Cryosphere - Summary of the NSIDC Special Session at the American Geophysical Union Fall Meeting 2001*, 4257, 13–17.
- Hugonnet, R., McNabb, R., Berthier, E., Menounos, B., Nuth, C., Girod, L., Farinotti, D., Huss, M., Dussaillant, I., Brun, F., & Kääb, A. (2021). Accelerated global glacier mass loss in the early twenty-first century. *Nature*, 592(7856), 726–731. <https://doi.org/10.1038/s41586-021-03436-z>
- Huh, K. I., Mark, B. G., Ahn, Y., & Hopkinson, C. (2017). Volume change of tropical peruvian glaciers from multi-temporal digital elevation models and volume–surface area scaling. *Geografiska Annaler, Series A: Physical Geography*, 99(3), 222–239. <https://doi.org/10.1080/04353676.2017.1313095>
- Huss, M. (2013). Density assumptions for converting geodetic glacier volume change to

- mass change. *The Cryosphere*, 7(3), 877–887. <https://doi.org/10.5194/tc-7-877-2013>
- Ibánes M, E. (2008). *Validación de Modelos Digitales del Terreno de precisión a partir de datos láser escáner aerotransportado; aplicación a la Marisma del Parque Nacional de Doñana*. Universidad Politécnica de Cataluña.
- IDEAM. (2014). *Formato Común de Hoja Metodológica de Indicadores Ambientales Balance de masa glaciar ( Bn ) Formato Común Hoja Metodológica*. 96, 1–9.
- INAIGEM. (2017). Manual Metodológico de Inventario Nacional de Glaciares. *Instituto Nacional de Investigación En Glaciares y Ecosistemas de Montaña*. <http://repositorio.inaigem.gob.pe/handle/INAIGEM/173>
- INAIGEM. (2018). Inventario Nacional De Glaciares Las Cordilleras Glaciares Del Perú. *Instituto Nacional de Investigación En Glaciares y Ecosistemas de Montaña*, 354. <http://repositorio.inaigem.gob.pe/handle/INAIGEM/169>
- IPCC. (2003). Climate change 2001: synthesis report. In *Choice Reviews Online* (Vol. 40, Issue 08). <https://doi.org/10.5860/choice.40-4660>
- IPCC. (2019). *Informe especial del IPCC sobre el océano y la criosfera en un clima cambiante - Informe especial del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático*. <https://www.ipcc.ch/2019/09/23/b-roll-ipcc-srocc/>
- Jauregui, L. (2010). *Introducción a la Fotogrametría*. 1–12. <http://webdelprofesor.ula.ve/ingenieria/iluis/publicaciones/Fotogrametr%EDA/CAPITULO1.pdf>
- Jiménez, R. M. R., Capa, Á. B., & Lozano, A. P. (2004). *Meteorología Y Climatología*. <https://cab.inta-csic.es/uploads/culturacientifica/adjuntos/20130121115236.pdf>
- Juřicová, A., & Fratianni, S. (2018). Climate change and its relation to the fluctuation in glacier mass balance in the Cordillera Blanca, Peru: A review. *Acta Universitatis Carolinae, Geographica*, 53(1), 106–118. <https://doi.org/10.14712/23361980.2018.10>
- Kääb, A. (2005). Remote Sensing of Mountain Glaciers and Permafrost Creep. *Schriftenreihe Physische Geographie*, 48, 266. <http://scholar.google.com/scholar?hl=en&btnG=Search&q=intitle:Remote+Sensing+of+Mountain+Glaciers+and+Permafrost+Creep#0>

- Kaser, G. (1999). A review of the modern fluctuations of tropical glaciers. *Global and Planetary Change*, 22(1–4), 93–103. [https://doi.org/10.1016/S0921-8181\(99\)00028-4](https://doi.org/10.1016/S0921-8181(99)00028-4)
- Kaser, G., Ames, A., & Zamora, M. (1990). Glacier fluctuations and climate in the Cordillera Blanca, Peru. *Annals of Glaciology*, 14, 136–140. <https://doi.org/10.3189/s0260305500008430>
- Langley, K., Hamran, S. E., Høgda, K. A., Storvold, R., Brandt, O., Köhler, J., & Hagen, J. O. (2008). From glacier facies to SAR backscatter zones via GPR. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 46(9), 2506–2516. <https://doi.org/10.1109/TGRS.2008.918648>
- Li, C., Jiang, L., Liu, L., & Wang, H. (2021). Regional and Altitude-Dependent Estimate of the SRTM C/X-Band Radar Penetration Difference on High Mountain Asia Glaciers. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 14, 4244–4253. <https://doi.org/10.1109/JSTARS.2021.3070362>
- Mark, B. G., & Seltzer, G. O. (2005). Evaluation of recent glacier recession in the Cordillera Blanca, Peru (AD 1962-1999): Spatial distribution of mass loss and climatic forcing. *Quaternary Science Reviews*, 24(20–21), 2265–2280. <https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2005.01.003>
- Nuth, C., & Kääb. (2011). Co-registration and bias corrections of satellite elevation data sets for quantifying glacier thickness change. *Cryosphere*, 5(1), 271–290. <https://doi.org/10.5194/tc-5-271-2011>
- Paul, F., Barrand, N. E., Baumann, S., Berthier, E., Bolch, T., Casey, K., Frey, H., Joshi, S. P., Konovalov, V., Le Bris, R., Mölg, N., Nosenko, G., Nuth, C., Pope, A., Racoviteanu, A., Rastner, P., Raup, B., Scharrer, K., Steffen, S., & Winsvold, S. (2013). On the accuracy of glacier outlines derived from remote-sensing data. *Annals of Glaciology*, 54(63), 171–182. <https://doi.org/10.3189/2013AoG63A296>
- Pouyaud, B., Zapata, M., Yerren, J., Gomez, J., Rosas, G., Suarez, W., & Ribstein, P. (2005). Avenir des ressources en eau glaciaire de la Cordillère Blanca. *Hydrological Sciences Journal*, 50(6), 999–1024. <https://doi.org/10.1623/hysj.2005.50.6.999>
- Rabatel, A., Francou, B., Soruco, A., Gomez, J., Cáceres, B., Ceballos, J. L., Basantes, R.,

- Vuille, M., Sicart, J. E., Huggel, C., Scheel, M., Lejeune, Y., Arnaud, Y., Collet, M., Condom, T., Consoli, G., Favier, V., Jomelli, V., Galarraga, R., ... Wagnon, P. (2013). Current state of glaciers in the tropical Andes: A multi-century perspective on glacier evolution and climate change. *Cryosphere*, 7(1), 81–102. <https://doi.org/10.5194/tc-7-81-2013>
- Rabatel, A., Bermejo, A., Loarte, E., Soruco, A., Gomez, J., Leonardini, G., Vincent, C., & Sicart, J. E. (2012). Can the snowline be used as an indicator of the equilibrium line and mass balance for glaciers in the outer tropics? *Journal of Glaciology*, 58(212), 1027–1036. <https://doi.org/10.3189/2012JoG12J027>
- Racoviteanu, A. E., Arnaud, Y., Williams, M. W., & Ordoñez, J. (2008). Decadal changes in glacier parameters in the Cordillera Blanca, Peru, derived from remote sensing. *Journal of Glaciology*, 54(186), 499–510. <https://doi.org/10.3189/002214308785836922>
- Rastner, P., Joerg, P. C., Huss, M., & Zemp, M. (2016). Historical analysis and visualization of the retreat of Findelengletscher, Switzerland, 1859–2010. *Global and Planetary Change*, 145, 67–77. <https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2016.07.005>
- Rivera, A. (2016). *Manual de balance de masa glaciar*.
- Sagredo, E. A., & Lowell, T. V. (2012). Climatology of Andean glaciers: A framework to understand glacier response to climate change. *Global and Planetary Change*, 86–87, 101–109. <https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2012.02.010>
- Sagredo, Esteban A., Rupper, S., & Lowell, T. V. (2014). Sensitivities of the equilibrium line altitude to temperature and precipitation changes along the Andes. *Quaternary Research (United States)*, 81(2), 355–366. <https://doi.org/10.1016/j.yqres.2014.01.008>
- Schauwecker, S., Rohrer, M., Acuña, D., Cochachin, A., Dávila, L., Frey, H., Giráldez, C., Gómez, J., Huggel, C., Jacques-Coper, M., Loarte, E., Salzmann, N., & Vuille, M. (2014). Climate trends and glacier retreat in the Cordillera Blanca, Peru, revisited. *Global and Planetary Change*, 119, 85–97. <https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2014.05.005>
- Seehaus, T., Malz, P., Sommer, C., Lippl, S., Cochachin, A., & Braun, M. (2019). Changes

- of the tropical glaciers throughout Peru between 2000 and 2016 – mass balance and area fluctuations. *The Cryosphere*, 13(10), 2537–2556. <https://doi.org/10.5194/tc-13-2537-2019>
- Silverio, W., & Jaquet, J. M. (2017). Evaluating glacier fluctuations in Cordillera Blanca (Peru) by remote sensing between 1987 & 2016 in the context of ENSO. *Archives Des Sciences*, 69(2), 145–161.
- Sulca, J., Takahashi, K., Espinoza, J. C., Vuille, M., & Lavado-Casimiro, W. (2018). Impacts of different ENSO flavors and tropical Pacific convection variability (ITCZ, SPCZ) on austral summer rainfall in South America, with a focus on Peru. *International Journal of Climatology*, 38(1), 420–435. <https://doi.org/10.1002/joc.5185>
- Taylor, L. S., Quincey, D. J., Smith, M. W., Potter, E. R., Castro, J., & Fyffe, C. L. (2022). Multi-Decadal Glacier Area and Mass Balance Change in the Southern Peruvian Andes. *Frontiers in Earth Science*, 10(March), 1–14. <https://doi.org/10.3389/feart.2022.863933>
- Thibert, E., Blanc, R., Vincent, C., & Eckert, N. (2008). Glaciological and volumetric mass-balance measurements: Error analysis over 51 years for Glacier de Sarennes, French Alps. *Journal of Glaciology*, 54(186), 522–532. <https://doi.org/10.3189/002214308785837093>
- Todd H., A. (2002). Evaluation of Remote Sensing Techniques for Ice-Area Classification Applied to the Tropical Quelccaya Ice Cap, Peru. *Polar Geography*, 26(3), 210–226. <https://doi.org/10.1080/789610193>
- Tomás, R., Riquelme, A., Cano, M., & Abellán, A. (2016). Structure from Motion (SfM): una técnica fotogramétrica de bajo coste para la caracterización y monitoreo de macizos rocosos. *10º Simposio Nacional de Ingeniería Geotécnica, A Coruña, España*, 1(1), 209–216.
- Urrutia, R., & Vuille, M. (2009). Climate change projections for the tropical Andes using a regional climate model: Temperature and precipitation simulations for the end of the 21st century. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 114(2), 1–15. <https://doi.org/10.1029/2008JD011021>

- Veettil, Bijeeesh Kozhikkodan, Kamp, U. (2019). Global disappearance of tropical mountain glaciers: Observations, Causes, and Challenges. *Geosciences (Switzerland)*, 9(5), 1–25. <https://doi.org/10.3390/geosciences9050196>
- Veettil, Bijeeesh K. (2018). Glacier mapping in the Cordillera Blanca, Peru, tropical Andes, using Sentinel-2 and Landsat data. *Singapore Journal of Tropical Geography*, 39(3), 351–363. <https://doi.org/10.1111/sjtg.12247>
- Veettil, Bijeeesh K., & Kamp, U. (2017). Remote sensing of glaciers in the tropical andes: A review. *International Journal of Remote Sensing*, 38(23), 7101–7137. <https://doi.org/10.1080/01431161.2017.1371868>
- Veettil, Bijeeesh Kozhikkodan, Wang, S., Florêncio de Souza, S., Bremer, U. F., & Simões, J. C. (2017). Glacier monitoring and glacier-climate interactions in the tropical Andes: A review. *Journal of South American Earth Sciences*, 77, 218–246. <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2017.04.009>
- Vuille, M., Bradley, R. S., & F, K. (2000). Climate variability in the Andes of Ecuador and its relation to tropical Pacific and Atlantic Sea Surface temperature anomalies. *Journal of Climate*, 13(14), 2520–2535. [https://doi.org/10.1175/1520-0442\(2000\)013<2520:CVITAO>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0442(2000)013<2520:CVITAO>2.0.CO;2)
- Vuille, M., Bradley, R. S., Werner, M., & Keimig, F. (2003). 20th century climate change in the tropical Andes: Observations and model results. *Climatic Change*, 59(1–2), 75–99. <https://doi.org/10.1023/A:1024406427519>
- Vuille, M., Kaser, G., & Juen, I. (2008). Glacier mass balance variability in the Cordillera Blanca, Peru and its relationship with climate and the large-scale circulation. *Global and Planetary Change*, 62(1–2), 14–28. <https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2007.11.003>
- Zemp, M., Thibert, E., Huss, M., Stumm, D., Rolstad Denby, C., Nuth, C., Nussbaumer, S. U., Moholdt, G., Mercer, A., Mayer, C., Joerg, P. C., Jansson, P., Hynek, B., Fischer, A., Escher-Vetter, H., Elvehøy, H., & Andreassen, L. M. (2013). Reanalysing glacier mass balance measurement series. *Cryosphere*, 7(4), 1227–1245. <https://doi.org/10.5194/tc-7-1227-2013>

## ANEXOS



**ANEXO 1**  
**Matriz de consistencia**



**Título:** “Influencia de la temperatura y la precipitación en el balance de masa glaciar en la Cordillera Blanca, 1962-2020”.

Problema	Objetivos	Hipótesis	Variables	Indicadores	Métodos		
<p><b>Problema general:</b></p> <p>¿Cómo han influido la temperatura y la precipitación en el balance de masa glaciar en la Cordillera Blanca en el periodo 1962-2020?</p>	<p><b>Objetivo general:</b></p> <p>Determinar la influencia de la temperatura y la precipitación en el balance de masa glaciar en la Cordillera Blanca, 1962 – 2020.</p>	<p><b>Hipótesis de investigación</b></p> <p>La temperatura y precipitación influyeron directamente en el balance de masa glaciar en la Cordillera Blanca, en el periodo 1962-2020.</p>	<p><b>VI:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• La temperatura (°C) (Estaciones <i>in situ</i>, Reanálisis y TSM en zonas de niño).</li> <li>• La precipitación (mm). (Estaciones <i>in situ</i> y Reanálisis).</li> </ul>	<p><b>VI:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Temperatura media anual (°C).</li> <li>▪ Precipitación total anual (mm).</li> </ul> <p><b>VD:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Área de glaciar (km<sup>2</sup>).</li> <li>▪ Equivalente de agua (<i>m w.e.</i>).</li> </ul>	<p><b>Tipo de investigación:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Descriptivo.</li> </ul> <p><b>Tipo:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Correlacional.</li> </ul> <p><b>Población:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Área glaciar del flanco occidental de la Cordillera Blanca.</li> </ul> <p><b>Muestra:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Área glaciar de las Unidades Hidrográficas de Lullán, Quillcay y Yanayacu.</li> </ul> <p><b>Técnicas de recolección:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Procesamiento de datos mediante teledetección y SIG de imágenes satelitales ópticas, DEM, fotografías aéreas y RPAS.</li> </ul>		
	<p><b>Objetivo específico 1</b></p> <p>Analizar el retroceso glaciar en las unidades hidrográficas de Lullán, Quillcay y Yanayacu y la Cordillera Blanca en el periodo 1985-2020.</p>		<p><b>Objetivo específico 2</b></p> <p>Determinar el balance de masa glaciar por el método geodésico en las unidades hidrográficas Lullán, Quillcay y Yanayacu en el periodo 1962-2020.</p>	<p><b>Objetivo específico 3</b></p> <p>Estimar el balance de masa glaciar por el método geodésico para la Cordillera Blanca en el periodo 2000-2020.</p>	<p><b>VD:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Área glaciar (Km<sup>2</sup>)</li> <li>• Balance de masa glaciar (<i>m w.e.</i>)</li> </ul>		
	<p><b>Objetivo específico 4</b></p> <p>Analizar la correlación entre la temperatura y precipitación con el balance de masa glaciar en las unidades hidrográficas Lullán, Quillcay y Yanayacu y en la Cordillera Blanca en el periodo 1962-2020.</p>						

*Nota:* **VI:** Variable independiente, **VD:** Variable dependiente, *mm w.e.*: milímetros de masa equivalente de agua y TSM: Temperatura en la superficie del mar.

## ANEXO 2

### Metadata de modelos de elevación digital



*Escenas descargadas de DEM ASTER para el año 2007*

<b>Año</b>	<b>Nombre de la escena</b>	<b>Fecha de adquisición</b>
2005	ASTB050711153325	2005-07-11T15:33:20Z
	ASTB050711153316	2005-07-11T15:33:11Z
	ASTB050812153321	2005-08-12T15:33:17Z
2006	ASTB060721153931	2006-07-21T15:39:27Z
	ASTB060721153940	2006-07-21T15:39:35Z
	ASTB061018153253	2006-10-18T15:32:49Z
	ASTB061018153302	2006-10-18T15:32:58Z
2007	ASTB070825154012	2007-08-25T15:40:08Z
	ASTB070802153410	2007-08-02T15:34:06Z
	ASTB071014152800	2007-10-14T15:27:55Z

*Escenas descargadas de DEM ASTER para el año 2016*

<b>Año</b>	<b>Nombre de la escena</b>	<b>Fecha de adquisición</b>
2016	ASTB160702152859	2016-07-02T15:28:55Z
	ASTB161121154000	2016-11-21T15:39:55Z
	ASTB161121154017	2016-11-21T15:40:13Z
	ASTB161121154008	2016-11-21T15:40:04Z
2017	ASTB170728153416	2017-07-28T15:34:11Z
	ASTB170728153425	2017-07-28T15:34:20Z
	ASTB170804154012	2017-08-04T15:40:07Z
	ASTB170804154029	2017-08-04T15:40:25Z
	ASTB170804154021	2017-08-04T15:40:16Z

*Escenas descargadas de DEM ASTER para el año 2010*

<b>Año</b>	<b>Nombre de la escena</b>	<b>Fecha de adquisición</b>
2009	ASTB090528152847	2009-05-28T15:28:43Z
	ASTB090729154021	2009-07-29T15:40:16Z
	ASTB090729154012	2009-07-29T15:40:07Z
2010	ASTB100529154000	2010-05-29T15:39:55Z
	ASTB100725153404	2010-07-25T15:33:59Z
	ASTB100725153355	2010-07-25T15:33:50Z
	ASTB100725153346	2010-07-25T15:33:41Z
	ASTB100826153339	2010-08-26T15:33:34Z
2011	ASTB100801153953	2010-08-01T15:39:48Z
	ASTB110813153329	2011-08-13T15:33:25Z

*Escenas descargadas de DEM ASTER para el año 2020*

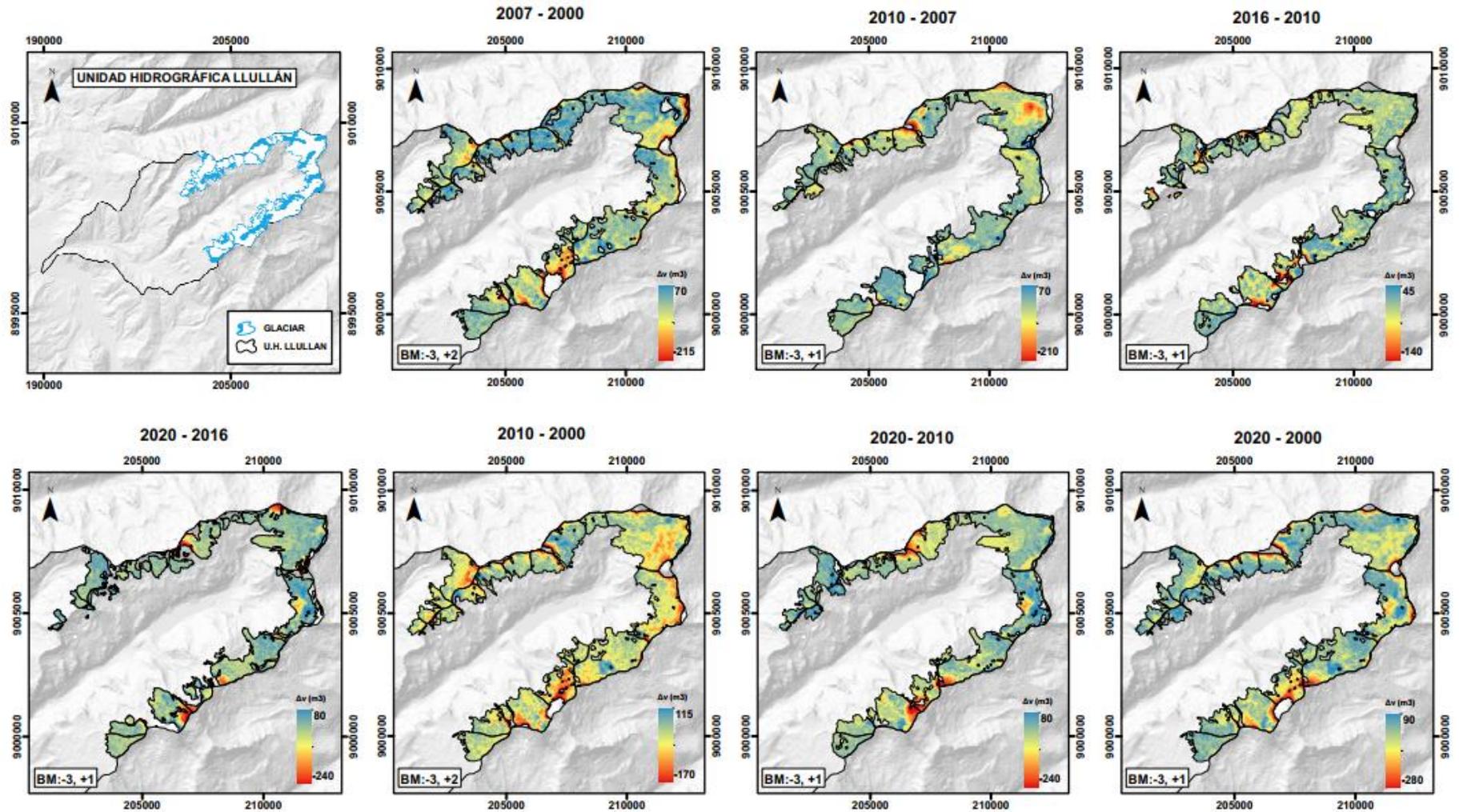
<b>Año</b>	<b>Nombre de la escena</b>	<b>Fecha de adquisición</b>
2018	ASTB180417154048	2018-04-17T15:40:44Z
2019	ASTB190709154006	2019-07-09T15:40:01Z
	ASTB190709153957	2019-07-09T15:39:52Z
2020	ASTB200720153401	2020-07-20T15:33:57Z
	ASTB200720153353	2020-07-20T15:33:48Z
	ASTB200720153410	2020-07-20T15:34:06Z
	ASTB200805153402	2020-08-05T15:33:57Z
	ASTB200805153353	2020-08-05T15:33:48Z
2021	ASTB210707153053	2021-07-07T15:30:48Z

## **ANEXO 3**

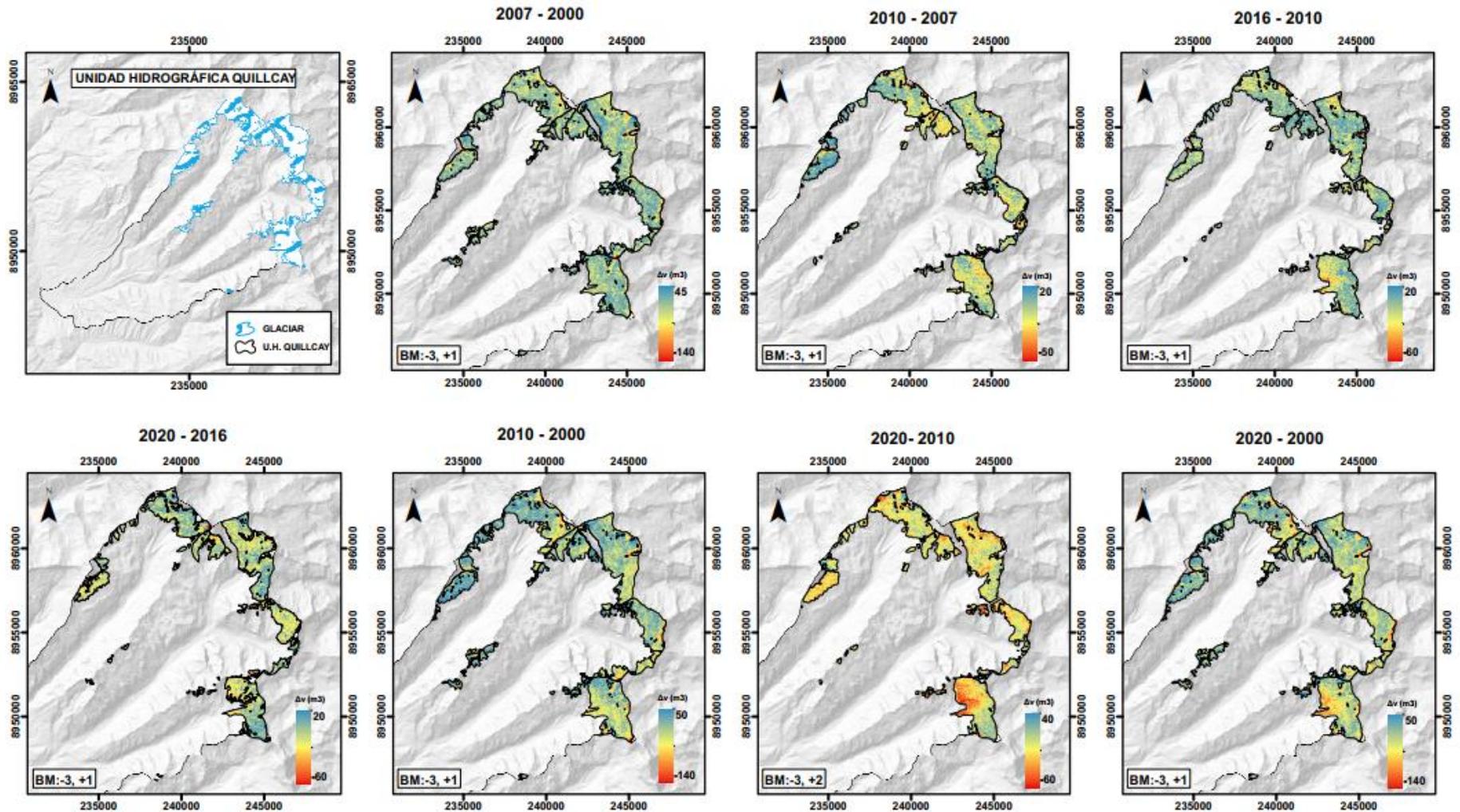
### **Variación de volumen en las unidades hidrográfica**



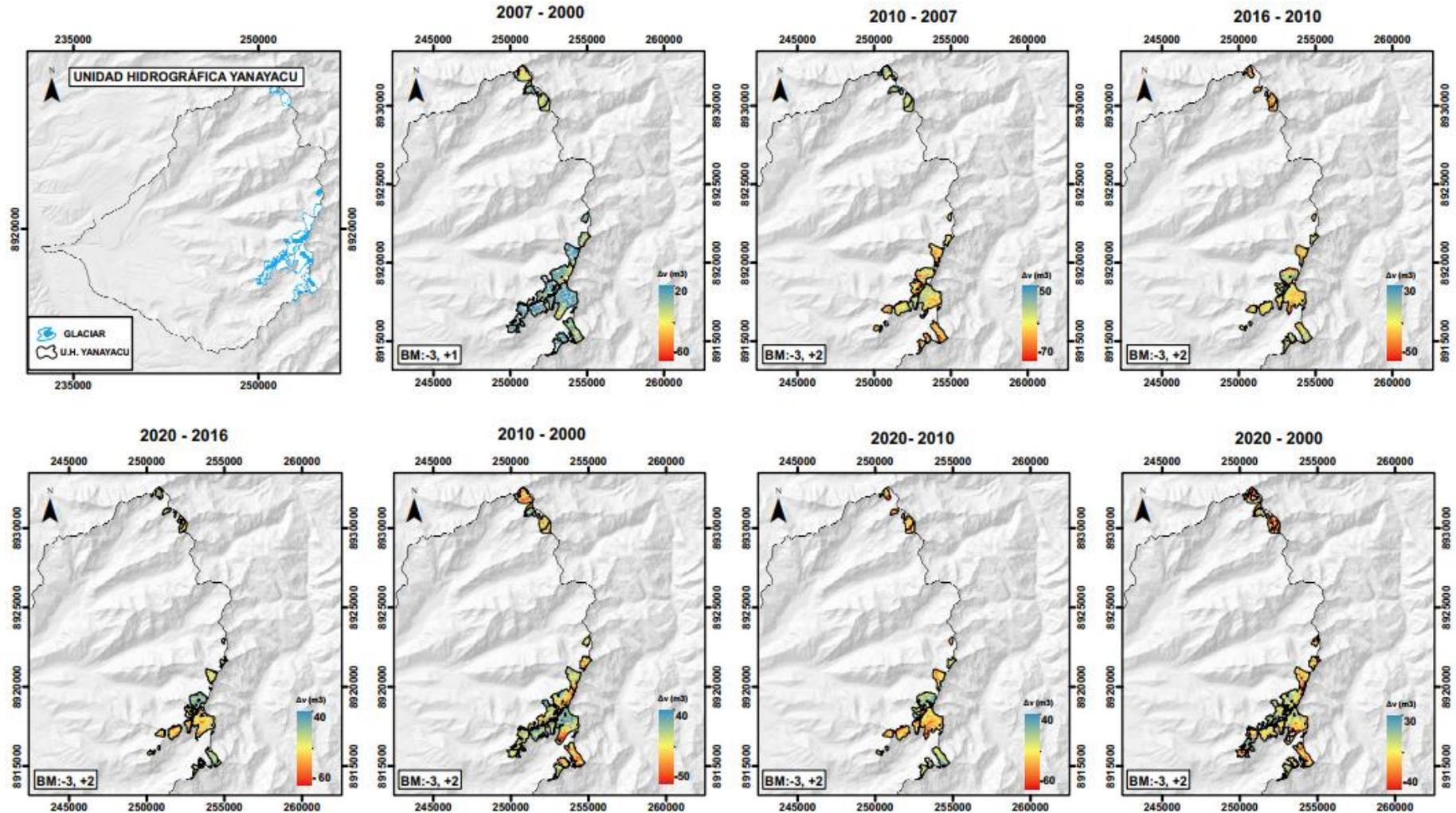
Variación de volumen en la unidad hidrográfica de Lullán



Variación de volumen en la unidad hidrográfica de Quillcay



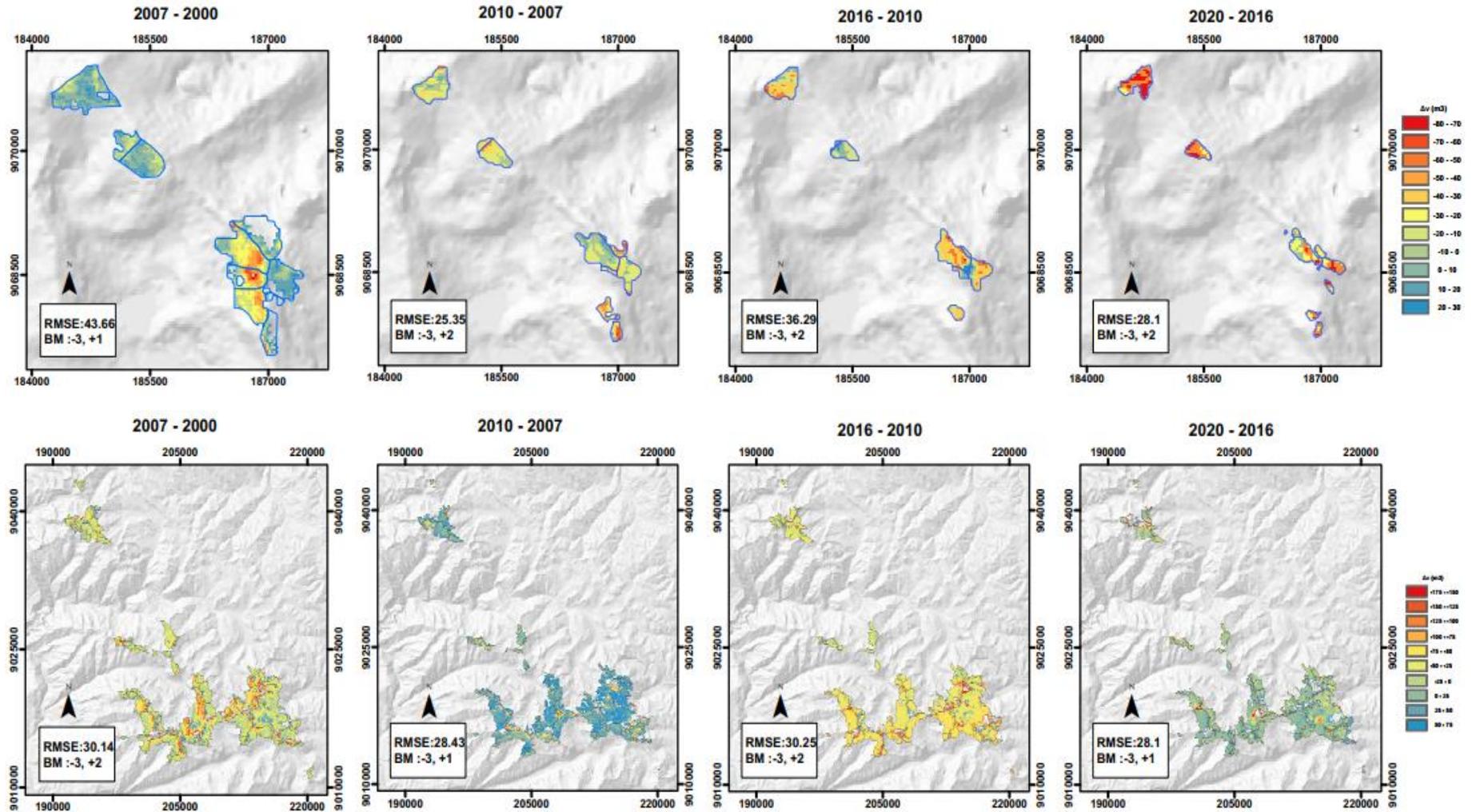
Variación de volumen en la unidad hidrográfica de Yanayacu



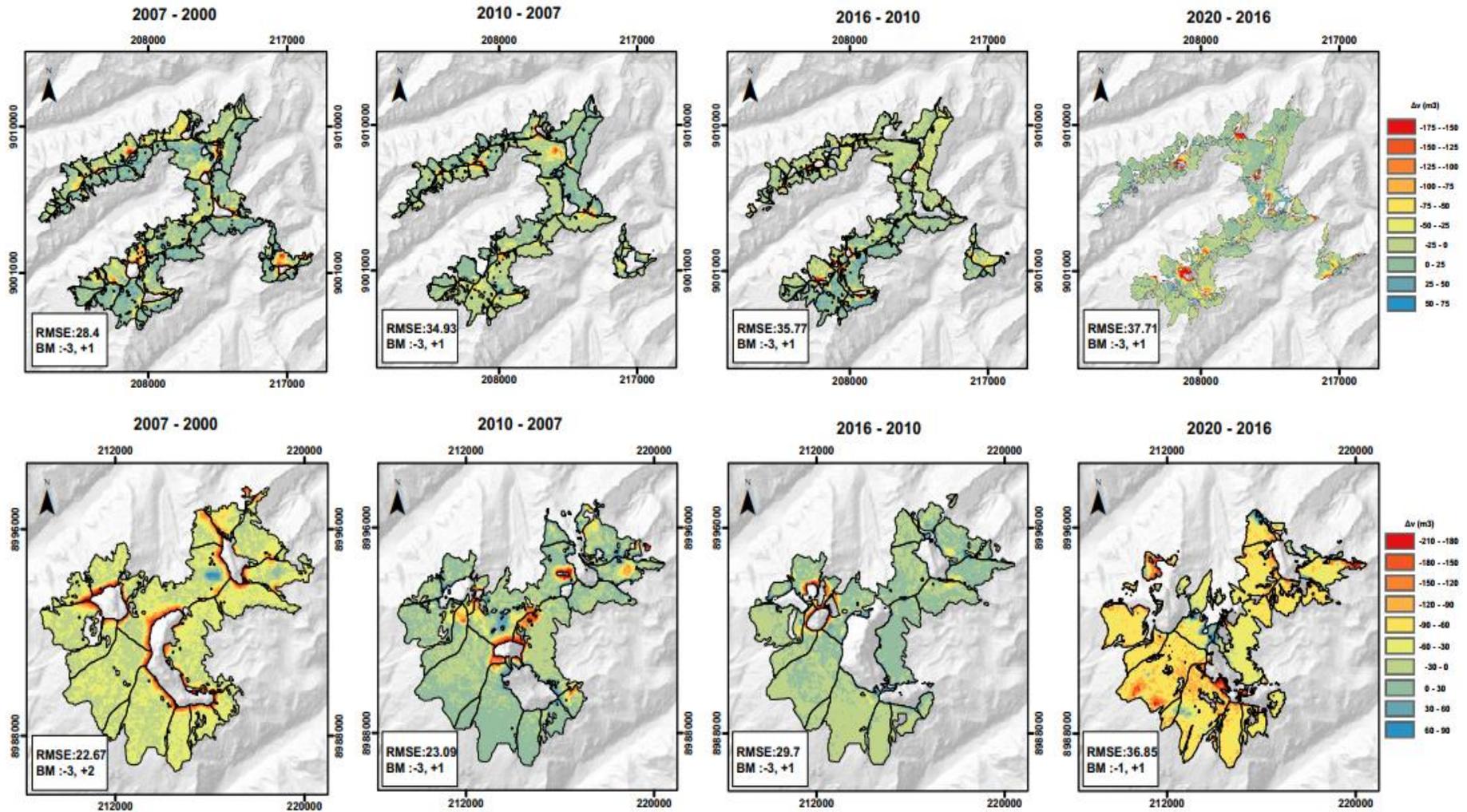
## **ANEXO 4**

### **Variación de volumen por zonas en la cordillera Blanca**

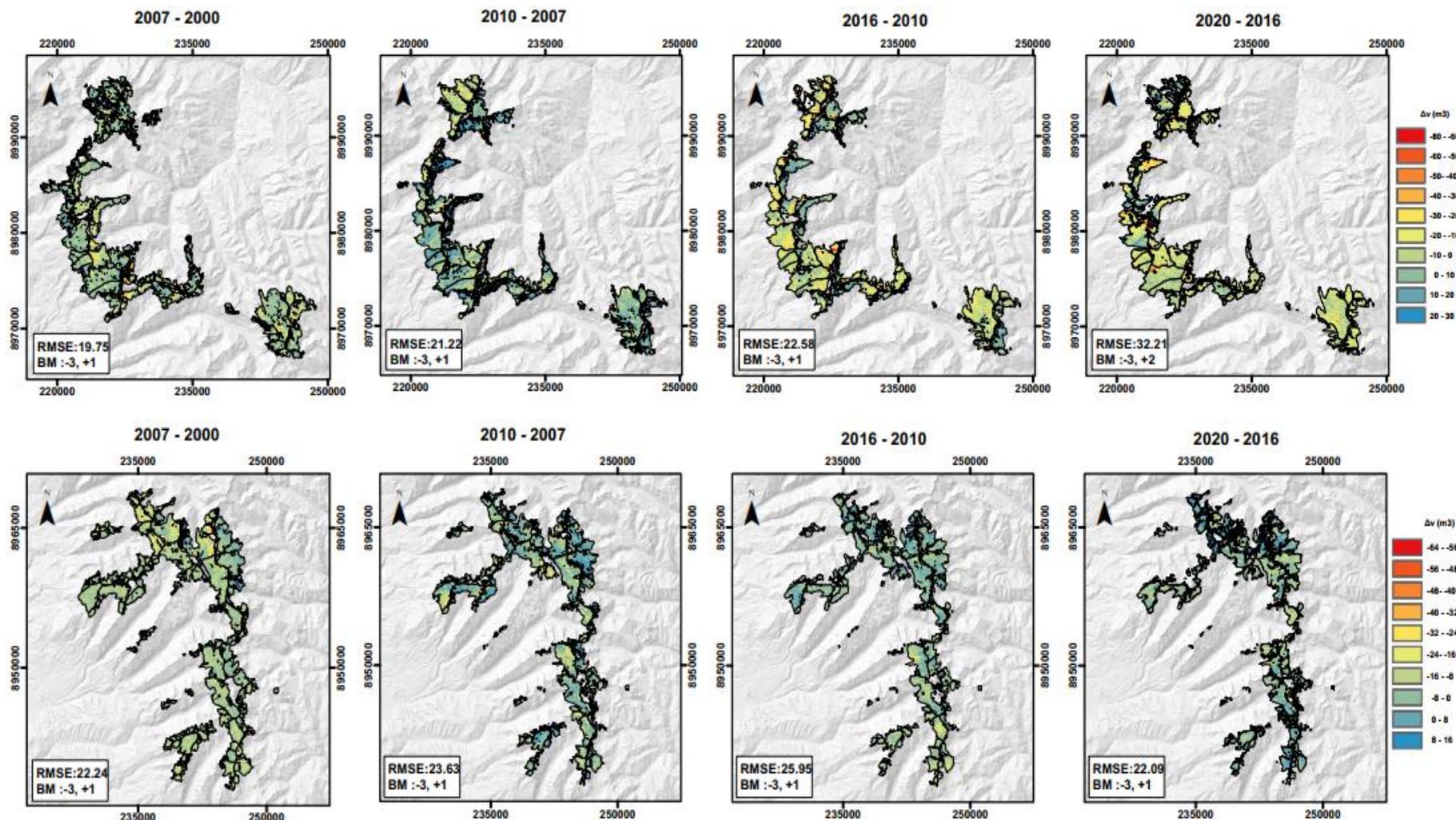
Variación de Volumen en la Zona 1 y 2.



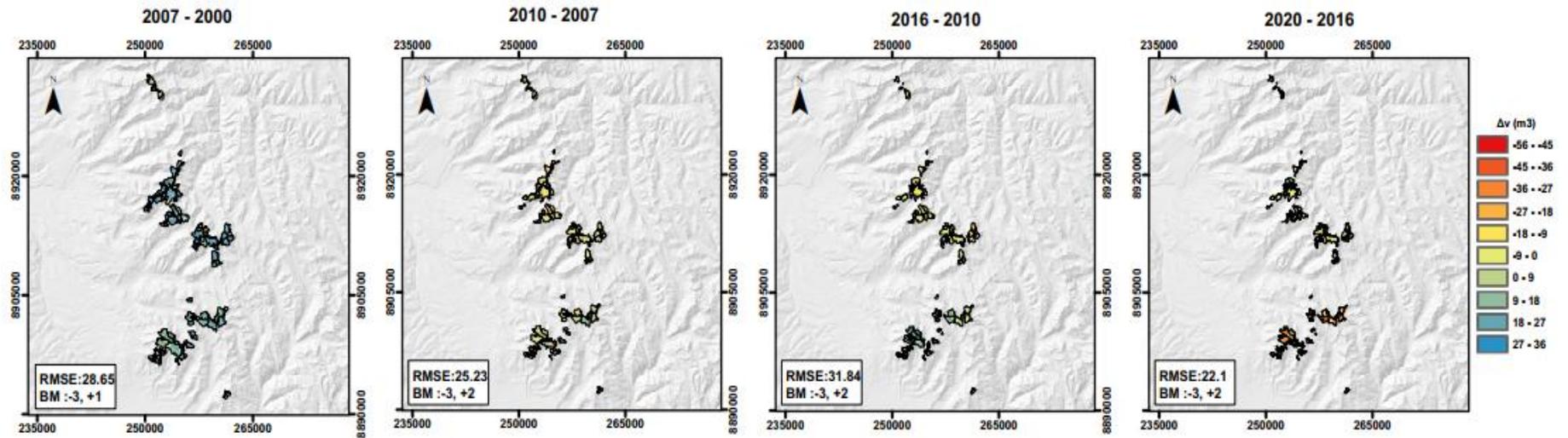
Variación de Volumen en la Zona 3 y 4.



Variación de Volumen en la Zona 5 y 6.



Variación de Volumen en la Zona 7



## **ANEXO 5**

### **Balance de masa glaciár por zona**



Zona	Periodos	$\Delta h$ (m)	$\bar{S}$ (m <sup>2</sup> )	$t$	$\Delta v$ (m <sup>3</sup> )	$\Delta M$ (Kg)	BM (m w.e.)	BMa (m w.e. a-1)	STDEV	$n$	$\sigma$	$\epsilon$	Error BM	Error BMa	$\overline{\Delta h}$ (m)
1	2007-2000	-8406.81	851809.11	7	-7566125.98	-6582529.60	-7.55	-1.08	17.06	18522	$\pm 0.25$	-1.53	1.55	0.22	-7.88
	2010-2007	2692.58	473092.47	3	2423323.83	2108291.73	4.35	1.45	17.85	19206	$\pm 0.26$	-2.71	2.72	0.91	0.04
	2016-2010	-4745.96	360336.10	6	-4271368.36	-3716090.47	-10.08	-1.68	15.11	19354	$\pm 0.22$	-1.29	1.31	0.22	-9.50
	2020-2016	-907.62	233196.19	4	-816858.98	-710667.32	-2.98	-0.74	19.14	19591	$\pm 0.27$	0.08	0.29	0.07	-2.13
	2010-2000	2606.31	884208.81	10	2345678.61	2040740.39	2.26	0.23	16.95	19552	$\pm 0.24$	-1.30	1.32	0.13	0.28
	2020-2010	-9825.24	281557.49	10	-8842712.70	-7693160.04	-26.69	-2.67	18.34	19150	$\pm 0.27$	-0.33	0.42	0.04	-16.78
	2020-2000	-17627.74	757068.90	20	-15864968.41	-13802522.52	-17.81	-0.89	16.42	19497	$\pm 0.24$	-0.88	0.91	0.05	-10.96
2	2007-2000	-544623.23	83869613.18	7	-490160903.03	-426439985.63	-4.97	-0.71	15.88	454031	$\pm 0.05$	-0.19	0.20	0.03	-3.25
	2010-2007	161019.62	71130762.16	3	144917658.98	126078363.32	1.73	0.58	12.10	443727	$\pm 0.04$	-0.34	0.34	0.11	-0.43
	2016-2010	-1073429.72	73162886.85	6	-966086748.63	-840495471.31	-11.22	-1.87	12.67	454888	$\pm 0.04$	0.06	0.07	0.01	-9.57
	2020-2016	157210.05	64870306.57	4	141489045.70	123095469.76	1.85	0.46	15.33	453690	$\pm 0.05$	-0.43	0.43	0.11	-4.81
	2010-2000	-82973.54	83539050.49	10	-74676184.28	-64968280.32	-0.76	-0.08	18.12	455098	$\pm 0.05$	0.63	0.63	0.06	-3.90
	2020-2010	-496596.26	71516063.05	10	-446936634.23	-388834871.78	-5.31	-0.53	15.83	456824	$\pm 0.05$	0.35	0.35	0.04	-6.91
	2020-2000	-804684.12	80548959.62	20	-724215711.62	-630067669.11	-7.64	-0.38	21.85	465776	$\pm 0.06$	1.36	1.36	0.07	-11.58
3	2007-2000	-710205.34	63032565.45	7	-639184804.54	-556090779.95	-8.62	-1.23	20.91	116690	$\pm 0.12$	0.45	0.46	0.07	-10.09
	2010-2007	-411980.63	57225315.53	3	-370782569.97	-322580835.87	-5.51	-1.84	19.59	115738	$\pm 0.12$	-2.67	2.68	0.89	-3.85
	2016-2010	-415954.06	51106439.19	6	-374358654.93	-325692029.79	-6.23	-1.04	19.78	115906	$\pm 0.12$	0.00	0.12	0.02	-6.78
	2020-2016	-492252.59	49741715.59	4	-443027326.91	-385433774.41	-7.57	-1.89	20.78	116527	$\pm 0.12$	0.48	0.50	0.12	-11.87
	2010-2000	-500140.64	62672522.37	10	-450126578.32	-391610123.14	-6.10	-0.61	21.44	116968	$\pm 0.13$	-0.84	0.85	0.08	-5.82
	2020-2010	-755124.08	54252045.11	10	-679611675.59	-591262157.76	-10.65	-1.06	19.74	116805	$\pm 0.12$	1.25	1.25	0.13	-12.22
	2020-2000	-1326872.41	59180401.67	20	-1194185172.66	-1038941100.21	-17.15	-0.86	23.31	116856	$\pm 0.14$	0.70	0.71	0.04	-16.57
4	2007-2000	-1434998.50	46602285.00	7	-1291498646.48	-1123603822.44	-23.56	-3.37	12.31	38490	$\pm 0.13$	0.23	0.26	0.04	-35.02
	2010-2007	-258021.94	42871433.84	3	-232219749.02	-202031181.65	-4.60	-1.53	11.38	38439	$\pm 0.12$	3.01	3.01	1.00	-2.70
	2016-2010	-116991.78	38302313.61	6	-105292605.32	-91604566.63	-2.34	-0.39	15.98	38493	$\pm 0.16$	-4.62	4.63	0.77	-4.70
	2020-2016	-225262.74	35508477.30	4	-202736463.57	-176380723.31	-4.85	-1.21	21.10	38405	$\pm 0.22$	-6.90	6.91	1.73	-2.82
	2010-2000	-1097647.52	46254846.12	10	-987882771.09	-859458010.85	-18.15	-1.82	13.04	38537	$\pm 0.13$	3.39	3.39	0.34	-19.33

Zona	Periodos	$\Delta h$ (m)	$\bar{S}$ (m <sup>2</sup> )	$t$	$\Delta v$ (m <sup>3</sup> )	$\Delta M$ (Kg)	BM (m w.e.)	BMa (m w.e. a-1)	STDEV	$n$	$\sigma$	$\varepsilon$	Error BM	Error BMa	$\overline{\Delta h}$ (m)
	2020-2010	-58821.79	39638493.80	10	-52939615.43	-46057465.42	-1.14	-0.11	17.32	38536	$\pm 0.18$	-2.19	2.20	0.22	-1.78
	2020-2000	-1230207.81	43306164.00	20	-1107187029.49	-963252715.66	-21.73	-1.09	19.53	38536	$\pm 0.20$	-3.60	3.60	0.18	-22.21
	2007-2000	-44634.27	121850393.58	7	-40170839.06	-34948629.98	-0.28	-0.04	10.41	323013	$\pm 0.04$	-0.52	0.52	0.07	0.23
	2010-2007	-468309.41	114012701.00	3	-421478466.06	-366686265.48	-3.14	-1.05	13.12	303326	$\pm 0.05$	-1.84	1.84	0.61	-1.91
	2016-2010	-643949.23	111529635.03	6	-579554310.94	-504212250.52	-4.42	-0.74	13.44	319276	$\pm 0.05$	-0.68	0.69	0.11	-5.56
5	2020-2016	350892.36	109470282.44	4	315803126.95	274748720.45	2.45	0.61	14.19	320002	$\pm 0.05$	-1.55	1.55	0.39	1.63
	2010-2000	-289698.35	122384280.65	10	-260728518.60	-226833811.18	-1.81	-0.18	13.60	312124	$\pm 0.05$	-1.88	1.88	0.19	-1.03
	2020-2010	-393845.69	104139308.71	10	-354461124.46	-308381178.28	-2.89	-0.29	16.73	321486	$\pm 0.06$	-1.39	1.39	0.14	-4.42
	2020-2000	-41937.69	119896756.84	20	-37743923.14	-32837213.14	-0.27	-0.01	17.20	325250	$\pm 0.06$	-0.20	0.21	0.01	1.35
	2007-2000	-577716.70	140702955.12	7	-519945033.25	-452352178.93	-3.14	-0.45	13.38	394215	$\pm 0.04$	-0.71	0.71	0.10	-3.60
	2010-2007	-538738.57	122583629.00	3	-484864713.28	-421832300.56	-3.36	-1.12	8.74	384605	$\pm 0.03$	-1.07	1.07	0.36	-3.07
	2016-2010	-605841.19	114072715.65	6	-545257070.51	-474373651.34	-4.06	-0.68	7.96	387324	$\pm 0.03$	-0.82	0.82	0.14	-6.14
6	2020-2016	-403070.66	103675154.82	4	-362763596.78	-315604329.20	-2.97	-0.74	9.56	379871	$\pm 0.03$	-0.88	0.88	0.22	-2.29
	2010-2000	-827335.98	135749084.70	10	-744602377.59	-647804068.50	-4.66	-0.47	17.61	393973	$\pm 0.06$	-1.41	1.41	0.14	-4.05
	2020-2010	-780745.16	115212979.69	10	-702670644.14	-611323460.40	-5.18	-0.52	11.35	392987	$\pm 0.04$	-0.29	0.30	0.03	-6.43
	2020-2000	-1375235.48	131933759.65	20	-1237711928.47	-1076809377.77	-7.97	-0.40	14.51	394778	$\pm 0.05$	-1.01	1.01	0.05	-4.53
	2007-2000	-94324.84	35295563.10	7	-84892358.50	-73856351.89	-2.04	-0.29	12.10	475757	$\pm 0.04$	-1.67	1.67	0.24	-4.36
	2010-2007	-41889.84	32028482.37	3	-37700854.10	-32799743.07	-1.00	-0.33	15.12	495681	$\pm 0.04$	-0.49	0.49	0.16	1.70
	2016-2010	-20340.21	27665020.08	6	-18306189.84	-15926385.16	-0.56	-0.09	10.31	492729	$\pm 0.03$	-0.57	0.57	0.10	-1.26
7	2020-2016	-335557.11	24830597.49	4	-302001394.92	-262741213.58	-10.34	-2.58	16.26	493307	$\pm 0.05$	0.21	0.22	0.05	-11.07
	2010-2000	-48245.05	36506351.37	10	-43420548.78	-37775877.44	-1.01	-0.10	13.45	494981	$\pm 0.04$	-0.64	0.64	0.06	-0.26
	2020-2010	-378215.27	27643947.10	10	-340393740.83	-296142554.52	-10.47	-1.05	14.21	493270	$\pm 0.04$	0.06	0.07	0.01	-9.54
	2020-2000	-410243.72	32880574.77	20	-369219345.12	-321220830.25	-9.54	-0.48	11.54	488801	$\pm 0.03$	-0.35	0.35	0.02	-6.72

NOTA:  $f\Delta v$ : Factor de cambio volumétrico 0.850,  $p^2$ : Área de pixel 900 (m<sup>2</sup>),  $\Delta h$ : Suma de la diferencia de cotas (m),  $\bar{S}$ : Área promedio de los periodos (m<sup>2</sup>),  $t$ : Años transcurridos del periodo de análisis,  $\Delta v$ : Variación de volumen (m<sup>3</sup>),  $\Delta M$ : Variación de masa (Kg), **BM**: Balance de masa (m w.e.), **BMa**: Balance de masa anual (m w.e. a<sup>-1</sup>),  $n$ : Número de pixeles evaluados en terrenos estables,  $\sigma$ : Error aleatorio,  $\varepsilon$ : Error sistemáticos, **Error BM**: Error de balance de masa, **Error BMa**: Error de balance de masa anual y  $\overline{\Delta h}$ : Altura promedio (m).

## **ANEXO 6**

### **Temperatura y precipitación**



*Temperatura de NIÑO 1+2, 3, 4 y 3.4 y anomalías.*

<b>AÑO</b>	<b>NINO 1+2</b>	<b>ANOM</b>	<b>NINO 3</b>	<b>ANOM</b>	<b>NINO 4</b>	<b>ANOM</b>	<b>NINO 3.4</b>	<b>ANOM</b>
<b>1982</b>	25.832	2.931	27.735	1.927	28.888	0.322	28.336	1.322
<b>1983</b>	23.011	-0.102	25.438	-0.449	27.830	-0.726	26.424	-0.614
<b>1984</b>	22.266	-0.847	24.935	-0.953	27.952	-0.604	26.172	-0.867
<b>1985</b>	22.587	-0.526	25.427	-0.461	28.437	-0.119	26.689	-0.349
<b>1986</b>	24.026	0.913	26.914	1.027	29.251	0.695	28.224	1.186
<b>1987</b>	22.908	-0.205	25.700	-0.188	28.715	0.159	27.052	0.013
<b>1988</b>	22.525	-0.588	24.802	-1.086	27.354	-1.202	25.687	-1.352
<b>1989</b>	22.747	-0.366	25.744	-0.143	28.694	0.138	27.004	-0.034
<b>1990</b>	22.965	-0.148	26.070	0.183	29.104	0.548	27.383	0.345
<b>1991</b>	23.923	0.810	26.683	0.795	29.261	0.705	28.093	1.055
<b>1992</b>	23.450	0.338	26.089	0.202	28.827	0.271	27.288	0.250
<b>1993</b>	22.719	-0.393	25.814	-0.073	28.858	0.303	27.218	0.179
<b>1994</b>	23.071	-0.042	26.002	0.114	29.103	0.548	27.454	0.416
<b>1995</b>	22.253	-0.860	25.211	-0.677	28.138	-0.418	26.398	-0.641
<b>1996</b>	23.953	0.840	26.199	0.312	28.818	0.262	27.290	0.252
<b>1997</b>	26.213	3.101	27.788	1.901	28.806	0.250	28.213	1.174
<b>1998</b>	22.649	-0.463	25.036	-0.852	27.370	-1.186	25.819	-1.219
<b>1999</b>	22.513	-0.600	24.998	-0.890	27.554	-1.002	25.968	-1.070
<b>2000</b>	22.778	-0.334	25.546	-0.342	28.198	-0.358	26.602	-0.437
<b>2001</b>	22.795	-0.318	25.796	-0.092	29.085	0.529	27.235	0.197
<b>2002</b>	22.692	-0.421	26.209	0.322	29.230	0.674	27.687	0.648
<b>2003</b>	22.713	-0.400	25.968	0.081	29.017	0.461	27.307	0.268
<b>2004</b>	22.918	-0.195	26.167	0.279	29.192	0.636	27.479	0.441
<b>2005</b>	22.872	-0.241	25.618	-0.269	28.528	-0.028	26.818	-0.220
<b>2006</b>	22.901	-0.212	25.986	0.098	28.999	0.443	27.287	0.248
<b>2007</b>	22.803	-0.310	25.160	-0.728	27.537	-1.019	25.988	-1.051



<b>AÑO</b>	<b>NINO 1+2</b>	<b>ANOM</b>	<b>NINO 3</b>	<b>ANOM</b>	<b>NINO 4</b>	<b>ANOM</b>	<b>NINO 3.4</b>	<b>ANOM</b>
<b>2008</b>	23.454	0.298	25.913	0.026	28.316	-0.241	26.848	-0.189
<b>2009</b>	23.039	-0.116	26.245	0.358	29.065	0.508	27.543	0.506
<b>2010</b>	22.755	-0.398	25.070	-0.818	27.553	-1.003	25.981	-1.058
<b>2011</b>	23.343	0.189	25.704	-0.183	28.038	-0.519	26.618	-0.418
<b>2012</b>	22.530	-0.624	25.613	-0.275	28.655	0.100	26.942	-0.096
<b>2013</b>	23.322	0.167	25.964	0.078	28.877	0.319	27.023	-0.014
<b>2014</b>	24.243	1.090	26.851	0.962	29.514	0.957	27.957	0.920
<b>2015</b>	24.312	1.157	27.305	1.418	29.545	0.989	28.491	1.453
<b>2016</b>	23.784	0.631	25.992	0.104	28.575	0.018	26.972	-0.065
<b>2017</b>	22.392	-0.762	25.383	-0.503	28.588	0.031	26.655	-0.383
<b>2018</b>	23.332	0.123	26.444	0.514	29.393	0.744	27.712	0.628
<b>2019</b>	22.893	-0.298	25.883	-0.062	29.184	0.501	27.223	0.123
<b>2020</b>	22.748	-0.446	25.443	-0.501	28.668	-0.017	26.689	-0.413

*Temperatura de reanálisis de NCEP/NCAR, ERA 5 y Recuay*

<b>AÑO</b>	<b>T NCEP/NCAR</b>			<b>T ERA 700mb</b>	<b>T ERA5</b>		<b>Recuay</b>
	<b>700mb</b>	<b>850mb</b>	<b>2m/10m</b>		<b>2m</b>	<b>850mb</b>	
<b>1962</b>	8.577	17.837	13.099	13.805			
<b>1963</b>	8.606	17.822	13.357	14.129			
<b>1964</b>	8.248	17.572	13.025	13.782			
<b>1965</b>	8.799	17.913	13.331	14.107			
<b>1966</b>	8.530	17.641	13.167	14.015			
<b>1967</b>	8.540	17.448	12.636	13.439			
<b>1968</b>	9.048	18.116	13.375	14.178			
<b>1969</b>	9.018	18.126	13.360	14.126			
<b>1970</b>	8.510	17.662	12.973	13.809			



AÑO	T NCEP/NCAR			T ERA 700mb	T ERA5		Recuay
	700mb	850mb	2m/10m		2m	850mb	
1971	8.407	17.473	12.807	13.576			
1972	9.121	18.260	13.779	14.574			
1973	8.466	17.432	12.811	13.604			
1974	8.427	17.586	13.155	13.956			
1975	8.364	17.568	13.020	13.762			
1976	8.701	17.679	12.894	13.625			
1977	8.900	17.777	13.179	13.900			
1978	8.984	17.928	13.677	14.494			
1979	8.909	17.923	13.441	14.238	9.181	3.363	17.259
1980	8.838	17.706	13.160	14.019	9.109	3.187	17.226
1981	9.083	18.012	13.637	14.402	8.943	3.180	17.150
1982	9.521	18.838	14.492	15.264	9.563	4.782	17.449
1983	8.668	17.920	13.521	14.378	8.804	3.215	17.070
1984	8.605	17.808	13.291	14.102	8.719	2.752	17.028
1985	8.618	17.839	13.424	14.138	8.818	2.906	17.081
1986	9.099	18.328	13.853	14.541	9.279	3.939	17.309
1987	9.150	18.257	13.829	14.627	9.407	4.002	17.356
1988	8.578	17.603	13.336	14.229	8.764	3.086	17.040
1989	8.997	17.997	13.644	14.393	9.139	3.413	17.226
1990	8.866	18.039	13.724	14.506	9.311	3.620	17.306
1991	8.693	18.009	13.537	14.310	9.305	3.947	17.319
1992	8.427	17.741	13.419	14.186	9.006	3.482	17.172
1993	8.625	17.767	13.305	14.095	8.941	3.442	17.127
1994	8.916	18.026	13.609	14.457	9.371	4.075	17.347
1995	8.733	17.413	12.970	13.897	9.123	3.626	17.230
1996	8.781	17.621	13.206	14.070	9.076	3.814	17.207

AÑO	T NCEP/NCAR				T ERA	T ERA5		Recuay
	700mb	850mb	2m/10m		700mb	2m	850mb	
1997	9.543	18.458	14.150	15.063	9.928	5.458	17.609	13.33
1998	8.799	17.397	11.936	12.316	8.980	3.541	17.159	12.16
1999	8.602	16.685	8.273	7.560	8.799	3.437	17.067	12.09
2000	8.787	17.086	7.579	6.526	8.777	3.294	17.053	11.72
2001	9.183	17.416	5.903	4.290	9.027	3.832	17.179	12.76
2002	9.592	17.743	7.150	5.840	9.108	4.010	17.216	12.86
2003	9.342	17.441	7.506	6.391	9.079	3.827	17.203	12.67
2004	9.667	17.701	5.175	3.276	9.361	4.051	17.342	12.57
2005	9.360	17.465	6.281	4.786	9.074	3.482	17.203	12.85
2006	9.508	17.527	3.842	1.486	9.265	3.695	17.295	12.67
2007	8.960	17.312	4.539	2.495	9.054	3.610	17.194	12.29
2008	9.370	18.035	9.151	8.445	9.119	3.810	17.219	12.70
2009	10.293	18.593	10.357	9.719	9.782	4.642	17.552	13.04
2010	9.629	17.946	10.273	9.885	9.065	3.239	17.200	12.09
2011	9.601	18.399	14.048	14.706	9.048	3.502	17.179	12.49
2012	9.913	18.595	14.302	14.966	9.114	3.690	17.210	12.74
2013	10.051	18.613	11.867	11.846	9.300	4.053	17.303	
2014	10.300	19.156	14.767	15.382	9.242	4.046	17.268	
2015	11.014	19.752	15.206	15.812	9.772	4.747	17.519	
2016	10.231	18.923	14.503	15.190	9.453	4.173	17.363	
2017	10.102	18.574	14.107	14.782	9.192	3.520	17.234	
2018	10.505	18.798	14.322	14.992	9.517	4.121	17.389	
2019	10.482	18.672	13.664	14.219	9.612	4.395	17.442	
2020	10.644	18.717	13.943	14.635	9.518	4.307	17.392	

Temperatura en los glaciares de Artesonraju, Cuchillacocha, Shallap y ERA5 2m

AÑO	Artesonraju		Cuchillacocha		Shallap		ERA5 2m		Tprom
	Tmax	Tmin	Tmax	Tmin	Tmax	Tmin	Tmax	Tmin	
<b>1979</b>							14.32	-1.64	6.34
<b>1980</b>	3.56	-3.47	6.84	-1.09	5.42	-1.82	13.98	-1.79	6.10
<b>1981</b>	3.93	-3.26	7.31	-0.89	6.12	-1.59	13.95	-1.51	6.22
<b>1982</b>	4.70	-2.54	8.19	-0.32	6.68	-1.08	15.40	0.02	7.71
<b>1983</b>	3.32	-3.51	6.60	-1.46	4.73	-2.36	13.64	-1.47	6.09
<b>1984</b>	3.37	-3.60	6.71	-1.39	5.04	-2.18	13.85	-2.42	5.72
<b>1985</b>	3.48	-3.61	6.96	-1.31	5.48	-2.10	14.06	-2.27	5.89
<b>1986</b>	4.63	-2.85	8.19	-0.52	6.75	-1.41	13.54	0.32	6.93
<b>1987</b>	4.28	-2.70	7.68	-0.48	5.86	-1.27	15.01	-1.18	6.92
<b>1988</b>	3.26	-3.45	6.82	-1.29	4.68	-2.18	14.19	-2.13	6.03
<b>1989</b>	4.91	-2.60	8.37	-0.46	7.08	-1.34	13.30	-0.38	6.46
<b>1990</b>	4.92	-2.42	8.09	-0.54	6.70	-1.29	14.58	-1.44	6.57
<b>1991</b>	5.10	-2.78	8.58	-0.43	7.35	-1.23	14.69	-0.82	6.94
<b>1992</b>	3.62	-3.53	7.26	-1.00	5.69	-1.80	14.33	-1.34	6.49
<b>1993</b>	3.44	-2.95	6.55	-0.90	4.80	-1.76	12.88	-0.07	6.40
<b>1994</b>	4.36	-2.81	8.02	-0.60	6.18	-1.41	15.04	-1.28	6.88
<b>1995</b>	4.29	-2.97	8.01	-0.62	6.54	-1.40	14.75	-1.73	6.51
<b>1996</b>	4.65	-3.15	8.01	-0.83	6.83	-1.59	14.77	-1.35	6.71
<b>1997</b>	6.12	-1.40	9.44	0.54	8.25	-0.08	16.01	0.50	8.25
<b>1998</b>	4.04	-3.19	7.91	-0.69	6.27	-1.42	14.53	-1.69	6.42
<b>1999</b>	3.41	-3.57	7.33	-1.12	5.37	-1.98	14.25	-1.55	6.35
<b>2000</b>	3.76	-3.60	7.89	-0.98	6.66	-1.73	14.70	-1.90	6.40
<b>2001</b>	4.42	-2.93	7.90	-0.75	6.42	-1.58	14.80	-1.03	6.88
<b>2002</b>	4.37	-2.76	8.15	-0.50	6.89	-1.15	14.67	-0.62	7.02
<b>2003</b>	4.88	-2.83	8.15	-0.58	6.95	-1.34	14.74	-1.10	6.82



AÑO	Artesonraju		Cuchillacocha		Shallap		ERA5 2m		
	Tmax	Tmin	Tmax	Tmin	Tmax	Tmin	Tmax	Tmin	Tprom
2004	4.78	-2.62	7.90	-0.68	6.53	-1.35	14.79	-0.73	7.03
2005	4.44	-2.98	8.06	-0.76	6.61	-1.51	13.82	-0.80	6.51
2006	4.70	-2.66	8.23	-0.53	6.64	-1.22	14.19	-0.75	6.72
2007	3.99	-3.21	7.36	-1.07	5.65	-1.86	14.33	-1.32	6.50
2008	3.62	-3.22	7.66	-0.83	5.72	-1.74	14.21	-0.93	6.64
2009	5.10	-2.19	8.69	-0.01	7.35	-0.74	15.12	-0.13	7.50
2010	4.13	-3.10	7.70	-0.89	5.85	-1.66	14.19	-1.75	6.22
2011	3.74	-3.37	6.81	-0.99	5.39	-1.89	14.41	-1.47	6.47
2012	4.56	-2.77	7.83	-0.61	6.49	-1.43	14.80	-1.35	6.72
2013	4.20	-2.78	7.85	-0.60	6.00	-1.37	14.65	-0.51	7.07
2014	4.03	-2.88	7.89	-0.55	6.56	-1.17	14.73	-0.54	7.09
2015	5.97	-1.78	9.20	0.23	7.97	-0.47	15.37	0.10	7.73
2016	4.40	-2.84	8.21	-0.40	6.54	-1.13	15.25	-1.09	7.08
2017	4.43	-3.02	8.28	-0.50	6.73	-1.40	14.66	-1.57	6.54
2018							15.30	-0.91	7.20
2019							12.68	-0.34	6.17

*Precipitación de las estaciones meteorológicas y glaciares*

Año	Querococha	Paron	Artesonraju	Cuchillacocha	Shallap	ERA 2m	Recuay
1962	1090.69	718.5					
1963	1108.72	748.3					
1964	1072.14	667.47					
1965	951	665.1					
1966	1339.45	912.7					
1967	837.23	644.6					

Año	Querococha	Paron	Artesonraju	Cuchillacocha	Shallap	ERA 2m	Recuay
1968	877.44	643.9					
1969	1131.56	737.71					
1970	1294.2	986.43					
1971	1141.52	1028.3					
1972	949.8	878.15					
1973	1345.9	1034.69					
1974	1076.56	872.3					
1975	1061.2	826.44					
1976	761.18	676.81					
1977	1070.17	721.2					
1978	984.18	632.3					
1979	798.5	396.2				1986	421.2
1980	1197.6	775.4	1508.15	1427.97	1298.67	2215	1015.2
1981	1192.8	776.2	1364.90	1236.36	1197.60	2113	766.4
1982	1213.67	916.02	1345.59	1266.07	1154.72	2380	795.3
1983	1260.8	1028	1643.05	1459.62	1281.98	2356	981.6
1984	916.8	667.9	1209.24	1284.94	1238.49	2430	831.5
1985	969.5	678.3	1248.59	1223.46	1107.62	2217	708.9
1986	882.5	786.2	1186.59	1133.13	1087.58	1872	763.4
1987	1056.4	742.62	1408.50	1537.14	1421.59	2358	963.3
1988	1104	764.2	1611.82	1533.94	1249.38	2644	901.4
1989	803.6	661.02	834.63	844.87	773.29	1674	545.7
1990	702.7	689.39	1081.96	1189.30	1086.21	2124	597.8
1991	764.65	628.87	1000.67	862.91	826.57	1903	469.2
1992	1059.1	435.3	1493.52	1304.53	1137.84	2585	939.7
1993	1590.9	845.6	1759.14	1619.33	1422.40	2244	1206.9
1994	848.3	764.1	1284.25	1336.42	1170.32	2156	691.2



<b>Año</b>	<b>Querococha</b>	<b>Paron</b>	<b>Artesonraju</b>	<b>Cuchillacocha</b>	<b>Shallap</b>	<b>ERA 2m</b>	<b>Recuay</b>
1995	1035.3	769.2	1121.24	1145.21	988.67	2158	900.3
1996	665.4	651	980.88	945.49	1008.22	1943	590.9
1997	722.9	892.9	1163.26	1019.18	1022.61	2610	1164.4
1998	501.1	962.8	1210.75	1162.97	1022.18	2109	906.5
1999	868.3	1000.7	1416.93	1381.00	1123.05	2249	860.6
2000		897.7	1179.70	996.19	997.28	2281	973.8
2001		856.5	1249.65	1220.73	1135.58	2280	832.5
2002		751	1281.40	1158.35	1101.40	2243	831.6
2003		491.1	1092.59	1022.37	1038.80	2096	600.5
2004		910.1	1334.14	1360.65	1275.93	2128	874.5
2005		820	1197.13	1078.03	990.63	2075	816.7
2006		815.6	1232.21	1255.61	1122.67	2208	1148.1
2007		730.1	1248.41	1286.61	1206.67	2096	704.5
2008		862.65	1518.43	1394.75	1215.57	2320	1101
2009		989.9	1326.83	1319.47	1275.05	2178	983.7
2010		627.98	1166.79	1203.88	1139.88	1850	884.1
2011		781.79	1409.48	1372.02	1252.51	2193	915.8
2012			1187.33	1227.86	1196.21	2453	
2013			1481.94	1436.57	1308.85	2281	
2014			1455.88	1356.74	1249.48	2359	
2015			1061.42	1102.75	1108.03	2373	
2016			1432.80	1254.11	1211.81	2234	
2017			1257.59	1226.80	1173.92	2340	
2018						2376	
2019						2032	