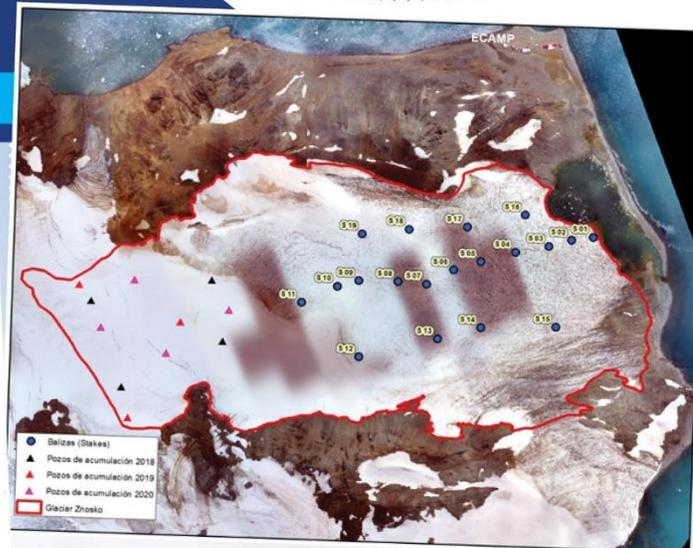
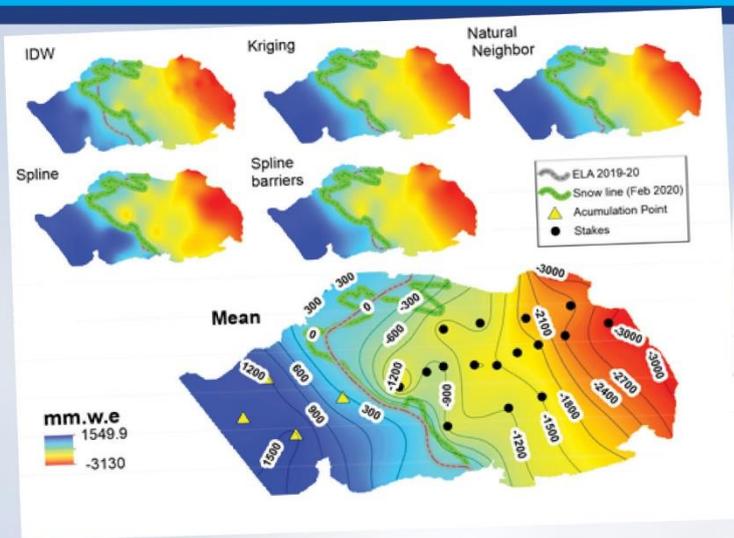


# EVALUACIÓN DEL BALANCE DE MASA DE UN GLACIAR ANTÁRTICO: GLACIAR ZNOSKO

## ESTUDIO FINAL



**Citar:**

**Suarez<sup>1</sup>, W.; Bello, C<sup>2</sup>; Cruz R<sup>3</sup>; Arias, S<sup>1</sup>; Zegarra, J<sup>3</sup> & Brondi, F<sup>4</sup>. (2022).**  
*Evaluación del Balance de masa de un Glaciar Antártico: Glaciar Znosko.* Estudio Final.  
Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú –SENAMHI.

- (1) Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú (SENAMHI)
- (2) Ministerio de Relaciones Exteriores del Perú - Dirección Asuntos Antárticos
- (3) Autoridad Nacional del Agua (ANA)
- (4) Instituto Geográfico Nacional (IGN)

# EVALUACIÓN DEL BALANCE DE MASA DE UN GLACIAR ANTÁRTICO: GLACIAR ZNOSKO

ESTUDIO FINAL





### **DIRECTORIO**

PhD. Patricio Alonso Valderrama Murillo  
PRESIDENTE EJECUTIVO DEL SENAMHI

Ing. Oscar Gustavo Felipe Obando  
DIRECTOR DE HIDROLOGÍA DEL SENAMHI

PhD. Waldo Sven Lavado Casimiro  
SUBDIRECTOR DE ESTUDIOS E INVESTIGACIONES HIDROLÓGICAS DEL  
SENAMHI

### **REVISOR DEL ESTUDIO**

PhD. Waldo Sven Lavado Casimiro  
Ing. Oscar Gustavo Felipe Obando

### **AUTOR PRINCIPAL**

PhD. Wilson Alfredo Suarez Alayza  
EXPERTO EN INVESTIGACION HIDROLÓGICA DEL SENAMHI

**Lima-Perú**  
**Enero – 2022**

---

## Contenido

Resumen .....	8
1. Introducción.....	9
2. Materiales y Metodología .....	11
2.1 Área de estudio .....	11
2.2 Datos .....	13
2.2.1 Datos meteorológicos .....	13
2.2.2 Testigos de acumulación y estacas de ablación .....	13
2.2.3 Imágenes de satélite y ortofotos .....	15
2.3 Metodología.....	16
2.3.1 Trabajo de terreno .....	16
2.3.2 Trabajo de gabinete.....	19
3. Resultados.....	20
4. Conclusiones y Discusiones .....	28
5. Agradecimientos .....	28
6. Bibliografía.....	29

## Contenido de figuras

Figura 1. Mapa de ubicación del glaciar Znosko y estaciones científicas próximas. ....	12
Figura 2. Red de balizas y pozos de acumulación en el glaciar Znosko .....	14
Figura 3. Flujograma de procesos desde el trabajo de terreno hasta la obtención del balance de masa. ....	16
Figura 4. Personal del SENAMHI y ANA en campaña de búsqueda de balizas .....	18
Figura 5. Personal del SENAMHI y ANA realizando lectura de balizas. ....	18
Figura 6. (superior) Imágenes de satélite y ortofotos utilizados en el estudio (la línea verde con negro indica la línea de nieve) y (inferior) muestra la hipsometría del glaciar Znosko para los años 2012, 2019 y 2020. ....	21
Figura 7. (a) estacionalidad de la precipitación y temperatura del aire (b) series de temperatura del aire y precipitación mensual con sus respectivas líneas de tendencia (c) comparación de la temperatura del aire y precipitación a nivel de año de muestreo. ....	23
Figura 8. (a) Perfil de densidad y su contenido de agua equivalente para los testigos de acumulación, (b) en la izquierda estacas medidas para el periodo comprendido entre 2018-19, el color azul indica estacas que fueron medidas de forma directa y en la derecha estacas medidas para el periodo comprendido entre 2019-20. ....	25
Figura 9. Balance de masa para el glaciar Znosko para el periodo (a) 2018-19 y (b) 2019-20 .....	27

---

## Contenido de Tablas

Tabla 1. Características de imágenes y orthophotos utilizadas en el estudio.....	15
Tabla 2. métodos de interpolación utilizados .....	20
Tabla 3. Estacionalidad de la precipitación calculada para el periodo entre 2015 al 2021. ....	22
Tabla 4. Balance de masa del glaciar Znosko para los periodos periodo 2018/19 y 2019/20.....	26

---

## EVALUACIÓN DEL BALANCE DE MASA DE UN GLACIAR ANTÁRTICO: GLACIAR ZNOSKO

### Resumen

El glaciar Znosko se encuentra ubicado en la isla Rey Jorge, que forma parte de las islas Shetland del Sur. El área total del glaciar para el año 2020 fue de 1.72 km<sup>2</sup>, de los cuales 1.6 km<sup>2</sup> se encontraban expuestos. El glaciar se ubica a menos de 600 metros de distancia de la Estación Científica Antártica Macchu Picchu (ECAMP), la cual opera desde el año 1989. En diferentes expediciones se observó de forma visual su pérdida de masa glaciar, razón por la que en el año 2018 se inició el monitoreo de este glaciar mediante la instalación de 19 estacas en la zona de ablación y la toma de testigos de hielo en la zona de acumulación, actividades que se mantuvieron durante los veranos australes de los años 2019 y 2020, estando la recuperación de información sobre el glaciar supeditada a las condiciones meteorológicas. El balance de masa del glaciar Znosko obtenido para los años 2018-19 y 2019-20 ascendió a – 590.7 mm.w.e. y -686.7 mm.w.e. (milímetros equivalentes en agua por sus siglas inglés), respectivamente. Considerando que el monitoreo de este glaciar será una actividad científica permanente, en este artículo se describe la metodología que condujo a la obtención de esta información a ser implementada en un procedimiento futuro.

## 1. Introducción

Durante el siglo XVII se efectuaron los primeros registros de mediciones de glaciares (Allison et al., 2019). Los estudios sobre glaciares se iniciaron en el año 1894, con la creación de la Comisión Internacional de Glaciares cuya labor fue asumida por el Servicio Mundial de Monitoreo de Glaciares (WGMS). El WGMS es co-responsable de la Red Terrestre Global para Glaciares (GTN-G) y el Proyecto de Medición Global de Hielo Terrestre desde el Espacio (GLIMS) a cargo del inventario de datos de balance de masas, volumen y fluctuaciones de glaciares a nivel mundial en base a mediciones de campo y sensores remotos (Allison et al., 2019; Silva et al., 2020). El método glaciológico (directo) y el geodésico (indirecto) se emplean con mayor frecuencia para calcular el balance de masa glaciar. El primero requiere la instalación en terreno de balizas en la zona de ablación y pozos de nieve en la zona de acumulación para obtener el balance de masa superficial (anual), método que se aplica generalmente en glaciares pequeños y de acceso seguro; mientras que el segundo método emplea dos o más conjuntos de datos topográficos a diferentes escalas de tiempo plurianuales para calcular las diferencias de volumen, que es aplicado con frecuencia en glaciares grandes y remotos (Fischer, 2010). La mayoría de glaciares en el mundo son sensibles al cambio climático, retrocediendo o avanzando en respuesta a cambios en la precipitación, temperatura, entre otras variables. La Antártida juega un rol importante en la regulación del clima mundial. El inventario de glaciares Randolph versión 6 del GLIMS estima que el número de glaciares antárticos y sub-antárticos asciende a 2752 con un área de 132867.220 km<sup>2</sup> (RGI Consortium, 2017). La región de la Península Antártica es una de las zonas a nivel mundial que ha registrado un calentamiento significativo desde mediados del siglo XX (Siegert et al., 2019), impactando en diversos componentes de la criosfera ocasionando a) un incremento del nivel del mar (Bamber et al., 2018), b) el colapso de plataformas de hielo (Berthier et al., 2012; Cook et al., 2014, Rott et al., 2011), c) variaciones en la extensión y estacionalidad del hielo marino, d) aceleración del retroceso glaciar, e) cambios en la altitud de la línea de nieve (Arigony-Neto et al., 2009), f) descarga de agua dulce al océano (Falk et al., 2018), g) el incremento de área libres de hielo, h) cambios en la morfología glaciar, entre otros. Sin embargo existen evidencias que indican que en las últimas dos décadas esta región sufrió un enfriamiento (Carrasco, 2013; Oliva et al., 2016; Turner et al., 2016) ocasionando la desaceleración del retroceso glaciar y balances de masa positivos registrados en algunos glaciares ubicados en las islas que conforman el archipiélago de las Shetland del Sur. Da Rosa et al. (2020) derivado del análisis de imágenes satelitales (1956-2018) observaron que el retroceso de los glaciares Ecology, Sphinx, Baranowski, Tower y Windy (campo de hielo Warszawa) se redujo en el periodo 2000-2018, comportamiento opuesto registrado en el periodo 1979-2000, confirmando que glaciares de áreas pequeñas responden a cambios en la temperatura anual del aire a escala decadal. Pętllicki et al. (2017) concluyo que la tasa de cambio de elevación del hielo en el glaciar Ecology disminuyo entre periodos analizados (1979-2001-2012-2016), siendo más significativo en 2012-2016. (Sobota et al., 2015) determinaron que en el periodo 2012-2013 el sistema glaciar Ecology y Sphinx tuvo un balance de masa neto promedio de +17.8 cm w.e.(centímetros

equivalentes en agua, por sus siglas en inglés), mientras que durante 1979-2012 perdió el 41% de su área. (Simoes et al., 2015) registro que el glaciar Wanda perdió 0.71 km<sup>2</sup> de su área (1979-2011). Osmanoglu et al., (2014) calcularon que el balance de masa total (ablación frontal y balance de masa superficial) para la isla Livingston fue - 0.67±0.40 m w.e. año<sup>-1</sup> (2007-2011). En las Islas Shetland del Sur solo tres glaciares (glaciares Hurd y Johnsons ubicados en isla Livingston, y el glaciar Bahía del Diablo localizado en isla Vega) cuentan con registros (que superan los 15 años de mediciones continuas) de balances de masa en superficie (método glaciológico) en la base de datos del WGMS. Navarro et al. (2013) estimaron que el balance de masa superficial del glaciar Hurd y Johnsons fue de - 0.15±0.10 m.w.e. y - 0.09±0.17 m.w.e. respectivamente (2002-2011), y confirmaron una reducción en la de pérdida de masa de estos glaciares durante el periodo observado respecto a 1957-2000 atribuida a una serie de factores (presión circumpolar, reducción de derretimiento y temperaturas bajas en verano). Marinsek y Ermolin (2015) calcularon que el balance de masa total del glaciar Bahía del Diablo por método glaciológico fue de - 1.90±0.31 m w.e. y por el método geodésico fue de - 2.16±0.23 m w.e. en 10 años de observación (2001-2011), obteniendo balances positivos (método directo) en los años 2010 y 2011. El domo Bellingshausen ubicado en la isla Rey Jorge cuenta con un registro de 4 años de balance de masa cuya pérdida de masa total es de - 0.31±0.76 m w.e., registrando balances positivos en los años 2010 (0.37±0.76 m w.e.) y 2011 (0.09±0.76 m w.e) (Mavlyudov, 2014).

El presente estudio forma parte de uno de los productos del proyecto “**Comparación de la Dinámica y Evolución Glaciar en la Antártida y Glaciares Tropicales del Perú**” y representa el trabajo de tres instituciones públicas peruanas: Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú (SENAMHI), Autoridad Nacional del Agua (ANA) y del Ministerio de Relaciones Exteriores del Perú a través de la Dirección de Asuntos Antárticos, además se contó con el apoyo del Instituto Geográfico Nacional (IGN).

---

## 2. Materiales y Metodología

### 2.1 Área de estudio

La Isla Rey Jorge o 25 de Mayo es la isla más grande del archipiélago de las Shetland del Sur, ubicada a unos 100 km de la Península Antártica (Lagger et al., 2018) y con un área de 1250 km<sup>2</sup>. Compuesta por 70 cuencas glaciares (con terminación en mar o en tierra) cubriendo alrededor del 90% de la isla con hielo (Simões et al., 1999). Esta capa de hielo presenta una altura máxima que asciende a 720 m.s.n.m (parte central) (Rückamp et al., 2010), es sensible a variaciones en el clima debido a su condición climática marítima (Ferron et al., 2004; Rückamp & Blindow, 2012; Rückamp et al., 2010). La línea de nieve varía de 140 a 210 m a.s.l. (Birkenmajer, 2002). La precipitación promedio de la capa de hielo asciende a 701.3 mm durante el periodo 1968-2011 (Kejna et al., 2013). La temperatura media del aire en Península Fildes (Simões et al. 1999) fue de -2.8°C (1947-1995), mientras en isla Rey Jorge (Kejna et al., 2013) fue de -2.5°C (1948-2011). El glaciar Znosko (ZG) se localiza en la IRJ, en el extremo occidental de bahía Almirantazgo (ensenada Mackellar) colindante con la estación científica antártica Machu Picchu (Perú). En el 2013 el Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú (SENAMHI) y la Autoridad Nacional del Agua (ANA) participaron en la XXII Expedición científica del Perú a la Antártida (ANTAR XXII) con el objeto de realizar un diagnóstico del glaciar Znosko, confirmando que dicho glaciar reunía las condiciones técnicas y de seguridad para la evaluación de su balance de masa. Una red de balizas se instaló (19) en el glaciar Znosko durante la XXV (2017-18), las que han sido monitoreadas durante la ANTAR XXVI (2018-19) y XXVII (2019-20).

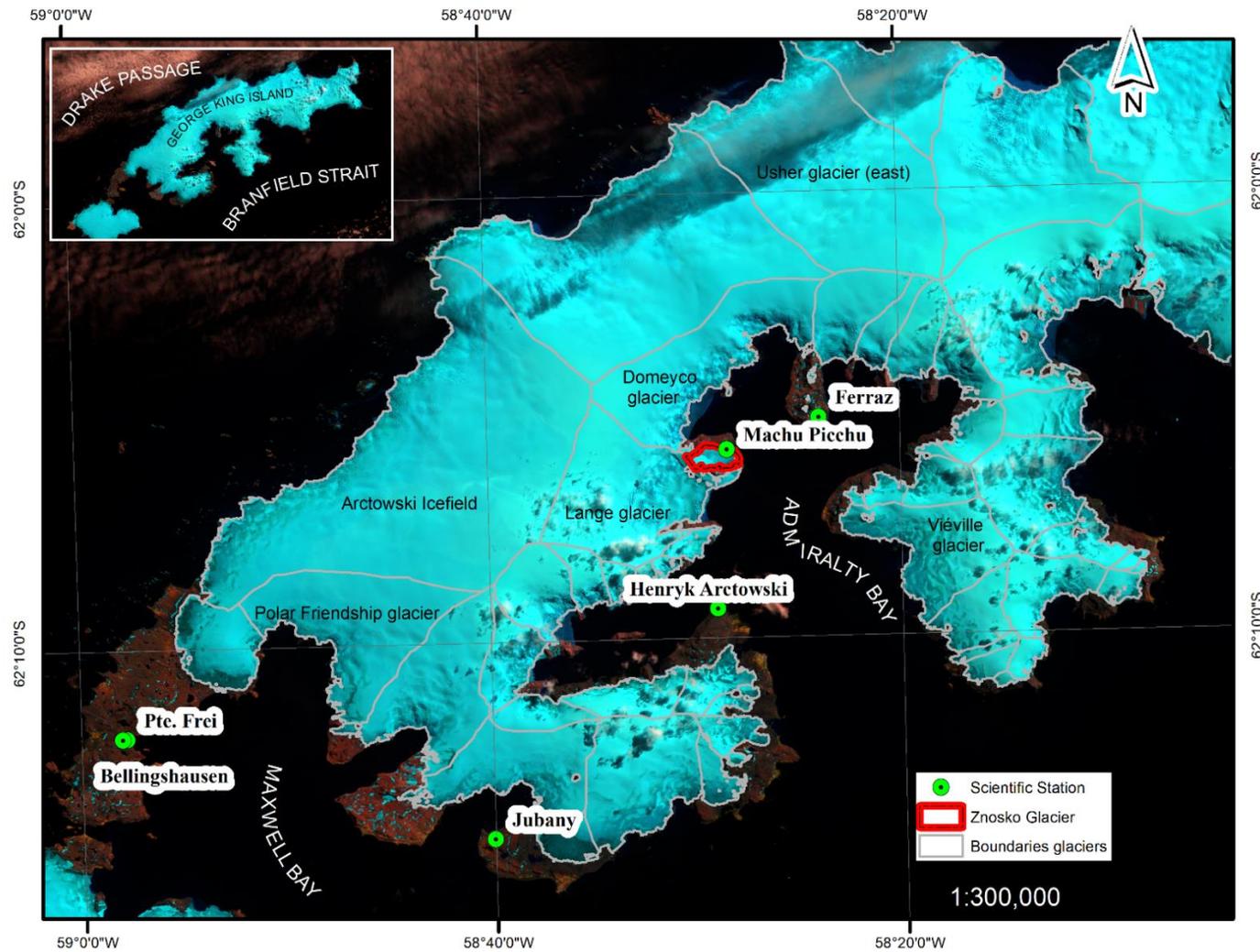


Figura 1. Mapa de ubicación del glaciar Znosko y estaciones científicas próximas.

## 2.2 Datos

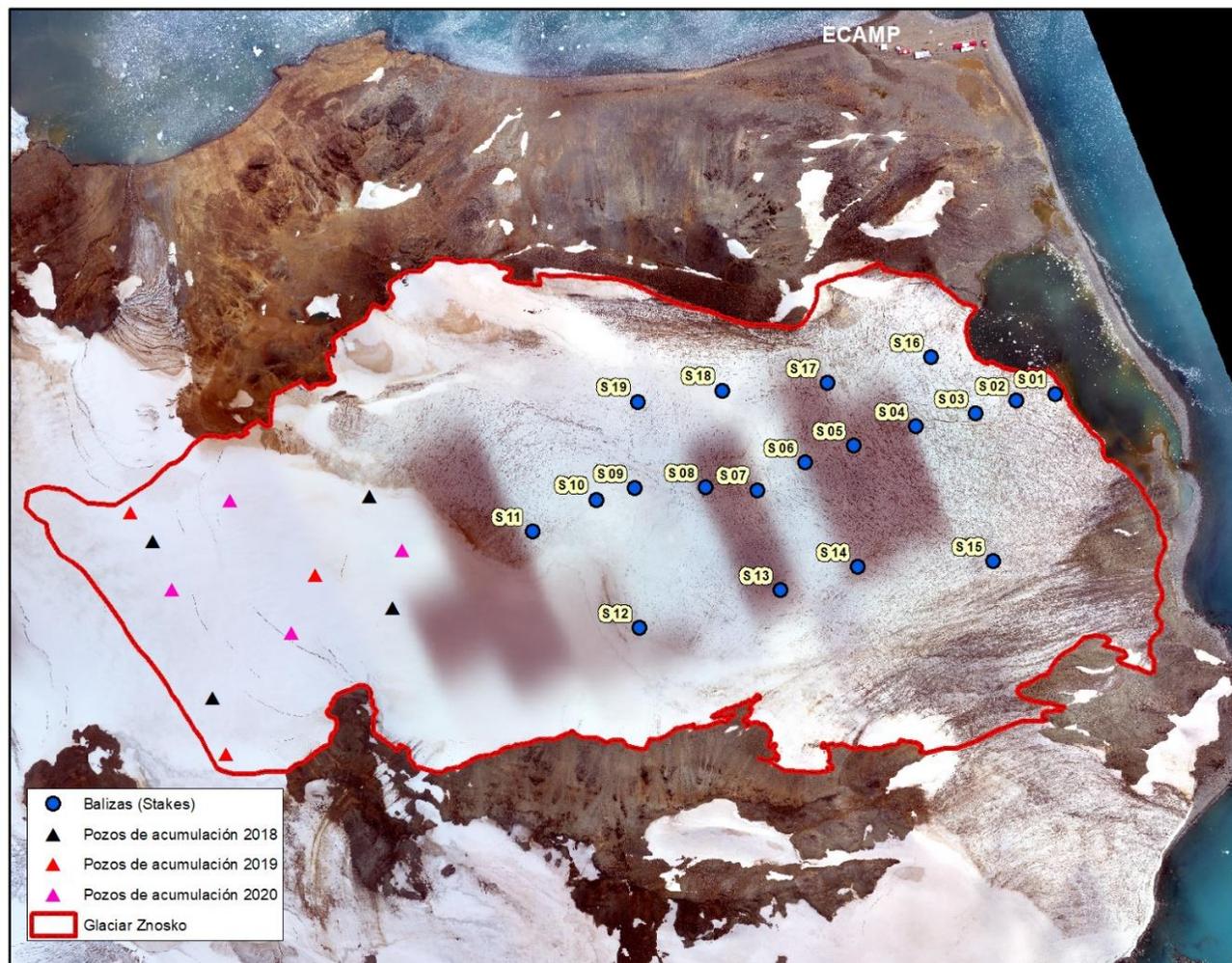
Considerando que este glaciar es un cuerpo de hielo que gana masa por diagénesis de la precipitación sólida en su parte superior y pierde masa por ablación, sublimación y desprendimiento (efecto calving) en su parte frontal, es necesario no solo evaluar las condiciones propias del hielo, sino también los principales factores climáticos que lo controlan.

### 2.2.1 Datos meteorológicos

Se analizó la precipitación y la temperatura del aire a paso de tiempo mensual registradas desde marzo del 2015 hasta febrero del 2021, procedente de la estación científica Bellinghausen ubicada a 62.20°S y 58.97°W y una altitud de 16 m.s.l, operado por el gobierno ruso. (Ver Figura 1). La precipitación fue descargada del portal <https://www.ncdc.noaa.gov/cdo-web/> de la National Centers for Environmental Information (NCDC) que pertenece a la National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA) de los United States. En el caso de la temperatura del aire los datos fueron obtenidos del portal <https://legacy.bas.ac.uk/met/READER/surface/Bellingshausen.All.temperature.txt> que administra el British Antarctic Survey (BAS) del Reino Unido. Solo se observaron datos faltantes en la precipitación que ascendieron al 4.2% del periodo total, los que fueron completados con la información de estacionalidad generada de referencia.

### 2.2.2 Testigos de acumulación y estacas de ablación

Los testigos de acumulación fueron obtenidos para los veranos australes comprendidos entre los años 2018 al 2020, siendo 4 para el año 2018, 3 para el 2019 y 4 para el 2020. Respecto al control de la ablación, en el año 2018 se instalaron 19 estacas en la zona de ablación (ver Figura 2), ubicándose solo 6 durante enero del 2019 debido a la alta cobertura nival que dificultó su identificación, mientras que en febrero del 2020 solo 15 estacas se localizaron. La importante longitud de las estacas permitió medirlas en los años de estudio sin la necesidad de instalar nuevas debido a una no emergencia total de estas. En la se muestra las características de las estacas instaladas en el año 2018.



**Figura 2. Red de balizas y pozos de acumulación en el glaciar Znosko**

### 2.2.3 Imágenes de satélite y ortofotos

La región de la Península Antártica y su entorno se caracterizan por presentar una cobertura nubosa importante durante todo el año, existiendo pequeños periodos durante los meses de verano para obtener una imagen apropiada. Considerando que el objetivo de este artículo no solo es medir el área glaciar si no también ubicar la línea de nieve, se emplearon de forma conjunta imágenes de satélite pasivas y ortofotos generadas mediante el uso de Vehículos aéreos no tripulados (UAV). La primera imagen corresponde a una WorldView-2 proporcionada por el Ministerio de Relaciones Exteriores de Perú, además se empleó una imagen Landsat 8 del 2018 y Sentinel-2 del 2019 descargadas del portal glovis: <https://glovis.usgs.gov/app> perteneciente al United States Geological Service (USGS). En el caso de las ortofotos éstas fueron generadas mediante el uso de un UAV Phantom 4 Pro de ala rotatoria (quadcoptero) con capacidad de soportar vientos de hasta 20 nudos, equipo al que se le instaló una cámara RGB – Sony Alfa 5000 de distancia focal de 16 mm y resolución de 23 megapíxeles y fueron procesadas con el programa informático Pix 4D. Las ortofotos fueron usadas también para la generación de dos modelos digitales de elevación (DEM) para los años 2019 y 2020 de resolución submétrica, (5 metros). Sobre la Tabla 1 se presenta una descripción de las principales características técnicas de las imágenes y ortofotos utilizadas, como también el rol que cumplieron en el presente estudio.

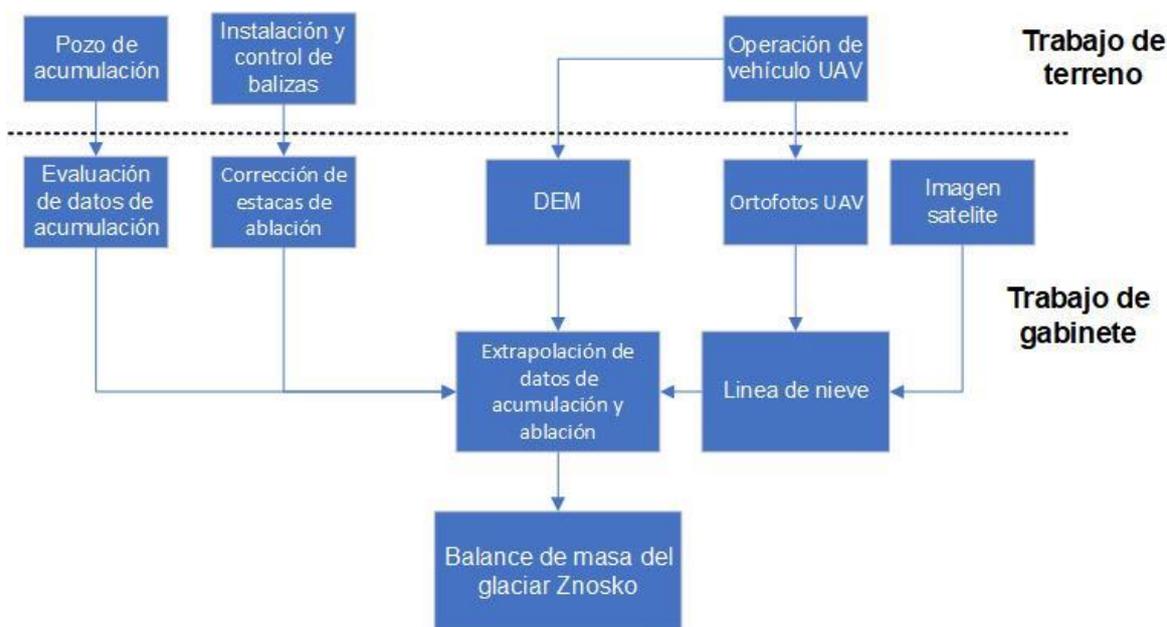
**Tabla 1. Características de imágenes y orthophotos utilizadas en el estudio**

Instrumento	Resolución del píxel	Resolución del captor	Fecha	Objetivo	Referencias
WorldView 2	< 1m	Panromática	Mar-12	Posición de la línea de nieve y delimitación glaciar	<a href="https://www.aerospace-technology.com/projects/world-view-2/">https://www.aerospace-technology.com/projects/world-view-2/</a>
Landsat 8	30 m	OLI 9 Bandas	Feb-18	Posición de la línea de nieve	<a href="https://landsat.gsfc.nasa.gov/landsat-8/landsat-8-overview">https://landsat.gsfc.nasa.gov/landsat-8/landsat-8-overview</a>
Sentinel 2	10 m	MSI (Band 2 to 4)	Abr-19	Posición de la línea de nieve	<a href="https://sentinel.esa.int/web/sentinel/technical-guides/sentinel-2-msi/references">https://sentinel.esa.int/web/sentinel/technical-guides/sentinel-2-msi/references</a>
UAV ortofoto	< 1m	RGB	Ene-19	DEM y delimitación glaciar	-
UAV ortofoto	< 1m	RGB	Feb-20	DEM, posición de la línea de nieve y delimitación glaciar	-

Fuente: Elaboración propia, 2022.

## 2.3 Metodología

En la actualidad existen diferentes métodos para calcular el balance de masa glaciar, como el método glaciológico (W. S. B. Paterson, 1994), geodésico (Hagg et al., 2004; Kaser et al., 2003), hidrológico (Kaser et al., 2003), estadísticos (Ostrem & Stanley, 1966; Liboutry, 1974), determinar la posición de la ELA (Ostrem & Stanley, 1966), la posición terminal del glaciar (Paterson, 1981), entre otros; siendo los tres primeros los más usados en la actualidad. No es objetivo del presente artículo hacer una guía detallada del procedimiento de terreno como de gabinete desarrollado para calcular el balance de masa, sino presentar de forma sintética los consideraciones esenciales tomadas en terreno asociadas con las condiciones de trabajo (aspecto técnico, climático y logístico) para operar en la Antártida, poniéndose más énfasis en el procesamiento de los datos que conducen al cálculo del balance de masa glaciar (los operaciones vinculadas al sobrevuelo y tratamiento de imágenes derivadas de los UAV no serán tratados en el presente artículo). En la Figura 3 se muestra el flujograma de los trabajos de terreno y gabinete que permiten la determinación del balance de masa.



**Figura 3. Flujograma de procesos desde el trabajo de terreno hasta la obtención del balance de masa.**

### 2.3.1 Trabajo de terreno

Los trabajos de terreno que se desarrollan en esta parte del mundo tienen una serie de limitaciones y condiciones diferentes a las operaciones continentales debido

principalmente por su accesibilidad (tipo de glaciar), condiciones climáticas y logísticas. Respecto a las condiciones logísticas no todos los países u investigadores tienen acceso a bases científicas permanentes que permitan un monitoreo constante durante todo el año. Para el estudio del glaciar Znosko la ECAMP brinda el soporte logístico para las actividades de terreno accediendo solo durante el verano austral no siendo necesariamente constante el periodo de estadía (entre enero y febrero principalmente), por lo que los equipos a ser instalados parten de una hipótesis que posiblemente no tendrán supervisión o control hasta el verano austral siguiente. Respecto a lo climático, a pesar de que los meses de verano presentan las mejores condiciones meteorológicas lo que permite el acceso a los glaciares, no se puede asumir que esta condición es permanente habiendo cuantificado que los días operativos no superaron al 70% de los previstos durante la etapa de preparación. La accesibilidad es otro factor importante, debido a que gran parte de los glaciares ubicados en la IRJ son de terminación marina, caracterizados por una importante dinámica que no permite su acceso de forma directa (sector frontal) condicionando su monitoreo al uso de herramientas de percepción remota.

El método utilizado en este estudio es el glaciológico, basado en la medida de ganancia y pérdida de masa del glaciar. La medición de acumulación se realizó con el uso de perforadoras tipo kovacs, las cuales se caracterizan por su ligero peso y fácil traslado, permitiendo la extracción de muestras (testigos de hielo) superiores a los 3 metros sin dañar la estructura de estas, así como ser analizadas y catalogadas sobre el terreno. Respecto a las mediciones en la zona de ablación se instalaron estacas o balizas (metal) de control conservándose una distancia dentro de lo posible homogénea, habiéndose priorizado la instalación de una primera red a lo largo de la posible línea de flujo principal del glaciar, cuya posición geográfica fue registrada con la ayuda de un GPS portátil. Asimismo, se instalaron estacas de forma paralela a la línea de flujo principal, las que se armaron con una estructura pivotante o articulada para que a medida que emerjan puedan flexionarse sin que lleguen a dañarse o romperse, cuya longitud fue superior a los cinco metros, esto como previsión ante una posible falta de control de estas en el verano austral del siguiente año, lo que permitiría no perder el muestreo al regreso durante la expedición siguiente. Un factor importante al momento de hacer la lectura de emergencia de las estacas es diferenciar el nivel del hielo y de la nieve, que es fuente de muchos errores. La metodología general del uso de estacas y testigos de acumulación es descrita por diferentes autores desde mediados del siglo pasado, por ejemplo: Ostrem & Stanley (1966), Brugman & Ostrem (1991), Kaser et al., (2003), Francou & Pouyaud (2004), Cogley et al. (2011), Rivera et al. (2016), etc.

En la Figura 4 y Figura 5 se muestra el trabajo de terreno realizado por los expedicionarios durante la expedición ANATAR XXVII (verano 2020).



**Figura 4. Personal del SENAMHI y ANA en campaña de búsqueda de balizas**



**Figura 5. Personal del SENAMHI y ANA realizando lectura de balizas.**

### 2.3.2 Trabajo de gabinete

Según Dobhal (2011) un glaciar puede ser definido como una masa de hielo dura, gruesa y compacta en tierra que se forma a través de la recristalización de la nieve y avanza por su propio peso, formándose durante muchos años por compactación de nieve en áreas donde se acumula más nieve de la que se derrite, debido a tres componentes básicos, acumulación, ablación y zona terminal. Mientras que el balance de masa glaciar según Haerberli (2011) es la suma de todos los procesos que agregan masa a un glaciar y se la quitan. La acumulación o adición de masa se produce con mayor frecuencia en forma de nevadas, cuya distribución puede ser modificada por el viento y/o las avalanchas. El derretimiento de la nieve y el hielo es la forma predominante de ablación o remoción de masa, pero el desprendimiento de los glaciares de mareas, la avalancha de hielo de los glaciares colgantes empinados o la evacuación de la nieve arrastrada por el viento en áreas secas o durante las estaciones frías / secas pueden ser de gran importancia relativa a nivel local. Diferentes autores manejan el mismo tipo de definición bajo diferentes enfoques, por ejemplo Cogley et al. (2011), Kaser et al. (2003), Jansson et al. (2003).

Matemáticamente el balance de masa del glaciar se puede describir como:

$$\frac{db}{dt} = \rho \frac{dh}{dt} + \int \frac{d\rho}{dt} dz$$

Donde,  $\rho$  es la densidad del hielo de espesor  $h$ , que varía en el tiempo  $t$ .

Una simplificación de la ecuación anterior del balance de masa en cualquier punto del glaciar se dará como:

$$b_i = \rho_0 \Delta h + (\rho_2 h_2 - \rho_1 h_1)$$

Donde,  $b_i$  corresponde al balance en cualquier punto del glaciar,  $\rho_0$  es la densidad del glaciar en  $0.9 \text{ gr.cm}^{-3}$ , donde el primer componente de la ecuación representa el balance del hielo y el segundo el material poroso (nieve y firn) que cambia con el tiempo. Para extender el balance a todo el glaciar, se utilizan los testigos de acumulación y estacas colocados en el glaciar. El principio básico es de ponderar el balance medido por el área de extrapolado de las muestras al área total del glaciar, según la expresión:

$$B_n = \frac{[\sum (b_{n1}S_1 + b_{n2}S_2 + \dots + b_{ni}S_i)]}{S}$$

Donde,  $B_n$  corresponde al balance de masa de todo el glaciar,  $S$  es la superficie del glaciar,  $b_{n1}$ ,  $b_{n2}$ ,  $b_{ni}$  el balance ponderado por el área  $S_i$ .

Considerando la automatización de los procesos mediante el uso de formatos ráster y sistemas de información geográfica,  $b_n$  se puede considerar al valor de un pixel y  $S_n$  la resolución de los pixeles.

Una de las principales fuentes de error durante el cálculo del balance de masa está referida al tratamiento de la información proveniente del terreno como su posterior extrapolación a todo el glaciar para el cálculo final ( Paterson, 1994), siendo la más utilizada el método manual que interpola los datos de terreno siguiendo patrones geomorfológicos locales y la altitud, lo cual depende fuertemente del criterio del especialista. en este estudio se utilizaron 05 métodos de interpolación contenidos dentro del programa informático ArcMap 10.8 los cuales se presentan en Fuente: Elaboración propia, 2022.

**Tabla 2. métodos de interpolación utilizados**

Método	Referencias
IDW	Mitas & Mitasova (2005)
Kriging	Oliver & Webster (1990)
Natural Neighbor	Sibson (1981)
Spline	Johnston et al. (2001)
Spline with barrier	Smith & Wessel (1990)

Fuente: Elaboración propia, 2022.

### 3. Resultados

El análisis de las imágenes de satélite y ortofotos del glaciar Znosko determino que el área del glaciar en el año 2020 era de 1.72 km<sup>2</sup>, donde la parte expuesta en los años 2012, 2019 y 2020 vario siendo de 1.66 km<sup>2</sup>, 1.62 km<sup>2</sup> y 1.6 km<sup>2</sup> respectivamente, lo que significa que en estos últimos 8 años perdió 0.06 km<sup>2</sup>, pero entre los años 2019 y 2020 retrocedió 0.02 km<sup>2</sup> ya que se observó una pérdida importante de masa por desprendimiento de hielo en el frente glaciar. De igual manera sobre estas imágenes (Figura 6) se observa que la pequeña laguna que se encuentra en el frente está comenzando a crecer. La hipsometría del glaciar se muestra en la Figura 6, la cual fue construida en base al DEM del año 2020 donde se observa que el cambio de área se ha dado solo en los 30 primeros metros de altitud y la mayor concentración de superficie glaciar se encuentra entre los 90 a 120 m a.s.l. y posteriormente entre 120 a 150 m a.s.l. siendo la diferencia entre estos de 0.0043 km<sup>2</sup>. Sobre la misma Figura se observa que la parte superior entre los 240 a 270 m a.s.l. el área del glaciar aumenta, debido a un factor topográfico en esta zona.

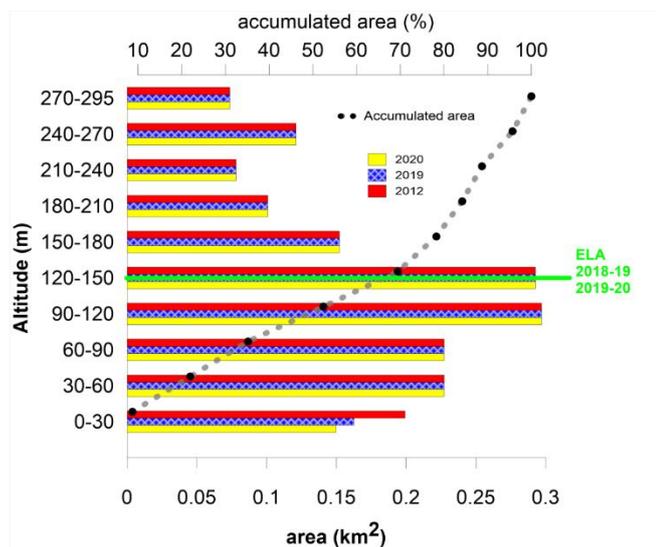
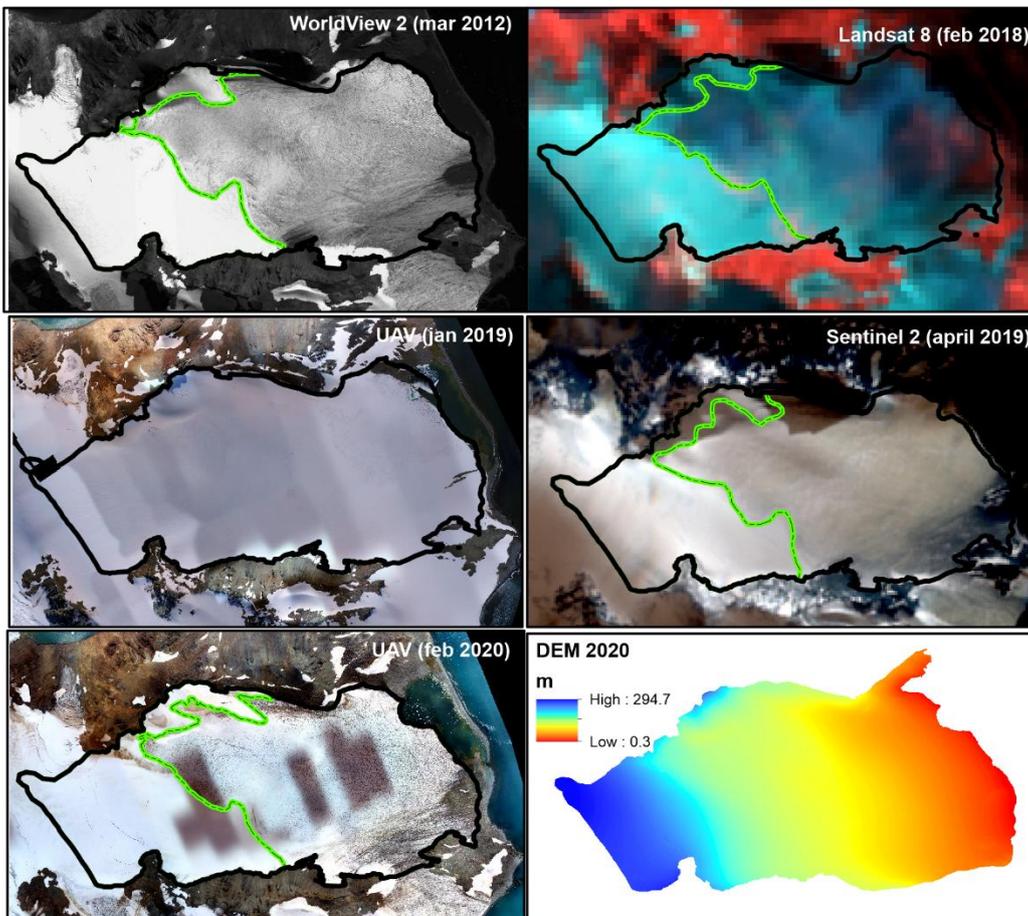


Figura 6. (superior) Imágenes de satélite y ortofotos utilizados en el estudio (la línea verde con negro indica la línea de nieve) y (inferior) muestra la hipsometría del glaciar Znosko para los años 2012, 2019 y 2020.

Tanto la precipitación como la temperatura del aire son factores determinantes en la ablación como también en la ganancia de masa de un glaciar, en el glaciar Znosko el análisis de estas variables (también el balance de masa) se hizo considerando el inicio del periodo anual desde el mes de marzo  $(n)$  a febrero  $(n+1)$ , debido a que los controles de las estacas y testigos de acumulación se tomaron principalmente en los meses de febrero lo que haría que esos datos sean representativos de febrero de un año a otro. Asimismo, los datos de su estacionalidad (generada en base a 6 años) son presentados en la Tabla 3, donde se observa que entre los meses de diciembre a marzo la temperatura estuvo por encima de los  $0^{\circ}\text{C}$ , siendo febrero el más cálido con  $1.6^{\circ}\text{C}$ , mientras que para el resto de los meses la temperatura estuvo por debajo de los  $0^{\circ}\text{C}$ , siendo agosto el más frío con  $-5.8^{\circ}\text{C}$ . Respecto a la precipitación en el mes de marzo se registró la mayor intensidad con  $84.9\text{ mm}$  y en julio la más bajo con  $34.3\text{ mm}$ . En la Figura 7a se muestra la comparación de la estacionalidad de estas dos variables respecto a los datos observados para los diferentes años, En la Figura 7b se observan las tendencias lineales para la precipitación y temperatura cuyas pendientes ascienden a  $0.0001629$  y  $0.011$  respectivamente, lo que refleja que estas dos variables están teniendo a un incremento mínimo, tendencias que deben ser tomadas con mucho cuidado ya que para caracterizar realmente la climatología de la zona de estudio se requieren 30 años (Bates et al., 2008) de información mínima, tendencia que podría estar influenciada por los valores extremos. Respecto a los valores anuales, se observa que el año 2018-19 se registró la mayor precipitación acumulada con  $738.3\text{ mm}$  y en el año 2016-17 presentó la menor precipitación con  $570.9\text{ mm}$  (Figura 7c). Con relación a la temperatura del aire, el año 2015-16 fue el más frío con  $-3.19^{\circ}\text{C}$  y el año 2016-17 el más cálido con  $-1.67^{\circ}\text{C}$ , además en los años 2018-19 y 2019-20 se registraron temperaturas que ascendieron a  $-1.75^{\circ}\text{C}$  y  $-1.97^{\circ}\text{C}$  respectivamente. A pesar de que todos estos años son fríos se debe considerar que son promedios anuales. La temperatura promedio de todos estos años de evaluación es  $-1.8^{\circ}\text{C}$  y la precipitación media total de  $656.6\text{ mm}$ .

**Tabla 3. Estacionalidad de la precipitación calculada para el periodo entre 2015 al 2021.**

variable	mar	abr	may	jun	jul	ago	sep	oct	nov	dic	ene	feb
T ( $^{\circ}\text{C}$ )	0.8	-1.3	-2.5	-4.3	-4.7	-5.8	-4.2	-2.5	-0.9	0.3	1.4	1.6
PP (mm)	84.9	55	54.5	53.2	34.3	58.6	56.1	45.3	46	47.7	61.5	59.5

Fuente: Elaboración propia, 2022.

Para llegar al balance de masa glaciar (balance neto), en primer lugar, se determinaron los niveles basales de los testigos de acumulación, que son presentados en la Figura 8 (a) en donde los puntos de color negro muestran las medidas registradas (las más profunda representa el nivel basal) y la puntillina azul en su parte final muestra el contenido acumulado en mm.w.e. para el punto

basal de cada testigo de estudio. Para el año 2018-19 los niveles basales se encontraron a una profundidad menor de 160 cm y para el año 2019-20 estuvieron entre 160 a 200 cm de profundidad con excepción del testigo 4 que no superó los 80 cm de profundidad. Un factor relevante en la zona de muestreo es la existencia de una importante deposición de material proveniente de las montañas laterales del glaciar, lo que ocasiona una fusión superficial importante que acelera el proceso de diagénesis de la nieve creando capas de alta densidad que pueden confundirse como capa basal.

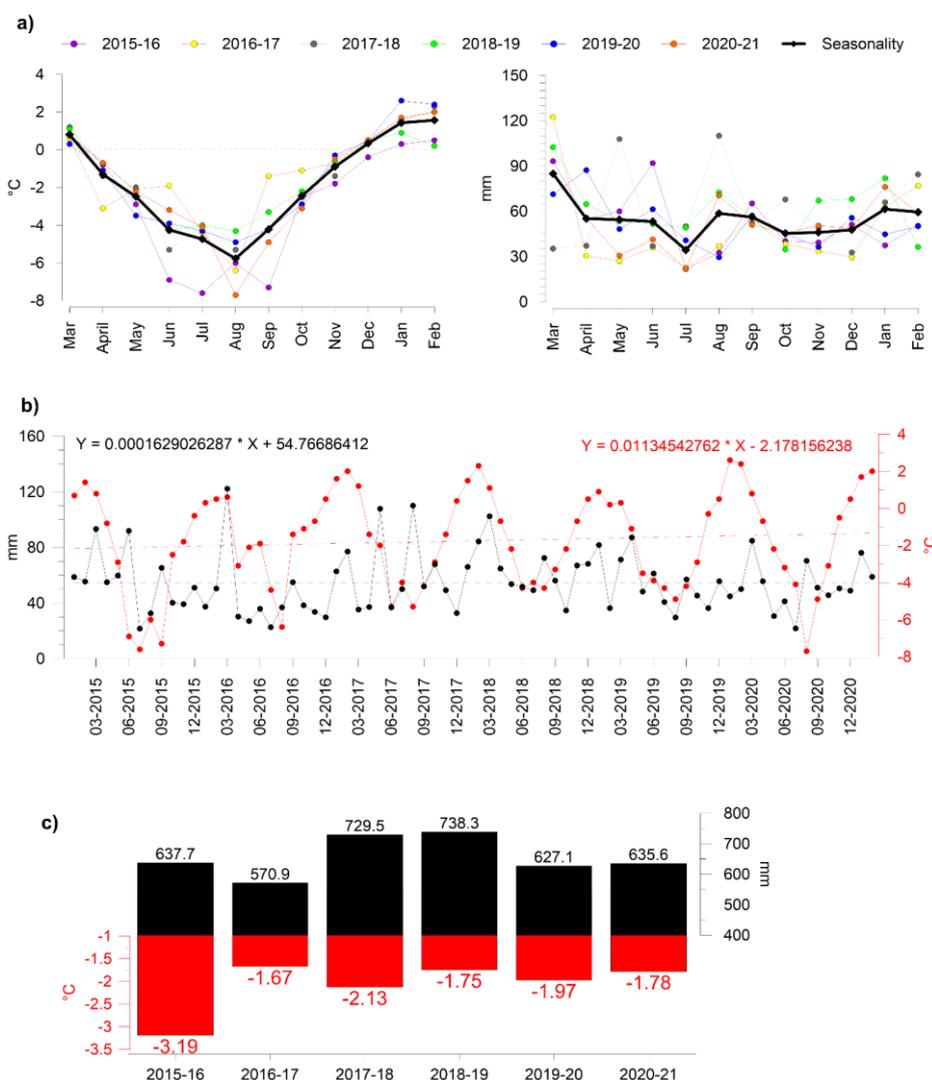
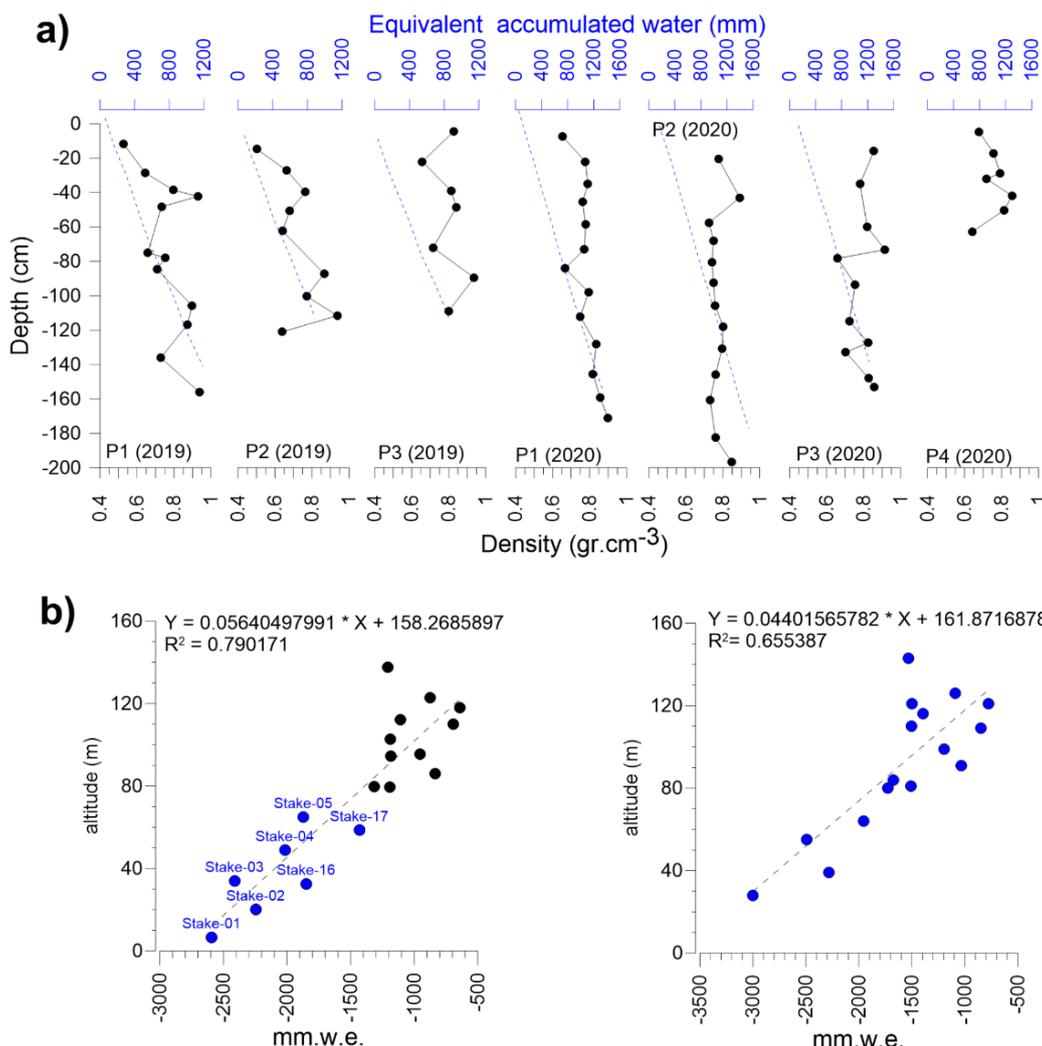


Figura 7. (a) estacionalidad de la precipitación y temperatura del aire (b) series de temperatura del aire y precipitación mensual con sus respectivas líneas de tendencia (c) comparación de la temperatura del aire y precipitación a nivel de año de muestreo.

Respecto a las estacas colocadas en la zona de ablación, de las 19 instaladas en enero del 2018, solo 7 fueron ubicadas en febrero del 2019 y 16 en febrero del 2020 (la estaca N°1 se perdió por desprendimiento del frente glaciar). Debido al insuficiente número de estacas ubicadas en el periodo 2018-19 fue necesario reconstituir las faltantes basándonos en la buena correlación lineal existen entre las estacas de los dos periodos de estudio ( $r^2 = 0.925$ ). Sobre la Figura 8 en (b) a la derecha se observa las estacas medidas (puntos en azul) y las reconstituidas mediante regresión lineal (puntos en negro,) para el periodo 2018-19. Además, el termino independiente de la regresión lineal de las estacas en su totalidad (observadas y reconstituidas) muestra la posición donde el balance de masa es cero (158.3 m a.s.l.) .Para las estacas del periodo 2019-20 en la Figura 8 en (b) a la izquierda se observa una importante correlación ( $r^2=0.66$ ) de la regresión lineal de estas, observándose que el termino independiente fija la posición donde ubica la ELA a 161.9 m.s.l.



**Figura 8. (a) Perfil de densidad y su contenido de agua equivalente para los testigos de acumulación, (b) en la izquierda estacas medidas para el periodo comprendido entre 2018-19, el color azul indica estacas que fueron medidas de forma directa y en la derecha estacas medidas para el periodo comprendido entre 2019-20.**

En la determinación del balance de masa glaciar para los periodos de estudio no solo se utilizó los datos de las estacas y testigos de acumulación, sino también la posición de la línea de nieve (Figura 6) como referencia de posición de la ELA, esto basándose en la hipótesis que la línea de nieve marca el equilibrio de la fusión de la nieve respecto a la temperatura del aire marcando de forma indirecta el inicio de la zona de acumulación glaciar. Esto obliga a generar puntos de apoyo de interpolación asumiendo un valor de 0.0 mm.w.e sobre la línea de nieve. Para el periodo 2018-19 sobre la Tabla 4 se muestra los resultados del balance de masa para el promedio de los 5 métodos de interpolación utilizados, en donde se tiene un balance neto de -590.7 mm.w.e., donde la acumulación

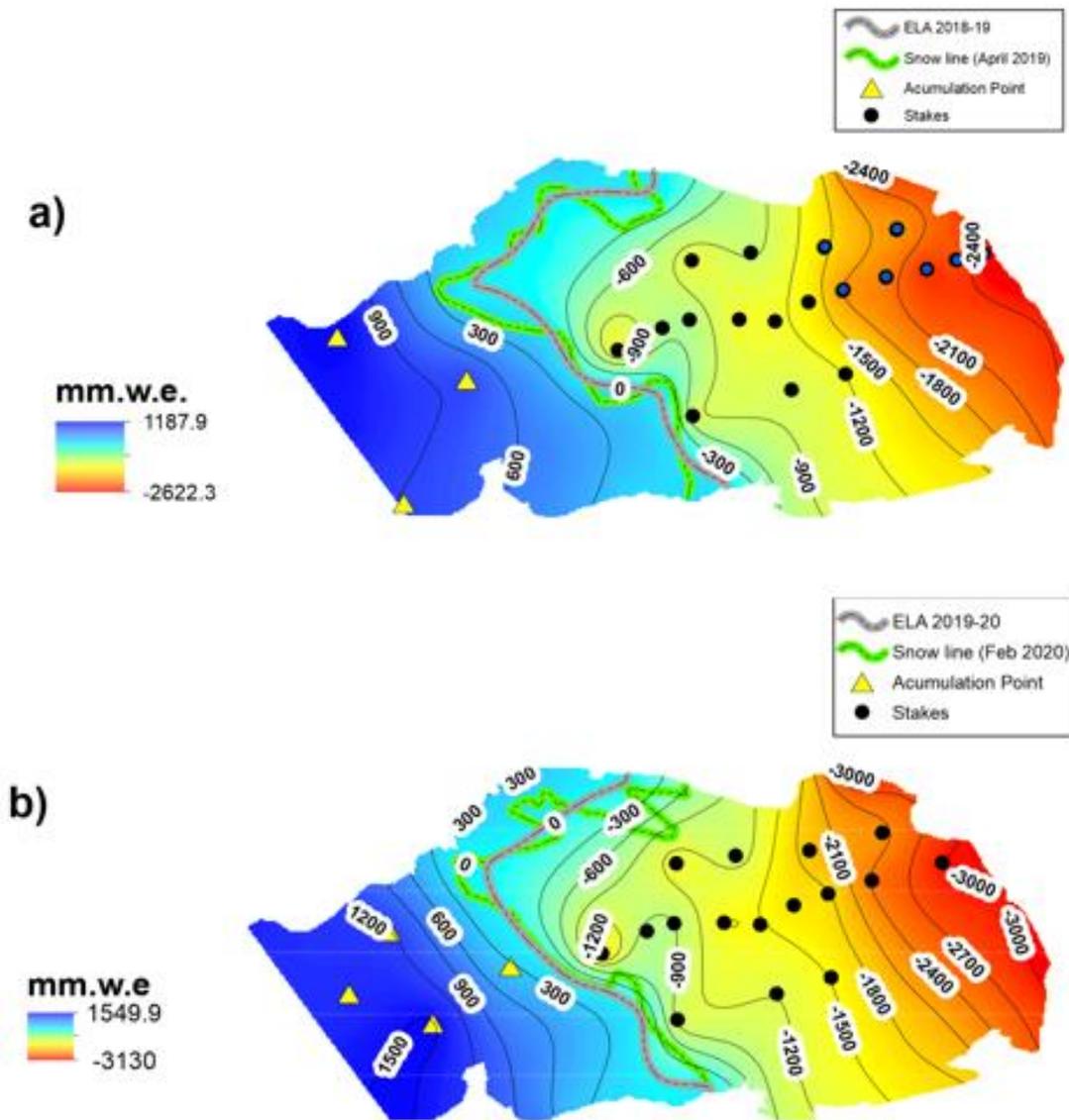
representa 192.5 mm.w.e con un área de 1.07 km<sup>2</sup> y la ablación -783.1 mm.w.e. con un área de 1.07 km<sup>2</sup>.

Respecto al periodo 2019-20 en la Tabla 4 se presentan los resultados respectivos, donde el balance neto glaciar promedio es -686.7 mm.w.e., con una ganancia (acumulación) y pérdida (ablación) promedio de 270.7 mm.w.e (0.55 km<sup>2</sup>) y -957.5 mm.w.e (1.06 km<sup>2</sup>), respectivamente. El análisis visual de la Figura 9 en (b) al igual que para el periodo 2018-19 muestra que los métodos Spline y Spline with barrier representan mejor la línea de nieve.

**Tabla 4. Balance de masa del glaciar Znosko para los periodos periodo 2018/19 y 2019/20**

Periodo	Balance neto (mm.w.e.)	Acumulación (mm.w.e.)	Ablación (mm.w.e.)	Área acumulación (km <sup>2</sup> )	Área ablación (km <sup>2</sup> )
2018/19	-590.7	192.5	-783.1	0.55	1.07
2019/20	-686.7	270.7	-957.5	0.55	1.06

Fuente: Elaboración propia, 2022.



**Figura 9. Balance de masa para el glaciar Znosko para el periodo (a) 2018-19 y (b) 2019-20**

Respecto al análisis de la ELA, se determinó su posición a una altitud media de 146.5 m a.s.l para 2018-19 (no considera el método estacas), oscilando entre 154.4 y 121.2 m a.s.l. al promediar los 5 métodos en estudio. Para el periodo 2019-20 la posición media de la ELA basada en los 5 métodos fue de 144.2 m a.s.l oscilando entre 140.1 y 151.2 m a.s.l.

## 4. Conclusiones y Discusiones

Durante el verano austral del año 2018 en el glaciar Znosko se instaló una red de 19 estacas las cuales fueron controladas de forma paralela con testigos de acumulación durante los años 2019 y 2020, lo que permitió determinar que el balance de masa de este glaciar fue negativo registrando -590.7 mm.w.e (2018-19) con la ELA a 146.5 m a.s.l. y -686.7 mm.w.e (2019-20) con la ELA a 144.2 m a.s.l.. Este balance negativo se encuentra en gran parte explicado por las condiciones climáticas locales, en donde la precipitación promedio ascendió a 738.1mm (2018-19) y 627.1 mm (2019-20) y la temperatura del aire en promedio de los últimos 6 años estuvo por encima de los 0°C entre los meses de diciembre a marzo en los que predomina la fusión glaciar. La metodología utilizada para el cálculo del balance de masa se apoya en las muestras de terreno, aunque para el periodo 2018-19 estas fueron insuficientes (7 estacas), se logró correlacionar las existentes con las del periodo 2019-20 lo que permitió recuperar las restantes. Para calcular el balance de masa y disminuir la fuente de error se utilizó 5 métodos de interpolación de datos, siendo el balance neto el promedio de estas. Además, se utilizó como elemento de ajuste visual la posición de la línea de nieve (obtenida de imágenes de satélite y ortofotos) considerando la hipótesis que esta es un proxy de la posición de la ELA, mostrando una correcta performance, y como método indirecto también se puedan utilizar los 05 métodos objetos de este estudio, siendo el Spline el que mejor representa la forma de la línea de nieve. Cabe resaltar que cualquiera sea el método a utilizar es necesario contar con puntos de apoyo asumidos sobre la línea de nieve ya que sin estos se observaron errores de interpolación. Otros factores determinantes en la pérdida de masa glaciar son a) la deposición de materiales (observada en una zona próxima a la ELA) lo que acelera la fusión por lo que no puede dejarse de lado para una comprensión del balance de masa, b) el retroceso del frente glaciar por proceso Calving que está originando el desprendimiento de masas de hielo (anterior al año 2018 no se observó) posiblemente debido a que lecho del frente glaciar se encuentra bajo el nivel del mar (Bello et al., 2020) y la intrusión de agua proveniente del mar está socavando la parte inferior de este glaciar.

## 5. Agradecimientos

Los autores agradecen a la Compañía de Operaciones Antárticas (COA) del Ejército del Perú por su apoyo logístico y de seguridad durante el ingreso al glaciar Znosko en las diferentes expediciones ANTAR al continente antártico.

## 6. Bibliografía

- Allison, I., Fierz, C., Hock, R., Mackintosh, A., Kaser, G., & Nussbaumer, S. U. (2019). IACS: Past, present, and future of the International Association of Cryospheric Sciences. *History of Geo- and Space Sciences*. <https://doi.org/10.5194/hgss-10-97-2019>
- Bamber, J. L., Westaway, R. M., Marzeion, B., & Wouters, B. (2018). The land ice contribution to sea level during the satellite era. In *Environmental Research Letters*. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/aac2f0>
- Bates, B., Wu, S., Kundzewicz, Z., & Palutikof, J. (2008). Bates, B.C., Z.W. Kundzewicz, S. Wu y J.P. Palutikof, Eds., 2008: El Cambio Climático y el Agua. Documento técnico del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático. In *Secretaría del IPCC*. <http://216.92.126.55/publicaciones/climate-change-water-sp.pdf>
- Bello, C., Suarez, W., Cruz, R., Brondi, N. (2020). Ice thickness measurements and volume estimates for Znosko glacier (Antarctica) using Glattop model. doi: 10.1002/essoar.10505379.1
- Brugman, M., & Ostrem, G. (1991). *MASS-BALANCE MEASUREMENTS A manual for field and office work*.
- Carrasco, J. F. (2013). Decadal Changes in the Near-Surface Air Temperature in the Western Side of the Antarctic Peninsula. *Atmospheric and Climate Sciences*, 03(03), 275–281. <https://doi.org/10.4236/acs.2013.33029>
- Cogley, J. G., Hock, R., Rasmussen, L. a., Arendt, A. A., Bauder, A., Braithwaite, R. J., Jansson, P., Kaser, G., Möller, M., Nicholson, L., & Zemp, M. (2011). *Glossary of glacier mass balance and Related Terms* (Technical Documents in Hydrology).
- da Rosa, K. K., Perondi, C., Veetil, B. K., Auger, J. D., & Simões, J. C. (2020). Contrasting responses of land-terminating glaciers to recent climate variations in King George Island, Antarctica. *Antarctic Science*, 32(5), 398–407. <https://doi.org/10.1017/S0954102020000279>
- Dobhal, D. P. (2011). *Glacier BT - Encyclopedia of Snow, Ice and Glaciers* (V. P. Singh, P. Singh, & U. K. Haritashya (eds.); pp. 376–377). Springer Netherlands. [https://doi.org/10.1007/978-90-481-2642-2\\_190](https://doi.org/10.1007/978-90-481-2642-2_190)
- Falk, U., Silva-Busso, A., & Pölcher, P. (2018). A simplified method to estimate the runoff in Periglacial Creeks: A case study of King George Islands, Antarctic Peninsula. *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 376(2122). <https://doi.org/10.1098/rsta.2017.0166>
- Ferron, F. A., Aquino, F. E., & Setzer, A. W. (2004). Air temperature time series for King George Island, Antarctica. *Pesquisa Antártica Brasileira*, 4(0), 155–169.
- Fischer, A. (2010). Comparison of direct and geodetic mass balances on a multi-annual time scale. *The Cryosphere Discussions*, 4(3), 1151–1194.

<https://doi.org/10.5194/tcd-4-1151-2010>

- Francou, B., & Pouyaud, B. (2004). *Metodos de observacion de glaciares en los Andes tropicales - Mediciones de terreno y procesamientos de datos*. <https://doi.org/10.13140/RG.2.1.4220.8164>
- Haeberli, W. (2011). *Glacier Mass Balance BT - Encyclopedia of Snow, Ice and Glaciers* (V. P. Singh, P. Singh, & U. K. Haritashya (eds.); pp. 399–408). Springer Netherlands. [https://doi.org/10.1007/978-90-481-2642-2\\_341](https://doi.org/10.1007/978-90-481-2642-2_341)
- Hagg, W. J., Braun, L. N., Uvarov, V. N., & Makarevich, K. G. (2004). A comparison of three methods of mass-balance determination in the Tuyuksu glacier region, Tien Shan, Central Asia. *Journal of Glaciology*, 50(171), 505–510. <https://doi.org/10.3189/172756504781829783>
- Jansson, P., Hock, R., & Schneider, T. (2003). The concept of glacier storage: a review. *Journal of Hydrology*, 282(1–4), 116–129. [https://doi.org/10.1016/S0022-1694\(03\)00258-0](https://doi.org/10.1016/S0022-1694(03)00258-0)
- Johnston, K., VerHoef, J., & Krivoruchko, K. (2001). *Using ArcGIS™ Geostatistical Analyst*. ESRI™.
- Kaser, G., Fountain, A. G., & Jansson, P. (2003). A Manual for monitoring the mass balance of mountain glaciers with particular attention to low latitude characteristics; Technical documents in hydrology. In *IHPVI Technical documents in Hydrology* (Vol. 2003, Issue 59). [papers2://publication/uuid/C48874AD-97E5-4178-BEF3-E35CD400C043](https://publication/uuid/C48874AD-97E5-4178-BEF3-E35CD400C043)
- Kejna, M., Arażny, A., & Sobota, I. (2013). Climatic change on King George Island in the years 1948-2011. *Polish Polar Research*, 34(2), 213–235. <https://doi.org/10.2478/popore-2013-0004>
- Lagger, C., Nime, M., Torre, L., Servetto, N., Tatián, M., & Sahade, R. (2018). Climate change, glacier retreat and a new ice-free island offer new insights on Antarctic benthic responses. *Ecography*. <https://doi.org/10.1111/ecog.03018>
- Lliboutry, L. (1974). Multivariate Statistical Analysis of Glacier Annual Balances. *Journal of Glaciology*, 13(69), 371–392. [https://doi.org/DOI: 10.3189/S0022143000023169](https://doi.org/DOI:10.3189/S0022143000023169)
- Marinsek, S., & Ermolin, E. (2015). 10 Year mass balance by glaciological and geodetic methods of Glaciar Bahía del Diablo, Vega Island, Antarctic Peninsula. *Annals of Glaciology*, 56(70), 141–146. <https://doi.org/10.3189/2015AoG70A958>
- Mitas, L., & Mitasova, H. (2005). Spatial Interpolation. In P. Longley, M. Goodchild, D. Maguire, & D. Rhind (Eds.), *Geographic Information Systems: Principles, Techniques, Management and Applications* (2nd Editio). [www.geos.ed.ac.uk/~gisteac/gis\\_book\\_abridged/](http://www.geos.ed.ac.uk/~gisteac/gis_book_abridged/)
- Navarro, F. J., Jonsell, U. Y., Corcuera, M. I., & Martín-Español, A. (2013). Decelerated mass loss of Hurd and Johnsons Glaciers, Livingston Island, Antarctic Peninsula.

- Journal of Glaciology*. <https://doi.org/10.3189/2013JoG12J144>
- Oliva, M., Navarro, F., Hrbá, F., Hernández, A., Nývlt, D., Pereira, P., Ruiz-fernández, J., & Trigo, R. (2016). *Science of the Total Environment Recent regional climate cooling on the Antarctic Peninsula and associated impacts on the cryosphere*. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.12.030>
- Oliver, M. A., & Webster, R. (1990). Kriging: a method of interpolation for geographical information systems. *International Journal of Geographical Information Systems*, 4(3), 313–332. <https://doi.org/10.1080/02693799008941549>
- Osmanoglu, B., Navarro, F. J., Hock, R., Braun, M., & Corcuera, M. I. (2014). Surface velocity and mass balance of Livingston Island ice cap, Antarctica. *Cryosphere*, 8(5), 1807–1823. <https://doi.org/10.5194/tc-8-1807-2014>
- Ostrem, G., & Stanley, A. . (1966). Glacier mass balance measurements, a manual for water on the surface of glacier ice. Geografiska field work. In *Glaciology Section* (p. 81).
- Paterson, W. S. B. (1981). *The physics of glaciers* (2nd Editio).
- PATERSON, W. S. B. (1994). 3 - *Mass Balance* (W. S. B. B. T.-T. P. of G. (Third E. PATERSON (ed.); pp. 26–52). Pergamon. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/B978-0-08-037944-9.50009-1>
- Pętllicki, M., Sziło, J., MacDonell, S., Vivero, S., & Bialik, R. J. (2017). Recent deceleration of the ice elevation change of Ecology Glacier (King George Island, Antarctica). *Remote Sensing*. <https://doi.org/10.3390/rs9060520>
- Rivera, A., Bown, F., Napoleoni, F., Muñoz, C., & Vuille, M. (2016). *Balance de masa glaciár* (E. CECs (ed.)).
- Rückamp, M., & Blindow, N. (2012). King George Island ice cap geometry updated with airborne GPR measurements. *Earth System Science Data*, 4(1), 23–30. <https://doi.org/10.5194/essd-4-23-2012>
- Rückamp, Martin, Blindow, N., Suckro, S., Braun, M., & Humbert, A. (2010). Dynamics of the ice cap on King George Island, antarctica: Field measurements and numerical simulations. *Annals of Glaciology*, 51(55), 80–90. <https://doi.org/10.3189/172756410791392817>
- Sibson, R. (1981). “*Interpolating Multivariate Data: Chapter 2: A Brief Description of Natural Neighbor Interpolation*” (John Wiley, pp. 21–36).
- Siegert, M., Atkinson, A., Banwell, A., Brandon, M., Convey, P., Davies, B., Downie, R., Edwards, T., Hubbard, B., Marshall, G., Rogelj, J., Rumble, J., Stroeve, J., & Vaughan, D. (2019). The Antarctic Peninsula under a 1.5°C global warming scenario. *Frontiers in Environmental Science*, 7(JUN), 1–7. <https://doi.org/10.3389/fenvs.2019.00102>

- Silva, A. B., Arigony-Neto, J., Braun, M. H., Espinoza, J. M. A., Costi, J., & Janá, R. (2020). Spatial and temporal analysis of changes in the glaciers of the Antarctic Peninsula. In *Global and Planetary Change* (Vol. 184, p. 103079). Elsevier B.V. <https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2019.103079>
- Simoës, C. L., Kellem, K., Rosa, D. A., & Fernanda, F. (2015). *Collins Glacier Retreat Process and Regional*. 105(October), 462–471.
- Simões, J. C., Bremer, U. F., Aquino, F. E., & Ferron, F. A. (1999). Morphology and variations of glacial drainage basins in the King George Island ice field, Antarctica. *Annals of Glaciology*, 29, 220–224. <https://doi.org/10.3189/172756499781821085>
- Smith, W. H. F., & Wessel, P. (1990). Gridding with continuous curvature splines in tension. *Geophysics*, 55(3), 293–305. <https://doi.org/10.1190/1.1442837>
- Sobota, I., Kejna, M., & Arażny, A. (2015). Short-term mass changes and retreat of the Ecology and Sphinx glacier system, King George Island, Antarctic Peninsula. *Antarctic Science*, 27(5), 500–510. <https://doi.org/10.1017/S0954102015000188>
- Turner, J., Lu, H., White, I., King, J. C., Phillips, T., Hosking, J. S., Bracegirdle, T. J., Marshall, G. J., Mulvaney, R., & Deb, P. (2016). Absence of 21st century warming on Antarctic Peninsula consistent with natural variability. *Nature*, 535(7612), 411–415. <https://doi.org/10.1038/nature18645>