

Artículo de investigación



Seguimiento del comportamiento de tamaño morfométrico de glaciares y la relación de clima regional en la latitud 8°-16° S, Perú

Monitoring of the behavior of morphometric size of glaciers and the relationship of regional climate in latitude 8°-16° S, Peru

Arnaldo Tacsí^{1,3*}, Thomas Condom², Alejo Cochachin¹, Néstor Montalvo³

*Autor de correspondencia

HISTORIA DEL ARTÍCULO

Recibido 15 Marzo 2022
Revisado 20 Julio 2022
Aceptado 26 Agosto 2022
Publicado 10 Septiembre 2022

PALABRAS CLAVE

Glaciares tropicales, Landsat, NDSI, DEM, retroceso glaciar

KEYWORDS

Tropical glaciers, Landsat, NDSI, DEM, glacier retreat

Resumen

En este artículo, se analiza a los glaciares tropicales de las latitudes de 8°-16° S y la relación del clima actual; utilizando las imágenes de satélite, DEM y estaciones climáticas. Se evaluaron los glaciares en dos tamaños ($< 1 \text{ km}^2$ y $\geq 1 \text{ km}^2$), rangos de latitud (cada 2°). Los contornos de glaciares actuales (2015-2019) y glaciares iniciales (1962-1970) reanalizado con imagen Landsat de 1975, se determinaron sus dimensiones (superficie, volumen y otros) y los cambios entre ellos. Los glaciares actuales presentan de superficie de 1058 km², volumen de 31930 Hm³, altura promedio de 634 m y orientación predominante hacia Suroeste. A la vez, los glaciares de mayor tamaño (435 km² y 390 km²) se ubican en las latitudes 8°-10° S y 12°-14° S y menor tamaño (98 km²) en latitud 14°-16° S. La desglaciación total presenta una pérdida de 54% en superficie y volumen; mientras, en glaciar $< 1 \text{ km}^2$ alcanza una pérdida superficial de 67% y volumen de 72%. El clima actual, insumo en la conservación de los glaciares, las mayores precipitaciones de época húmeda ocurren en latitud 8° S a 14° S y las temperaturas altas en época seca en latitud 14°-16° S y el impacto climático es la reducción acelerada en glaciares $< 1 \text{ km}^2$; siendo, más propenso las 64 unidades (6.8 km²) ubicadas debajo de altitud media de 4900 msnm. Esta continúa disminución de glaciares afectará a los usuarios de la comunidad andina y centro de producción agrícola caso CHAVIMOCHIC.

Abstract

In this article, the tropical glaciers of the latitudes of 8°-16° S and the relationship of the current climate are analyzed; using satellite images, DEMs and weather stations. Glaciers were evaluated in 2 sizes ($< 1 \text{ km}^2$ and $\geq 1 \text{ km}^2$), latitude ranges (every 2°). The contours of current glaciers (2015-2019) and initial glaciers (1962-1970) reanalyzed with Landsat image from 1975, their dimensions (surface, volume and others) and the changes between them were determined. Current glaciers have an area of 1058 km², a volume of 31930 Hm³, an average height of 634 m, and a predominant orientation towards the Southwest. At the same time, the largest glaciers (435 km² and 390 km²) are located at latitudes 8°-10° S and 12°-14° S and the smallest (98 km²) at latitude 14°-16° S. The total deglaciation presents a loss of 54% in surface and volume; while, in glaciers $< 1 \text{ km}^2$, it reaches a surface loss of 67% and a volume loss of 72%. The current climate, an input in the conservation of glaciers, the highest rainfall in the wet season occurs in latitude 8° S to 14° S and the highest temperatures in the dry season in latitude 14°-16° S and the climate impact is the reduction accelerated in glaciers $< 1 \text{ km}^2$; being more likely the 64 units (6.8 km²) located below the average altitude of 4900 meters above sea level. This continued shrinking of glaciers will affect the users of the Andean community and agricultural production center in the case of CHAVIMOCHIC.

- 1 Seguimiento del Comportamiento de Glaciares y Lagunas-Autoridad Nacional del Agua, Perú. Distrito de Independencia, Huaraz. Perú. atacsi@ana.gob.pe
- 2 Université Grenoble Alpes, IRD, CNRS, IGE, 38000 Grenoble, France.
- 3 Universidad Nacional Agraria La Molina, Av. Universidad s/n, La Molina, Lima 12, Perú.

1. INTRODUCCIÓN

Los glaciares tropicales situadas en América del Sur, el territorio peruano alberga el 75% de superficie (Rivera et al., 2017) que están en retroceso glaciario a escala global de tendencia generalizada, que ha reconocido el (IPCC) Panel Intergubernamental de cambio climático (IPCC, 2013) por las fluctuaciones ambientales son considerados indicadores excepcionales del cambio climático (IPCC, 2007; PNUMA, 2007; WGMS, 2008; Hastenrath, 1994) y su impacto es observable en la balance de masa (Rivera et al., 2017). Las estimaciones de IPCC indica la reducción significativa de los glaciares en la dimensiones de superficie y volumen (IPCC, 2013), generando incremento de pendientes, adelgazamiento de espesor de hielo y desaparición de glaciares (AEGL-ANA, 2021b). Además, la disminución del volumen de almacenamiento de las masas sólidas de hielo están produciendo cambios hidrológicos en un contexto de cambio climático (Schoolmeester et al., 2018). Esto, se refleja en la reducción continua de la contribución de fusión de glaciares a los valles andinos ubicadas en la cabecera de cuencas (Condom et al., 2012; Tacsí et al., 2021) y las comunidades próximas a los nevados, atinan con preocupación (Bury et al., 2011; Berrouet et al., 2020); debido, la altoandina peruana consta de estación húmeda (de octubre a abril) y estación seca (de mayo a septiembre), donde los glaciares está estrechamente relacionada con el desarrollo de las poblaciones andinas (particularmente en la estación seca) a través de usos agrícolas, municipales, así como la generación de energía hidroeléctrica (Bury et al., 2011; Carey et al., 2013; Drenkhan et al., 2015). Además, en Perú, las últimas décadas del siglo XX estuvieron marcadas por un crecimiento demográfico, un aumento de la demanda de agua y una reducción de las reservas hidrológicas (Murillo et al., 2018). La combinación de estos tres factores puede provocar graves conflictos entre los diferentes usuarios del agua (Silverio & Jaquet, 2012). El registro del comportamiento de los glaciares, en las últimas décadas, muestra que el proceso de desglaciación se ha acelerado, en consecuencia, en un momento los glaciares han aportado agua incrementando el caudal de los ríos, pero a medida que la superficie glaciario ha venido reduciéndose y su frente situándose cada vez en niveles más altos en las montañas donde la

temperatura aún es baja, el aporte de agua hacia las cuencas ha disminuido, siendo más notorio en los meses de temporada seca (Baraer et al., 2012). Este comportamiento de glaciares en el tiempo ha generado cambios significativa de las dimensiones morfométricas (AEGL-ANA, 2021b); por la tendencia de calentamiento global desde principio de la década de 1980 de 0.13°C/década (Schauwecker et al., 2014) causando una dramática pérdida de hielo glacial en todo el rango de altitud (Rabatel et al., 2013), alterando la dinámica glaciario, generando la formación y evolución de lagunas en contacto al glaciario. Siendo, es muy importante disponer de información fiable y actualizada sobre la extensión y la masa de los glaciares (Silverio & Jaquet, 2014), motivando se realicen en periodos cortos una continua estimación de la cobertura glaciario (AEGL-ANA, 2021b). El objetivo del estudio es representar de la latitud 8° S hasta 16° S el comportamiento de la distribución del tamaño de la morfometría de los glaciares actuales y los cambios producidos al periodo inicial (referencia); también, interrelacionar el clima regional como afecta al glaciario actual en su conservación. Para lo cual fue necesario: 1) identificar los glaciares en las imágenes de satélite. 2) estimar las dimensiones del glaciario actual. 3) reanálisis y validación de la información de glaciario inicial 4) determinar el clima representativo en el glaciario para los rangos de latitud.

2. METODOLOGÍA

2.1 Área de estudio

Las cordilleras nevadas se localizan en tres zonas del territorio peruano: Andes del Norte, Centrales y Sur y las cadenas montañosas de las cordilleras (Occidental, Central y Oriental) recorren el territorio peruano de sur a norte (Hidrandina, 1989). En estas cadenas de cordillera son el origen de los cauces de los ríos que drenan a las vertientes del Pacífico, Atlántico y Titicaca y en ciertas zonas donde alcanzan grandes altitudes, el batolito de los Andes y el clima preponderantemente frío, han permitido la presencia de formaciones de glaciares agrupadas en 18 cordilleras nevadas a nivel del País (AEGL-ANA, 2021b) y se extiende desde los 8° 23' S hasta los ~15° 49' S en Perú, continuando hacia el sur del país de Bolivia (figura 1).

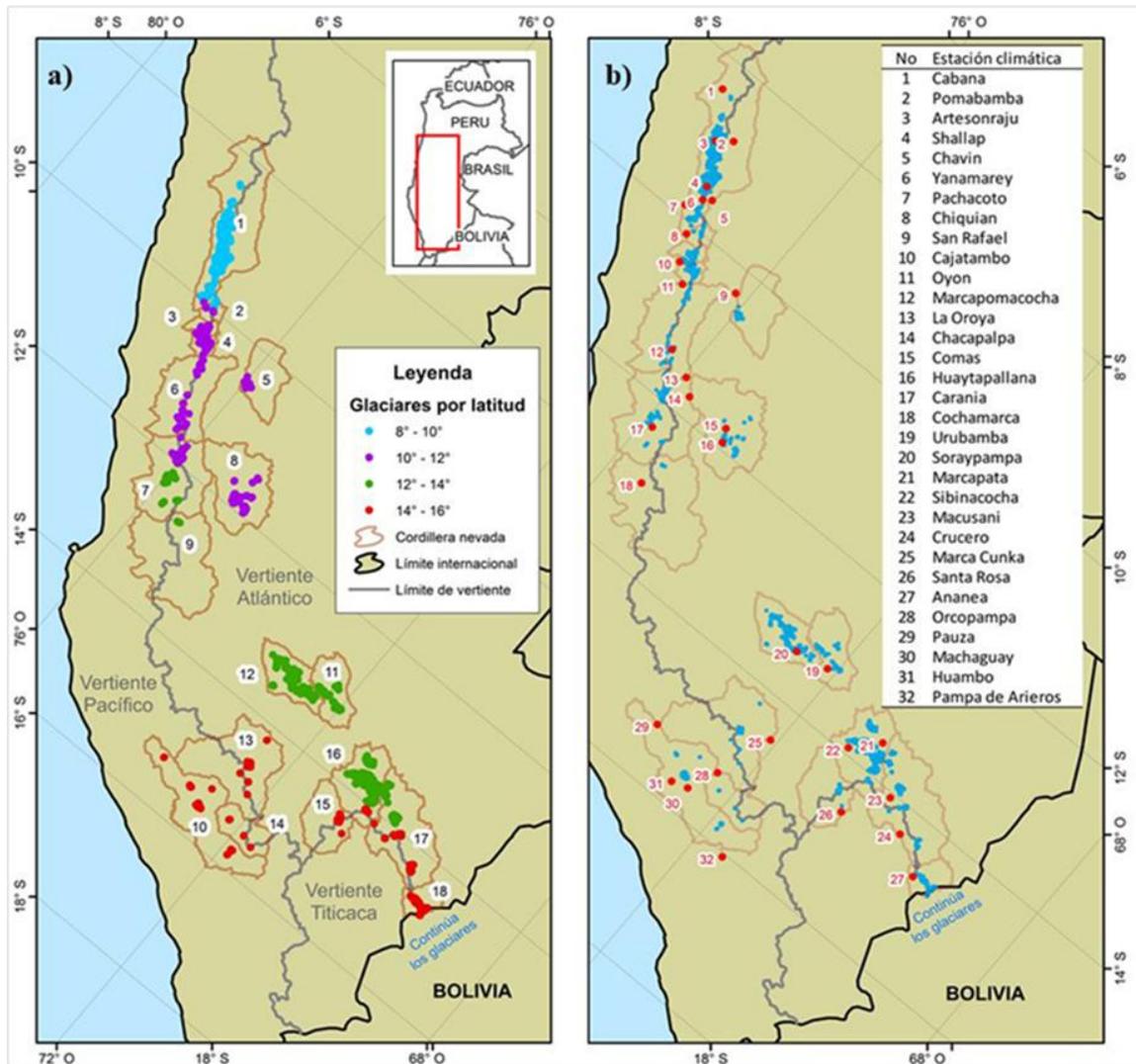


Figura 1. a) Ubicación de glaciares en cordilleras nevadas del Perú según latitud. Los círculos con números indican las cordilleras nevadas: 1-Blanca, 2-Huallanca, 3-Huayhuash, 4-Raura, 5-Huagoruncho, 6-La Viuda, 7-Central, 8-Huaytapallana, 9-Chonta, 10-Ampato, 11-Urubamba, 12-Vilcabamba, 13-Huanzo, 14-Chila, 15-La Raya, 16-Vilcanota, 17-Carabaya, 18-Apolobamba. b) Ubicación de las estaciones climáticas de datos de temperatura y precipitación.

2.2 Información disponible

Glaciares actuales

Se emplearon las imágenes Landsat 8 y Sentinel-2A/2B desde el USGS (United States Geological Survey), imágenes de Spot 6/7 (CONIDA) y el DEM ALOS v2 (2014) del sensor PALSAR-ALOS. Las imágenes satelitales de la zona de estudio han sido seleccionadas teniendo en cuenta un porcentaje mínimo de nubosidad (< 10%) y su fecha de captura en época seca que son los meses de mayo-octubre. La información utilizada es del estudio de reserva hídrica de glaciares del Perú (AEGL-ANA, 2021b) que cuantifican los glaciares en periodos de

aproximadamente en cinco años, debido los cambios de tamaño son apreciable a la escala de 1/75000 (AEGL-ANA, 2018; Schaeffli et al., 2005; Taci et al., 2021) y por los diferentes años de imágenes de satélite se ha denominado glaciares actual (2015-2019). A la vez, esta información fue adaptada y mejorada para el presente artículo. Las imágenes de satélite fueron evaluadas el posicionamiento con la cartografía del Instituto Geográfico Nacional (IGN). Las imágenes sentinel-2A/2B de nivel L1C, Landsat 8 de nivel L1T presentan correcciones geométricas a una proyección cartográfica, referenciada a WGS84. Mientras, la imagen Spot 6/7 se utilizó el método polinomial (Chuvieco, 2000), tomando como

referencia las curvas de nivel de la cartografía nacional del IGN, a escala 1/100000, donde se distribuyen los puntos de control terrestre en coordenadas (x, y), considerando puntos de

referencia en zonas fácilmente identificables y que no sean sujetas a dinamismo temporal, sin considerar las coberturas glaciares por su variabilidad (McFadden et al., 2011).

Tabla 1. Imágenes de satélite adquiridas en estación seca y nubosidades menores a 10%.

Fecha	Sensor	Resolución espacial (m)	Rango Latitud sur	Cordillera	Vertiente
24/06/2019	Landsat 8	30	8.39° - 9.16°	Blanca	Pacífico, Atlántico
03/07/2019	Sentinel-2A	10	9.13°-10.02°	Blanca	Pacífico, Atlántico
19/08/2015	Spot 6	6	9.87°-10.06°	Huallanca	Pacífico, Atlántico
06/08/2015	Spot 7	6	10.21°-10.42°	Huayhuash	Pacífico, Atlántico
06/08/2015	Spot 7	6	10.36°-10.53°	Raura	Pacífico, Atlántico
07/0/2015	Spot 6	6	10.59°-10.86°	La Viuda	Pacífico, Atlántico
16/11/2016	Spot 7	6	11.16°-11.64°	La Viuda	Pacífico, Atlántico
19/05/2016	Spot 6	6	11.69°-12.58°	Central	Pacífico, Atlántico
15/07/2016	Sentinel-2A	10	10.42°-10.56°	Huagoruncho	Atlántico
12/11/2016	Sentinel-2A	10	12.62°-12.64°	Chonta	Pacífico, Atlántico
04/07/2016	Spot 7	6	11.43°-11.96°	Huaytapallana	Atlántico
22/09/2017	Sentinel-2A	10	15.23°-15.58°	Ampato	Atlántico
02/10/2017	Sentinel-2A	10	15.71°-15.82°	Ampato	Atlántico
25/04/2016	Spot 6	6	14.21°-14.98°	Huanzo	Pacífico, Atlántico
02/10/2017	Sentinel-2A	10	15.40°-15.52°	Chila	Atlántico
04/06/2016	Spot 6	6	14.34°-14.55°	La Raya	Atlántico, Titicaca
24/07/2016	Spot 6	6	13.16°-13.56°	Vilcabamba	Atlántico
25/06/2016	Spot 7	6	13.26°-13.41°	Vilcabamba	Atlántico
16/06/2016	Spot 6	6	13.14°-13.25°	Urubamba	Atlántico
24/07/2017	Sentinel-2A	10	12.95°-13.01°	Urubamba	Atlántico
18/07/2017	Spot 7	6	13.57°-14.51°	Carabaya	Atlántico, Titicaca
16/06/2017	Spot 6	6	14.19°-14.34°	Carabaya	Atlántico, Titicaca
11/07/2017	Sentinel-2A	10	14.57°-14.73°	Apolobamba	Atlántico, Titicaca
24/07/2017	Sentinel-2A	10	12.45°-13.65°	Vilcanota	Atlántico, Titicaca
19/07/2017	Sentinel-2B	10	13.65°-14.09°	Vilcanota	Atlántico, Titicaca

Glaciares iniciales

Se utilizaron la información de glaciares registrada de las fotografías aéreas de los años de 1955, 1962 y 1970 (Hidrandina, 1989) plasmada en mapa físico que fueron digitalizadas (UGRH-ANA, 2014a). Los datos alfanuméricos de cada unidad glaciar se validaron como los valores de superficie con los cálculos automáticos en ArcMap e información vectorial de glaciares con imágenes Landsat de 1975, detectando en las cordilleras nevadas (Vilcabamba, Urubamba, Vilcanota, Carabaya, Apolobamba y Huaytapallana) estaban incompleto; añadiendo las nuevas superficies de glaciares a dichas cordilleras. Entonces, las registradas en cuatro fechas (1955,

1962, 1970 y 1975); se ha denominado glaciar inicial por tener dimensiones similares debido se encontraban en un relativo equilibrio con el clima en los años '50 y '60 hasta finales de la década de los '70 (Rabatel et al., 2006; Rivera et al., 2017).

Datos climáticos

Para la evaluación de comportamiento climáticos en los glaciares, se utilizan 32 estaciones de clima ubicadas cercanos a los nevados, con registro de datos diarios de temperatura y precipitación entre los años 2015 a 2019, algunas con data incompleta. Las estaciones están distribuidas en latitud de 8°-10°S (7 estaciones), 10°-12°S (9), 12°-14°S (6) y 14°-16°S (10).

Tabla 2. Información de promedio diario de temperatura y precipitación

N°	Estación climática	Altitud (msnm)	Época seca		Época húmeda		N°. años	Institución
			P (mm)	T (°C)	P (mm)	T (°C)		
1	Cabana	3364	0.87	11.44	4.30	11.1	3	Senamhi
2	Pomabamba	2985	1.38	13.45	5.67	14.48	3	Senamhi
3	Artesonraju	4824	1.52	1.98	5.2	2.28	5	ANA
4	Shallap	4759	2.69	2.55	4.55	2.58	5	ANA
5	Chavin	3140	0.81	12.66	2.86	12.51	2	ANA
6	Yanamarey	4698	1.94	2.6	7.01	2.69	5	ANA
7	Pachacoto	3733	0.95	8.11	4.98	9.00	3	ANA
8	Chiquian	3414	0.33	13.66	3.28	13.21	3	Senamhi
9	San Rafael	2699	1.00	15.58	3.88	16.48	3	Senamhi
10	Cajatambo	3432	0.35	11.82	2.62	11.51	3	Senamhi
11	Oyon	3652	0.33	10.84	2.77	10.98	4	Senamhi
12	Marcapomacocha	4443	1.26	3.42	5.21	4.39	3	Senamhi
13	La Oroya	3842	0.95	7.87	3.18	9.72	3	Senamhi
14	Chacapalpa	3752	1.04	7.77	4.21	8.25	3	Senamhi
15	Comas	3603	1.64	8.74	3.68	9.24	3	Senamhi
16	Huaytapallana	4684	1.54	2.64	5.12	3.35	3	Senamhi
17	Carania	3840	0.38	8.24	2.90	8.34	3	Senamhi
18	Cochamarca	3886	1.67	7.51	3.08	7.22	3	Senamhi
19	Urubamba	2850	0.49	14.52	2.59	16.15	3	Senamhi
20	Soraypampa	3854	1.34	6.82	5.39	8.07	4	Senamhi
21	Marcapata	2710	1.56	12.09	4.86	13.00	3	Senamhi
22	Sibinacocha	4880	1.06	1.27	3.67	2.73	3	Senamhi
23	Macusani	4363	0.90	3.59	3.47	6.07	3	Senamhi
24	Crucero	4128	0.56	4.84	2.53	8.01	3	Senamhi
25	Marca Cunka	3796	0.76	8.17	4.12	10.03	3	Senamhi
26	Santa Rosa	3957	0.40	5.82	3.68	9.75	4	Senamhi
27	Ananea	4660	1.06	4.05	3.30	5.20	3	Senamhi
28	Orcopampa	3812	0.16	7.90	2.98	9.69	3	Senamhi
29	Pauza	2489	0.12	16.15	1.65	16.02	3	Senamhi
30	Machaguay	3093	0.11	11.95	2.01	12.40	3	Senamhi
31	Huambo	3312	0.00	11.42	1.53	12.53	3	Senamhi
32	Pampa de Arieros	3701	0.03	7.16	1.73	8.64	3	Senamhi

T = Temperatura,

P= Precipitación

2.3 Procesos de estimación de dimensiones del glaciar

Delimitación del contorno de glaciares

La identificación de glaciares está basada del método de Ratio, utilizado en la delimitación de glaciares en varios estudios alpinos (Paul & Ka, 2004; Alarcon et al., 2015) y el Índice Normalizado Diferencial de la Nieve (NDSI, por sus siglas en inglés) se han

aplicado con éxito a la cordillera Blanca (Silverio & Jaquet, 2005; Racoviteanu et al., 2008) y otras áreas, como el Himalaya oriental (A. Racoviteanu & Williams, 2012). Se puede encontrar una revisión completa de los métodos para analizar las características de los glaciares a partir de datos de teledetección óptica en Racoviteanu et al., (2008b). En este estudio, se utilizó el método de Ratio y NDSI para identificar áreas limpias de hielo.

$$Ratio = \frac{\text{Banda NIR}}{\text{Banda SWIR}}, \quad NDSI = \frac{\text{Banda Verde} - \text{Banda SWIR}}{\text{Banda Verde} + \text{Banda SWIR}} \quad (1)$$

Una vez calculado el NDSI, se eligió un umbral para discriminar el hielo limpio del área circundante. En estudios anteriores se encontró que los umbrales de NDSI superiores a 0.4-0.7 eran óptimos (Racoviteanu, et al., 2008), aunque otros estudios utilizaron métodos de umbral automático para determinar los valores óptimos (Yin et al., 2013). En las imágenes de Sentinel-2A y Landsat 8, se aplicó el método de Ratio y NDSI, con un umbral mayor a 2.5 y 0.4-0.6, respectivamente. Las diferencias evidentes de las huellas espectrales de los sectores del espectro electromagnético permiten delimitar la nieve. Mientras, en las imágenes de satélite Spot 6/7 sin banda SWIR, se aplicó la clasificación supervisada, que permite obtener los límites de los glaciares de manera semiautomática (Sidjak & Wheate, 2010) o de manera manual (Bolch, Menounos, & Wheate, 2010). Seguidamente, se removieron los bordes de la laguna en contacto con el glaciar clasificados erróneamente (Hanshaw & Bookhagen, 2013). En tanto, los glaciares que están cubiertos por escombros (detritos), lo que dificulta la identificación del glaciar cuando se usa el mismo umbral NDSI; se evaluó de manera visual en imágenes de alta resolución SAS Planet y Google Earth 3D que facilitan la delimitación manual y con análisis multitemporal de distintas imágenes se discriminó a la nieve estacional (Guo et al., 2015; Bomshoms et al., 2018) que sobreestiman la cobertura glaciar. También, en las 16 cordilleras, se realizaron la validación en las partes accesibles de glaciares limpios y glaciar cubierto con datos de GPS (AEGL-ANA, 2021b). Se consideró de tamaño mínimo de identificación de glaciares $\geq 5000 \text{ m}^2$.

Determinación de las dimensiones del glaciar

Superficie

Las masas de glaciares tienen diversos tamaños y están situadas en una o varias cuencas. Por esto, se han individualizado en unidades, definido respecto a la cuenca de drenaje (Müller et al., 1977) que consta de glaciar limpio y cubierto (figura 2). Los contornos actuales de cada glaciar son situados dentro del contorno de glaciar inicial establecida por Hidrandina (1989), generando unidad glaciar actual (compacta y fragmentada). Luego, el contorno del glaciar se estima la superficie de manera automática en la plataforma de ArcMap, que representa una proyección horizontal, debido el área real implicaría incluir el efecto de la pendiente (AEGL-ANA, 2020). Con fines de evaluar el comportamiento del tamaño

de glaciar, en este estudio se utilizan dos rangos de superficie de: menor 1 km^2 (0.005 a 0.999 km^2) y mayor o igual de 1 km^2 (1 km^2 a 14.00 km^2).

Longitud horizontal y vertical

La longitud horizontal del glaciar se representa largo máximo y ancho máximo y es obtenido de la digitalización manual sobre el relieve topográfico del glaciar generado del DEM. El largo máximo es la línea que sigue al drenaje glaciar desde la cumbre más alta hasta punto más bajo y el ancho máximo es la línea paralela a la curva de nivel, considerando los extremos más ancho del glaciar (Müller et al., 1977; AEGL-ANA, 2018). Las consideraciones del trazo de las líneas (largo y ancho) son sobre la masa glaciar compacta, sin cruzar zona de afloraciones de roca y en glaciares con fragmento, se elige de mayor tamaño. Siendo, los afloramientos de roca y fragmentación en la unidad glaciar reduce drásticamente las dimensiones máximas y cambiando el eje de la línea registrada en años anteriores. En tanto, la longitud vertical se estima como la distancia entre la altitud máxima y la altitud mínima. Los valores de altitud (máxima, mínima y media) son extraídos del DEM contenido en el glaciar.

Pendiente y orientación

La pendiente en las altas montañas influye en la dinámica glaciar; casos de la formación de grietas, grado de desprendimientos de bloques de hielo, acumulación de nieve en cuerpo glaciar y la adherencia del hielo en el lecho de las rocas. La pendiente se estima en porcentaje (%), definida de $< 4\%$ (casi plana), $4-8\%$ (moderadamente inclinada), $8-15\%$ (fuertemente inclinada), $15-25\%$ (moderadamente empinada), $25-50\%$ (empinada), $50-75\%$ (muy empinada) y $\geq 75\%$ (extremadamente empinada) (Minagri, 2009). Los glaciares están depositados en diferentes lados de las montañas y el sentido descendente desde el punto más alto representa la orientación, definido en ocho direcciones cardinales (Norte, Noreste, Este, Sureste, Sur, Suroeste, Oeste, Noroeste) y con fines de evaluar un comportamiento superficial representativo se calcula como pendiente media y orientación predominante (AEGL-ANA, 2018).

Volúmenes

Para la estimación de volumen varios autores proponen ecuaciones empíricas. Se utilizó el modelo propuesta por Haeberli & Schweizer (1988), que

considera parámetros físicos de los glaciares; que fueron aplicados en los glaciares alpinos por Linsbauer et al (2009; 2012), en glaciares de Himalaya-Karakoram (Frey et al., 2014a) y en la cordillera del Perú (Muñoz, 2017; AEGL-ANA, 2021). El proceso de cálculo fue sistematizada en la plataforma ArcMap por Linsbauer et al., (2012) con el nombre de GlabTop (*Glacier bed topography*) que requiere de datos de entrada: contorno del glaciar,

modelo de elevación digital y las líneas de drenaje. La herramienta calcula el espesor de hielo (hf) (ecuación 2) y multiplicado con la superficie del glaciar se obtiene el volumen (Frey et al., 2014a; Linsbauer et al., 2012; Paul & Linsbauer, 2012). El DEM utilizado para glaciares actuales es DEM ALOS de 2014 y glaciares iniciales es DEM generado de las curvas de nivel de la carta nacional de 1975 del IGN.

$$hf = \frac{\tau}{f \cdot \rho \cdot g \cdot \sin(\alpha)} \quad (2)$$

donde

τ es esfuerzo cortante basal a lo largo del flujo central

f es factor de forma (0.8)

ρ es densidad del hielo (900 kg/m³)

g es gravedad de aceleración (9.81 m/s²)

α es pendiente media de la superficie glaciar

τ es estimado de análisis empírico según rango de elevación (ΔH) (Haeberli, 1995; Linsbauer *et al.*, 2012)

$\tau = 0.005 + 1.598 \cdot \Delta H - 0.435 \cdot \Delta H$, $\Delta H < 1600$ m

$\tau = 1500$ kbar, $\Delta H > 1600$ m

2.4 Estimación de evolución del glaciar

En las últimas décadas de observación, el retroceso glaciar en los Andes tropicales se ha intensificado desde fines de 1970 (Rabatel et al., 2013; Bernex & Lima, 2010). La estimación de la evolución (pérdida) es la comparación de glaciares (inicial y actual). En la Figura 2a, se muestra la unidad glaciar y los efectos de los cambios por el derretimiento continuo de varios años generan fragmentación de 2 o más divisiones de tamaño menor, acortando el tiempo de desaparición. La vista perspectiva del glaciar de la Figura 2b, representa un esquema de la longitud horizontal y longitud vertical definido a la línea de drenaje de mayor extensión proyectada al eje cartesiano. Mientras, el flujo de agua desde el punto de drenaje del glaciar inicial y actual, representa la distancia de pérdida horizontal y pérdida vertical (diferencia de altitud). En este espacio de retroceso glaciar se producen la formación de nuevas lagunas (UGRH-ANA, 2014b) y cambios de morfometría en el paso del tiempo se han asociado con el adelgazamiento de espesor del glaciar (Paul & Ka, 2004; Kulkarni et al., 2007; Tacsí et al., 2021).

2.5 Climatología regional

Los glaciares compuestos de hielo y nieve están en desequilibrio con el actual sistema climático (Rivera et al., 2017) y glaciares dispuestos a lo largo de las latitudes 8°-16° S se presentan diferentes intensidades de reducción, y para el conocimiento del proceso de los cambios de clima desde 1962 a 2019, no existe información de serie de datos continuos. Por tal razón se optó en evaluar para condiciones actuales utilizando 32 estaciones climáticas cercanas a los glaciares con registros continuos de datos diarios de temperatura y precipitación (Figura 1 y Tabla 2). Con estos registros de aproximadamente de 5 años se intentará determinar las interrelaciones entre clima y glaciares y sus repercusiones en los recursos hídricos que generan (UNEP, 2007).

Para evaluar el comportamiento de distribución espacial en la influencia de los glaciares para cada rango de latitud, se utiliza el valor promedio de temperatura y precipitación. En caso de temperatura se considera a la altitud 5000 msnm (ecuación 3).

$$T_{5000} = T_i + \Delta T * \Delta H \quad (3)$$

$$P = P_i \quad (4)$$

donde:

- T_{5000} es la temperatura a altitud 5000 msnm
- ΔT es el gradiente de temperatura por cada rango de latitud
- T_i es la temperatura promedio
- P_i es la precipitación promedio
- ΔH es la altura (5000- $H_{promedio}$)
- $H_{promedio}$ es la altura promedio de estaciones climáticas

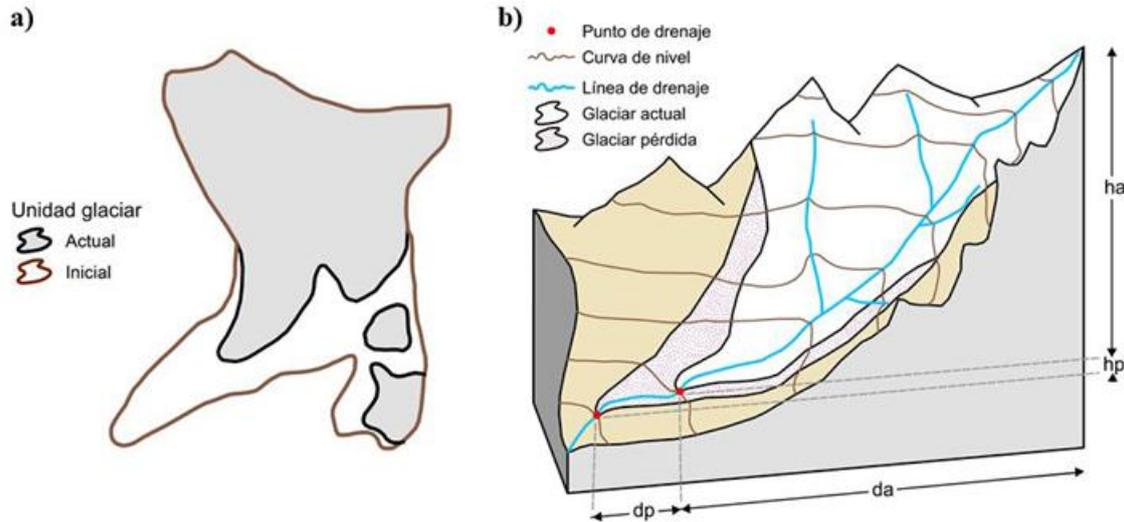


Figura 2. a) Comportamiento en el tiempo de la unidad glaciaria (inicial y actual). b) Vista esquemática en perspectiva ilustra las dimensiones del glaciar actual: distancia vertical (h_a) y distancia horizontal (d_a); pérdida de glaciar: distancia vertical (h_p) y distancia horizontal (d_p).

3. RESULTADOS

3.1 Distribución de morfometría de glaciares

Los glaciares actuales ubicados entre la latitud 8° S a 16° S presentan 2005 unidades, superficie total de 1058 km^2 y volumen de 31930 Hm^3 (Tabla 3). Los glaciares varían desde los 0.005 km^2 a 14.06 km^2 de

superficie, el tamaño promedio general es de 0.52 km^2 (μ) con una desviación estándar de 1.06 km^2 (s^2). Distribuido por cantidad existe 912 unidades en el rango de 8° - 12° S y 1093 unidades en latitud de 12° - 16° S y las mayores superficie y volumen de glaciares se sitúan en latitud 8° - 10° S y latitud 12° - 14° S que representa casi el 80% del total.

Tabla 3. Distribución de glaciares por rango de latitud

Variables	Latitud sur				Total
	$8^\circ - 10^\circ$	$10^\circ - 12^\circ$	$12^\circ - 14^\circ$	$14^\circ - 16^\circ$	
Número de glaciares	510	402	882	211	2005
Superficie (km^2)	435	135	390	98	1058
Volumen (Hm^3)	13536	2837	12411	3146	31930

En la figura 3a, se visualiza la distribución de número de glaciares en las 18 cordilleras por latitud; existiendo cinco cordilleras ocupando dos rangos de latitud (Blanca, Huallanca, Central, Vilcanota y

Carabaya). En el rango de latitud de 8° - 10° S ocupa la cordillera Blanca (96%) y Huallanca (4%); latitud 10° - 12° S ocupan Huaytapallana (23%), Huayhuash (19%), Raura (17%), Central (18%), La Viuda (11%),

Huagoruncho (9%) y Huallanca (12%); latitud 12°-14° S ocupan Vilcanota (37%), Vilcabamba (35%), Urubamba (10%), Central (7%) y Carabaya (11%); y latitud 14-16° S ocupan Apolobamba (32%), Ampato (18%), Carabaya (17%), La Raya (11%), Huanzo (10%), Vilcanota (9%) y Chila (3%). Al distribuir los glaciares según cantidad en los dos tipos de tamaño (Figura 3b); se registran 1726 unidades (86%) en glaciares < 1 km²; de las cuales, 780 glaciares se encuentran en el rango de 12°-14° S. Mientras, los glaciares ≥ 1 km², la mayor cantidad se encuentra en

la latitud de 8-10° S y 12°-14° S. La figura 3c y 3d, se visualiza en la distribución de almacenamiento por tamaño; los glaciares ≥ 1 km² presenta una superficie de 696 km² (66% del total) y 26206 Hm³ (82%); de la cual, la latitud 8°-12° S se encuentra los mayores valores. La característica de glaciares grandes es presentar espesores de hielo alto con pendientes relativamente escarpados (Frey et al., 2014c) y el conocimiento de volumen y espesor es útil para la hidrología glacial, modelación climática y evaluación de peligro de los glaciares (Tacci et al., 2021).

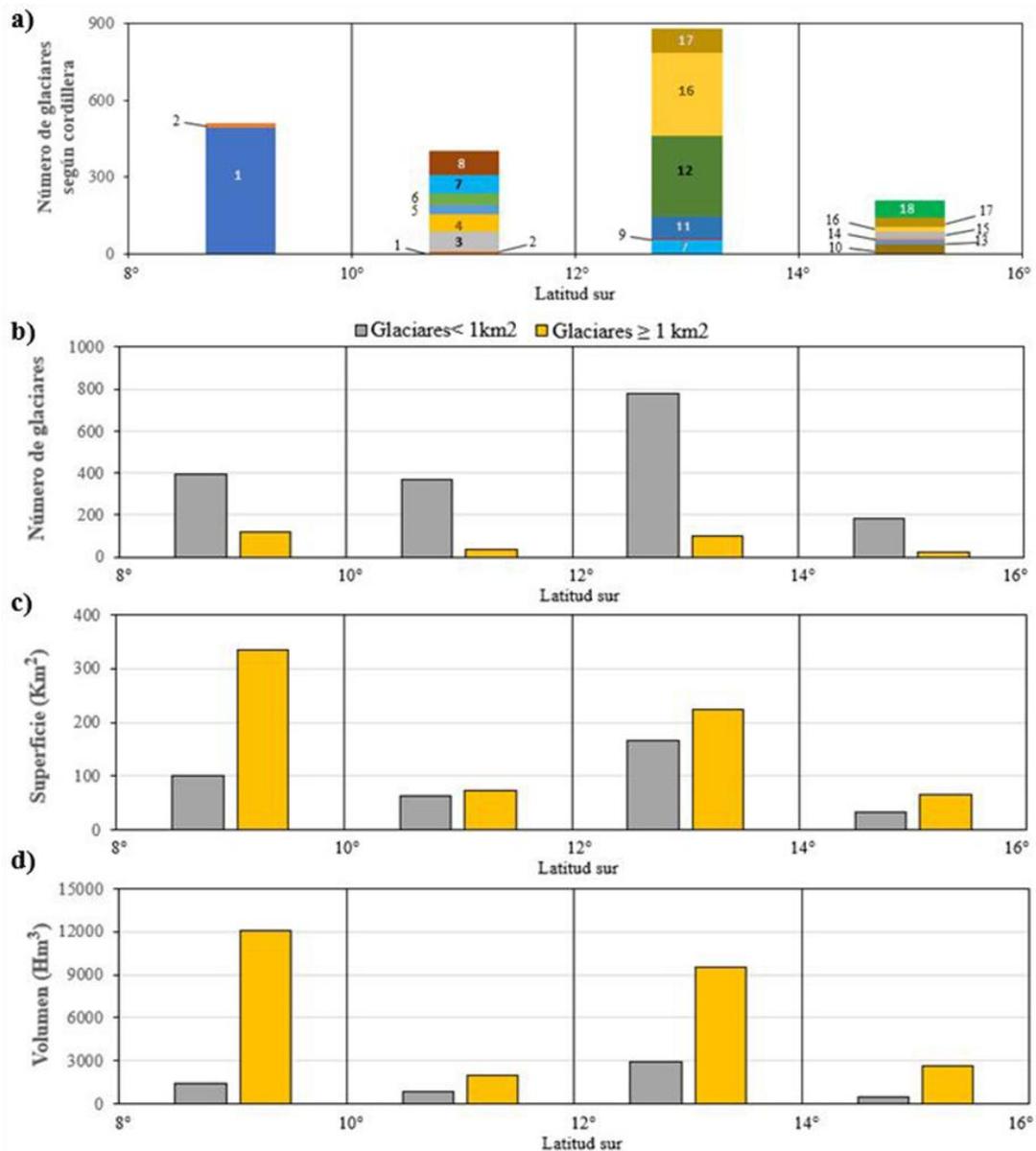


Figura 3. Distribución de glaciares según rango de latitud. a) Número de glaciares por cordillera 1 -Blanca, 2-Huallanca, 3-Huayhuash, 4-Raura, 5-Huagoruncho, 6-La Viuda, 7-Central, 8-Huaytapallana, 9-Chonta, 10-Ampato, 11-Urubamba, 12-Vilcabamba, 13-Huanzo, 14-Chila, 15-La Raya, 16-Vilcanota, 17-Carabaya, 18-Apolobamba. Distribución de glaciares según tamaño: b) Número de glaciares. c) Superficie de glaciares. d) Volumen de glaciares.

Del diagrama de cajas (figura 4a, 4b y 4c), un glaciar de tamaño promedio ($\geq 1 \text{ km}^2$) presenta casi cuatro veces la longitud horizontal (largo máximo, ancho máximo) y tres veces de longitud vertical (altura) a glaciar $< 1 \text{ km}^2$. Además, en glaciares $\geq 1 \text{ km}^2$ la tendencia de las tres longitudes van decreciendo (desde 8° S a 16° S) y la dimensión de ancho es mayor a largo en 40% del total de unidad glaciar. La figura 4d, 4e y 4f, muestra el comportamiento de las altitudes de los glaciares. Al comparar la altitud

mínima en los cuatro rangos de latitud, los glaciares $< 1 \text{ km}^2$ presentan valores más altos que glaciares $\geq 1 \text{ km}^2$; mientras este comportamiento es inverso en altitud media y altitud máxima. En tanto, los valores de altitud (mínima y media) son mayores en la latitud $8^\circ\text{-}10^\circ \text{ S}$ que latitud $14^\circ\text{-}16^\circ \text{ S}$ en ambos tamaños de glaciares. En caso de altitud máxima, los glaciares $\geq 1 \text{ km}^2$, tienen valores promedios de 5913, 5720, 5744 y 6005 msnm (de 8° S a 16° S).

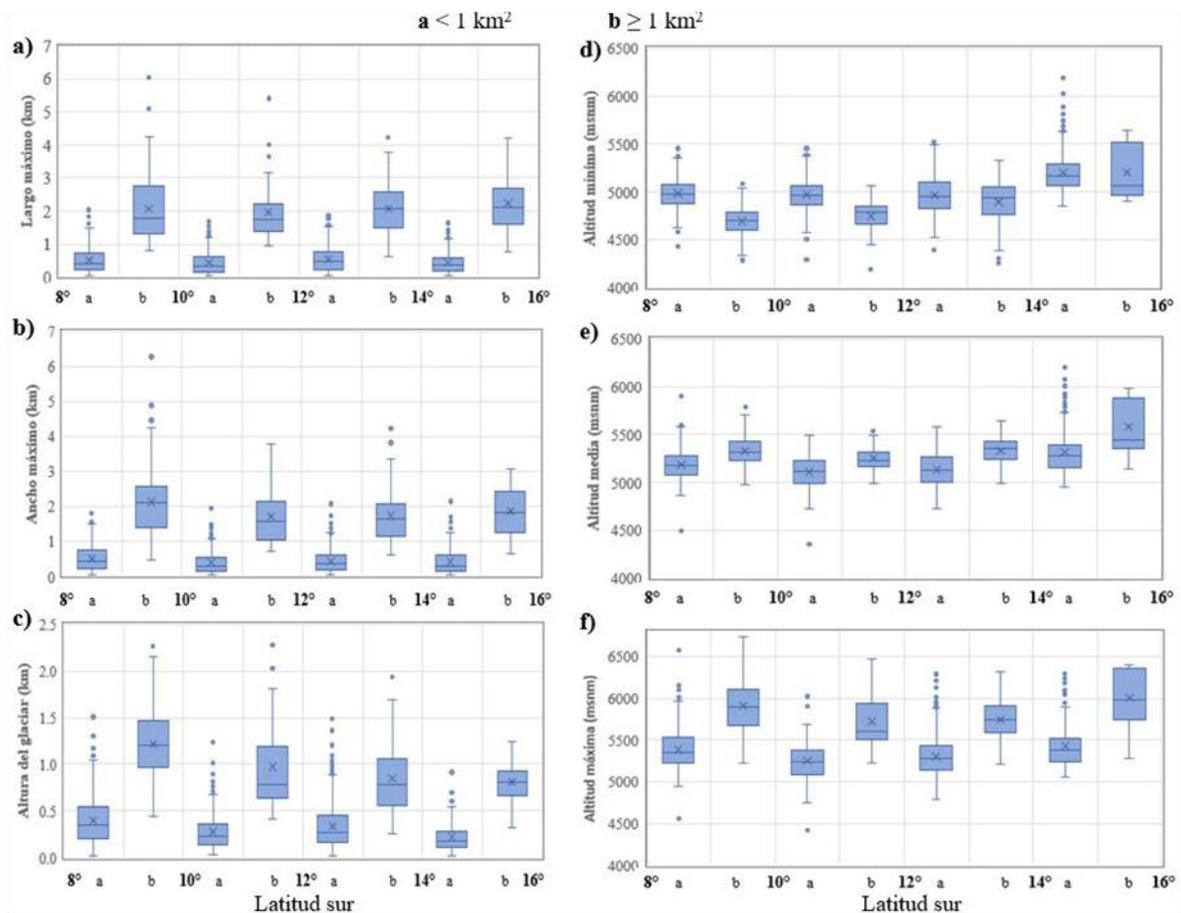


Figura 4. Diagramas de cajas que relacionan dimensiones de glaciares según latitud. a) Largo máximo. b) Ancho máximo. c) Altura. d) Altitud mínima. e) Altitud media. f) Altitud máxima.

En los rasgos de pendiente media del glaciar (figura 5a), predomina moderadamente empinada (25-50%) que ocupa 497 km^2 (47% del total) y muy empinada (50-75%) de 455 km^2 (43%); pero, en los glaciares $\geq 1 \text{ km}^2$ es notorio la mayor superficie de los dos tipos de pendiente en la latitud $8^\circ\text{-}10^\circ \text{ S}$. También, 227 unidades (65 km^2) tiene una clara tendencia de ubicarse en pendiente extremadamente empinada ($> 75\%$); concentrándose en glaciares $< 1 \text{ km}^2$ de 35

km^2 de superficie (195 unidades) en las latitudes $8^\circ\text{-}10^\circ \text{ S}$ y $12^\circ\text{-}14^\circ \text{ S}$; y seis unidades (0.2 km^2) en pendiente fuertemente inclinada (8-15%) de glaciares $< 1 \text{ km}^2$. A la vez, los 1176 glaciares (615 km^2) al situarse en pendientes superiores a 47° (25°) de inclinación están expuestos a inestabilidad de deslizamiento de base o fondo y a la formaciones de tipo acantilado (Huggel et al., 2004; Faillettaz et al., 2015; Pralong et al., 2006; GAPHAZ, 2017).

Respecto a la orientación predominante, los glaciares están expuestos hacia el Suroeste (205 km²) y al Sur (186 km²). Al distribuirse por tamaño, los glaciares < 1 km², la mayoría se orientan al Sur y Suroeste en latitud 12°-14° S y glaciares ≥ 1 km² es Suroeste,

Noreste y Oeste en latitud 8°-10° S (figura 5b). Por tanto, las laderas de los glaciares que coinciden con esta orientación reciben más sombra durante el día en época de lluvias, favoreciendo una reducción del proceso de ablación (Racoviteanu et al., 2008).

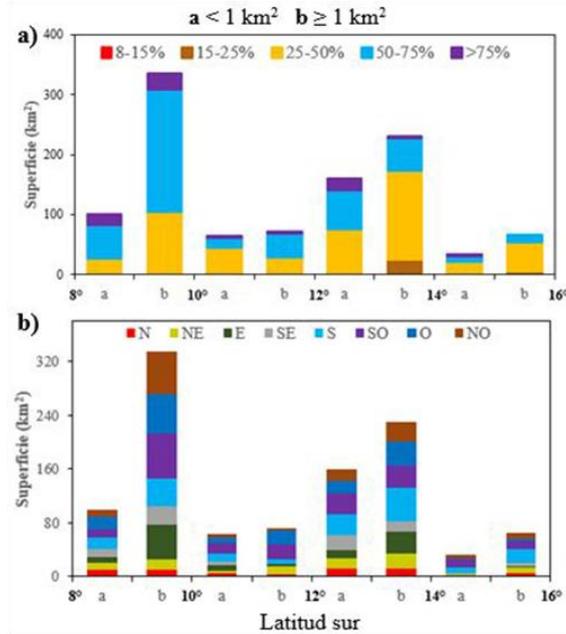


Figura 5. a) Pendiente media de glaciares. b) Orientación predominante

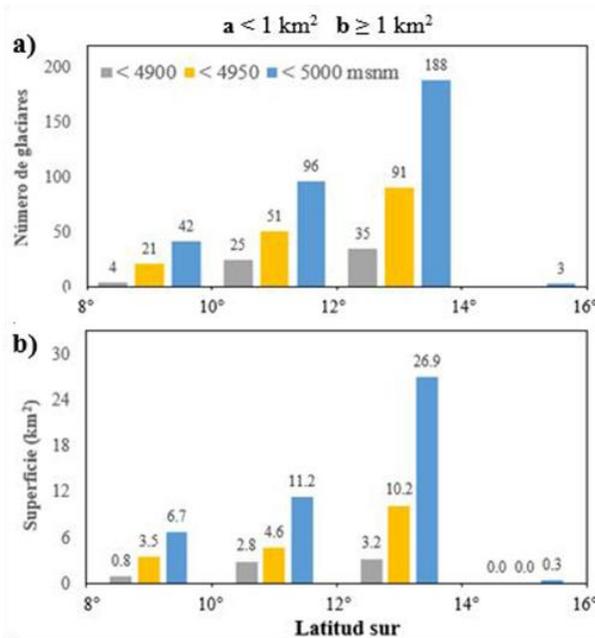


Figura 6. Comportamiento de glaciar < 1 km² según altitud media. a) Número de glaciares. b) Superficie de glaciares

El comportamiento del desplazamiento de altitud media se evaluó para glaciares < 1 km² (figura 6a y 6b). Determinando, menores a altitud media de 4900 msnm existen 64 unidades (3% de total) con 6.8 km² (0.6% del total), < 4950 msnm de 163 glaciares (18.2 km²) y < 5000 msnm de 329 glaciares (45.1 km²). Visualizando para altitud media de < 4950 msnm, en latitud 14°-16° S no existe glaciares a la actualidad y latitud 8°-10° S, los 25 glaciares (4.3 km²) son más propenso a reducción acelerada debido a la disminución de la precipitación sólida estacionales (Schmidt & Nüsser, 2017) y aumentos de temperaturas mínimas en las altas montañas (Schauwecker et al., 2014).

3.2 Distribución de evolución glaciar

Para la evolución glaciar, la información registrada por Hidrandina, 1989 y los sectores incluidas de reanálisis de imagen Landsat de 1975, totaliza 3490 unidades, 2342 km² de superficie y 68736 Hm³ de volumen (glaciar inicial) y glaciares actuales presenta 2005 unidades, 1058 km² y 31930 Hm³ (AEGL-ANA, 2021b); lo que significa una pérdida de 1284 km² (54%) de superficie y 36806 Hm³ (54%) de volumen. Este comportamiento representa el rápido retroceso experimentado por los glaciares andinos en los últimos tiempos que se vincula al cambio

climático antropógeno (Marzeion et al., 2014; Seehaus et al., 2019). También, responde a las condiciones climáticas medias en los Andes tropicales del siglo 20. Asimismo, es deducible que, siendo las glaciares fuentes de agua, el retroceso glaciar en la cordillera nevadas probablemente debe haber generado algún impacto en las actividades humanas en la regiones del País y por ende en actividades económicas (Veettil, 2019).

Al evaluar en las 2005 unidades para ambos periodos; al glaciar inicial corresponde 2037 km². En la tabla 4, se presentan los cambios de la morfometría de glaciares por latitud. Se aprecia las mayores pérdidas: superficie (409 km²) y volumen (12495 Hm³) en latitud 12°-14° S, longitud horizontal (1994 m) en latitud 14°-16°S, longitud vertical (975 m) en latitud 8°-10°S. Además, existe 711 unidades de glaciares han sufrido fragmentación de dos a once divisiones; distribuyéndose la mayor cantidad de 277 unidades en la latitud 12°-14° S y menor cantidad de 70 unidades en 14°-16° S. Esta fragmentación depende del tamaño de glaciar, se dividen en nuevas masas de hielo de área reducida y más propensos a la fusión acelerada (IDEAM, 2012) con consecuencias a la extinción (Seehaus et al., 2019, Rabatel et al., 2013).

Tabla 4. Pérdida de las dimensiones con respecto a glaciares iniciales por rango de latitud

Variables	Latitud sur				Total
	8° - 10°	10° - 12°	12° - 14°	14° - 16°	
Área (km ²)	264	162	409	144	979
Volumen (Hm ³)	11649	4677	12495	5245	34066
Longitud horizontal (m)	1759	1702	1848	1994	
Longitud vertical (m)	975	768	753	699	
Fragmentación (unidad) División (rango)	234 (2-11)	130 (2-9)	277 (2-9)	70 (2-6)	711

La figura 7, representa a la dimensión inicial compuesta de glaciar actual (color celeste) más pérdida glaciar (color naranja). En la figura 7a y 7b, al evaluar por tamaño, los glaciares < 1 km² presenta una pérdida de superficie de 682 km² (13541 Hm³); distribuyendo en latitud 12°-14° S de 309 km² (5845 Hm³) y latitud 8°-10° S de 152 km² (3263 Hm³). Los porcentajes de pérdidas de superficie y volumen por latitud varían de 67%±7% y 72%±5% (glaciar < 1 km²) y en 35%±10% y 49%±7% (glaciar ≥ 1 km²), respectivamente. Es así, la retracción de los glaciares en los últimos 57 años ha implicado cambios diferenciados según tamaño. En la figura 7c y 7d, un

estimado del glaciar promedio presenta una pérdida de longitud horizontal y longitud vertical de 907 m y 178 m (glaciar < 1 km²) y 2744 m y 151 m (glaciar ≥ 1 km²). Y en latitud 8° S a 16° S, la tendencia de pérdida global se incrementa, en horizontal (17%, 19%, 22%, 26%) y vertical (26%, 29%, 30%, 33%). Este comportamiento de retroceso de aproximadamente de cinco décadas ha producido la formación de 996 nuevas lagunas por procesos de fusión del hielo (UGRH-ANA, 2014b) y las altitudes mínimas promedio se elevan en 183 m en glaciar < 1 km² y 144 m en glaciar ≥ 1 km².

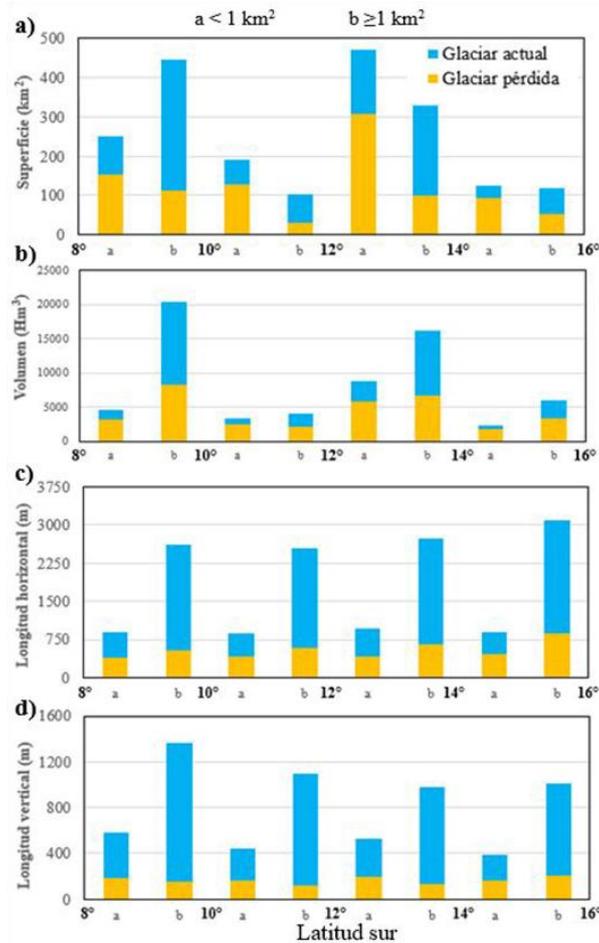


Figura 7. Pérdida de morfometría de glaciares. a) Superficie. b) Volumen. c) Distancia horizontal. d) Distancia vertical

3.3 Distribución climática en ámbito de glaciares

En la Figura 8, se visualiza el comportamiento de temperatura y precipitación para la época húmeda (noviembre-abril) y seca (mayo-octubre). Al comparar los datos indica que, en la época húmeda, la precipitación diaria promedio de 3.69 mm/día cuadruplica a la época seca y la temperatura diaria promedio a 5000 msnm de 1.4 °C duplica a la época seca. El comportamiento de la tendencia entre la latitud 8°-16° S, la precipitación decrece de 4.9 a 2.7 mm/día en estación húmeda y 1.5 a 0.4 mm/día en estación seca; mientras, la temperatura aumenta de 0.7 °C a 2.4 °C en estación húmeda y ligero descenso de 0.86°C a 0.76°C, pero con una caída a 0.29 °C en latitud 12°-14° S (estación seca). Al correlacionar la afectación del clima de cinco años en cada latitud; los glaciares de mayor tamaño ubicado en latitud 8°-10° S ocurren precipitación muy alta y temperatura muy baja en estación húmeda y latitud 12°-14° S de alta

precipitación y muy baja temperatura en estación seca, propicia mayor recarga de nieve y menor ablación de hielo. Mientras, los glaciares de menor tamaño situadas en la latitud de 10-12° S recibe poca precipitación y temperatura baja en época húmeda y la latitud 14-16° S ocurren muy baja precipitación y alta temperatura en estación seca, genera poca recarga de nieve y mayor ablación. Este comportamiento de clima al glaciar se puede inferir para los años anteriores, lo que ha provocado en glaciares de mayor tamaño de pérdidas superficiales 45%±6% y glaciar de menor tamaño de 57%±3%. Aunque, esta asunción puede mejorarse con trabajo de investigación con datos cada diez años (decadales) desde 1970 a 2020. Podemos mencionar, en la latitud 14°-16° S se ubican cuatro cordilleras en trópicos secos (Veettil et al., 2016) o zona de convergencia tropical (Sagredo & Lowell, 2012), siendo la cordillera Huanzo y Chila han alcanzado pérdidas superficiales superiores 95% (AEGL-ANA, 2021b).

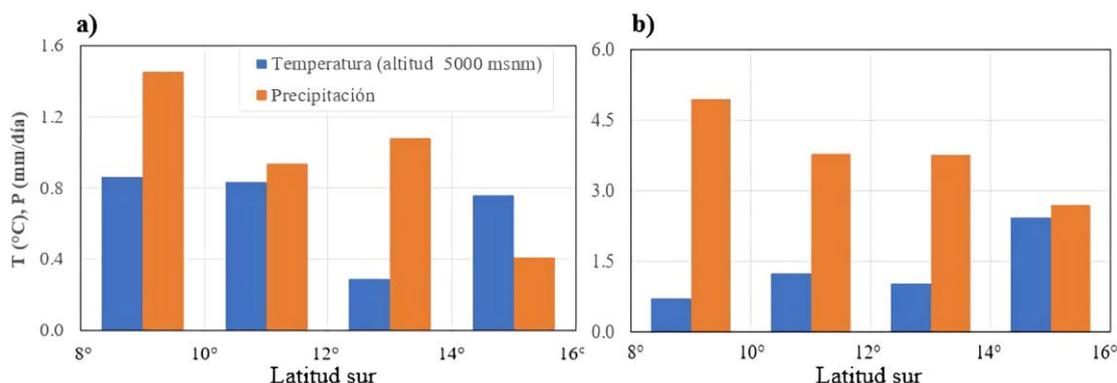


Figura 8. Comportamiento de temperatura (T) y precipitación (P) en diferentes rangos de latitudes del ámbito de glaciares. a) Época seca, b) Época húmeda

4. DISCUSIÓN

Una interrogante de la estimación de morfometría en glaciares tropicales es la precisión de valores medidos; debido al situarse en montañas de alta pendiente generan una diversidad de relieve y geoformas. Representar una geometría detallada es casi crucial por la gran cantidad de singularidades en los contornos del glaciar. La precisión lograda fue comparada. La superficie glaciar obtenida de imagen satelital y equipo topográficos del glaciar Pastoruri (AEGL-ANA, 2021a) difieren en 10%; mientras, en espesor de hielo obtenida en GlabTop y equipo de radar en glaciar Artesonraju (Oberreuter, en prep) es 11% y el volumen estimada resulta una precisión $\pm 30\%$ en el modelo matemático (Linsbauer et al., 2012). Un inconveniente del DEM ALOS no está disponible para el año de la imagen satelital evaluada y los volúmenes calculados difieran entre las dos técnicas. Asimismo, en las cordilleras nevadas del País se han producido varios eventos de deslizamiento (Carey, 2014), últimamente son los nevados de Salkantay producidos el 23 febrero de 2020 (Wilca et al., 2021) y Hualcan el 11 de abril de 2010 (Valderrama et al., 2012), donde la avalancha se inicia en el sector de pendiente superiores a 50° . Se sugiere a los valores del pendiente promedio estimado sea considerado como un indicativo de la geometría crítica inestable por la presencia de bloque de hielo colgante y formaciones de grietas que exista en el glaciar (Faillettaz et al., 2015). Además, la estimación de evolución del glaciar representa a periodo de años, siendo los valores obtenidos es una aproximación a los cambios en el tiempo.

5. CONCLUSIONES

En la latitud de 8° S a 16° S fueron estimadas las medidas morfométricas y los cambios temporales entre glaciares actuales y glaciares iniciales; los cuales fueron procesadas, reanalizada de imágenes de satélite y modelos de elevación digital. El comportamiento de los tamaños de los glaciares no se distribuye uniformemente en los 8° S y los porcentajes de superficie se distribuyen 41%, 13%, 37% y 9%. Al evaluar los glaciares $< 1 \text{ km}^2$ ocupan el 86% de la cantidad total representa en superficie 34% y volumen 18%; y resultan en cada latitud mayores cambios dinámicos que supera en pérdida de superficie 60%, volumen 67%, longitud horizontal 43% y longitud vertical 32%; lo que llevará en décadas siguientes una paulatina desaparición y en especial a los 64 glaciares (6.87 km^2) ubicadas debajo de altitud media de 4900 msnm. El comportamiento de clima actual correlaciona con el tamaño de glaciares ubicadas según las latitudes; donde los glaciares grandes presentan precipitaciones altas en época húmeda que favorece a la recarga de nieve y glaciares pequeños tienen alta temperatura en época seca que genera ablación al hielo. Finalmente, las dimensiones estimadas de morfometría de glaciares pueden ser utilizadas en estudio glaciológico y los resultados relacionados a DEM pueden tener incertidumbre para el año de evaluación y debe manejarse referencialmente.

Agradecimiento

Los autores de este artículo agradecen a la oficina de Seguimiento de Comportamiento de Glaciares y Lagunas de la Autoridad Nacional del Agua por

proporcionar la información de glaciares (actuales e iniciales) y datos climáticos en alta montaña; y a CONIDA por proporcionar imagen Spot 6/7.

Asimismo, agradecemos al IRD de Francia por la asesoría técnica para su publicación y al Proyecto Glaciares-CARE en la capacitación de GlabTop.

REFERENCIAS

- AEGL-ANA. (2018). Cuantificación y caracterización de recursos hídricos en glaciares. Area de Evaluación de Glaciares y Lagunas-ANA. Huaraz-Ancash., 32p.
- AEGL-ANA. (2020). Cuantificación de glaciares de la cordillera Blanca. Area de Evaluación de Glaciares y Lagunas-ANA. Huaraz-Ancash., 120p.
- AEGL-ANA. (2021a). Pastoruri 40 años de estudios glaciológicos. Area de Evaluación de Glaciares y Lagunas-ANA. Huaraz-Ancash., 40p.
- AEGL-ANA. (2021b). Reserva hídrica de glaciares del Perú. Area de Evaluación de Glaciares y Lagunas-ANA. Huaraz-Ancash., 40p.
- Alarcon, C., Gevaert, C., Mattar, C., Muñoz, Ju., & Santillan, N. (2015). Rends on glacier area retreat over the group of Nevados Caullaraju-Pastoruri (Cordillera Blanca , Peru) using Landsat imagery. *Journal of South American Earth Sciences*, 59, 19–26. <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2015.01.006>
- Anderson, P. W., & Hastenrath, S. (1994). Recession of Tropical Glaciers. *Science*, 265: 1790-1791, (1), 6–7.
- Baraer, M., Mark, B. G., Mckenzie, J. M., Condom, T., Bury, J., Huh, K., ... Rathay, S. (2012). Glacier recession and water resources in Peru's cordillera Blanca. *Journal of Glaciology*, 58(207), 134–150. <https://doi.org/10.3189/2012JoG11J186>
- Bernex, N., & Lima, M. T. (2010). Cambio climático, retroceso glaciar y gestión integrada de los recursos hídricos. 1-130p.
- Berrouet, L., Villegas-Palacio, C., & Botero, V. (2020). Vulnerability of Rural Communities to Change in an Ecosystem Service Provision: Surface water supply. A Case Study in the Northern Andes, Colombia. *Elservier*, 97(April), 104737. <https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2020.104737>
- Bolch, T., Menounos, B., & Wheate, R. (2010). Remote Sensing of Environment Landsat-based inventory of glaciers in western Canada , 1985 – 2005. *Remote Sensing of Environment*, 114(1), 127–137. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2009.08.015>
- Bomshoms Calvelo, M., Quispe Gutiérrez, N., & Quispe Vega, K. (2018). Estudio de la frecuencia de nevadas en el Perú. (SENAMHI), Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología. Retrieved from <http://repositorio.ana.gob.pe/handle/ANA/2330>
- Bury, J. T., Mark, B. G., McKenzie, J. M., French, A., Baraer, M., Huh, K. I., ... Gómez López, R. J. (2011). Glacier recession and human vulnerability in the Yanamarey watershed of the Cordillera Blanca, Peru. *Climatic Change*, 105(1), 179–206.
- Carey, M. (2014). Glaciares, cambio climático y desastres naturales: Ciencia y sociedad en el Perú (IFEA). <https://doi.org/https://doi.org/10.4000/books.ifea.11289>
- Carey, M., Baraer, M., Mark, B. G., French, A., Bury, J., Young, K. R., & Mckenzie, J. M. (2013). Toward hydro-social modeling : Merging human variables and the social sciences with climate-glacier runoff models (Santa River , Peru). *Journal of Hidrology*. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2013.11.006>
- Chuvieco, E. (2000). Fundamentos de teledetección espacial. 3ra Edición Revisada, 566.
- Condom, T., Escobar, M., Purkey, D., Pouget, J. C., Tacsí, A., Suarez, W., ... Gomez, J. (2012). Simulating the implications of glaciers' retreat for water management: A case study in the Rio Santa basin, Peru. *Water International*, 37(4). <https://doi.org/https://doi.org/10.1080/02508060.2012.706773>

- Drenkhan, F., Carey, M., Huggel, C., Seidel, J., & Oré, M. T. (2015). The changing water cycle : climatic and socioeconomic drivers of water-related changes in the Andes of Peru. *WIREs Water*, 2(December). <https://doi.org/10.1002/wat2.1105>
- Faillettaz, J., Funk, M., & Vincent, C. (2015). Avalanching glacier instabilities: Review on processes and early warning perspectives. *Reviews of Geophysics*, 53(2), 203–224. <https://doi.org/10.1002/2014RG000466>
- Frey, H., Machguth, H., Huss, M., Huggel, C., Bajracharya, S., Bolch, T., ... Stoffel, M. (2014a). Estimating the volume of glaciers in the Himalayan–Karakoram region using different methods. *The Cryosphere*, 8(6), 2313–2333. <https://doi.org/10.5194/tc-8-2313-2014>
- Frey, H., Machguth, H., Huss, M., Huggel, C., Bajracharya, S., Bolch, T., ... Stoffel, M. (2014b). Estimating the volume of glaciers in the Himalayan–Karakoram region using different methods. *The Cryosphere*, 8(6), 2313–2333. <https://doi.org/10.5194/tc-8-2313-2014>
- Frey, H., Machguth, H., Huss, M., Huggel, C., Bajracharya, S., Bolch, T., ... Stoffel, M. (2014c). Estimating the volume of glaciers in the Himalayan–Karakoram region using different methods. *The Cryosphere*, 8(6), 2313–2333. <https://doi.org/10.5194/tc-8-2313-2014>
- GAPHAZ. (2017). Evaluación de peligros por glaciares y permafrost en regiones de montaña. 72. Retrieved from <https://www.proyectoglaciares.pe/wp-content/uploads/2018/03/Evaluación-de-peligros-por-glaciares-y-permafrost-en-regiones-de-montaña.pdf>
- Guo, W., Liu, S., Xu, J., Wu, L., Shangguan, D., Yao, X., ... Jiang, Z. (2015). The second Chinese glacier inventory : data , methods and results. *Journal of Glaciology*, 61(226), 357–372. <https://doi.org/10.3189/2015JoG14J209>
- Haerberli, W. (1995). Application of inventory data for estimating characteristics of and regional climate-change effects on mountain ... (January).
- Haerberli, W., & Schweizer, J. (1988). Rhonegletscher 1850: Eismechanische Ueberlegungen zu einem historischen Gletscherstand. *Hydrologie Und Glaziologie an Der Eidgenossischen*, (94).
- Hanshaw, N., & Bookhagen, B. (2013). Glacial areas , lake areas , and snowlines from 1975 to 2012 : status of the Cordillera Vilcanota , including the Quelccaya Ice Cap , northern central Andes , Peru. *The Cryosphere*, 7–9.
- Hidrandina, S. . (1989). Inventario de glaciares del Perú. In Concytec (Ed.), Concytec (Hidrandina). Huaraz, Ancash.: Concytec.
- Huggel, C., Haerberli, W., Käab, A., Bieri, D., & Richardson, S. (2004). An assessment procedure for glacial hazards in the Swiss Alps. *Canadian Geotechnical Journal*, 41(6), 1068–1083. <https://doi.org/10.1139/t04-053>
- IDEAM. (2012). Glaciares de Colombia. Más que montañas con hielo. In Bogotá. D.C. SBN: 978-958-806-57-5. (p. 344). Retrieved from https://documentacion.ideam.gov.co/openbiblio/Bvirtual/022428/Glaciares_web.pdf
- IPCC. (2013). Cambio Climático 2013. Bases físicas. Resumen para responsables de políticas, resumen técnico y preguntas frecuentes. Editado Por Thomas F. Stocker, Dahe Qin, Gian-Kasper Plattner, Melinda Tignor, y Alexander Nauels. OMM PNUMA., 34p. Retrieved from http://www.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar5/wg1/WG1AR5_SummaryVolume_FINAL_SPANISH.pdf.
- Kulkarni, A. V, Bahuguna, I. M., Rathore, B. P., Singh, S. K., Randhawa, S. S., Sood, R. K., & Dhar, S. (2007). Glacial retreat in Himalaya using Indian Remote Sensing satellite data. *Current Science*, Vol., 92, 69–74.
- Linsbauer, A., Paul, F., & Haerberli, W. (2012). Modeling glacier thickness distribution and bed topography over entire mountain ranges with GlabTop: Application of a fast and robust approach. *Journal of Geophysical Research*. <https://doi.org/10.1029/2011JF002313>

- Linsbauer, A., Paul, F., Hoelzle, M., Frey, H., & Haerberli, W. (2009). The Swiss Alps Without Glaciers – A GIS-based Modelling Approach for Reconstruction of Glacier Beds. *Proceedings of Geomorphometry*, 243–247.
- Martín Murillo, L., Rivera Alejo, J., & Castio Robles, R. (2018). Cambio climático y desarrollo sostenible en Iberoamérica 2018. Informe La Rábida, Huelva, 218p. Retrieved from www.observatoriolarabida.com
- Marzeion, B., Cogley, J. G., & Richter, K. (2014). Reports Attribution of global glacier mass loss to anthropogenic and natural causes. *Ciencias Geológicas*, 2010(August), 1–6. <https://doi.org/10.5194/tc-8-59-2014>
- McFadden, E. M., Ramage, J., & Rodbell, D. T. (2011). Landsat TM and ETM+ derived snowline altitudes in the Cordillera Huayhuash and Cordillera Raura, Peru, 1986–2005. *The Cryosphere*, 5(2), 419–430. <https://doi.org/10.5194/tc-5-419-2011>
- Minagri. (2009). Reglamento de clasificación de tierras por su capacidad de uso mayor. Decreto Supremo No017-2009-AG. Normas Legales. Lima-Perú., 401820–401837. Retrieved from [https://www.serfor.gob.pe/pdf/normatividad/2009/decreto/DS No 017-2009-AG\(Reglamento de Clasif de Tierras\).pdf](https://www.serfor.gob.pe/pdf/normatividad/2009/decreto/DS No 017-2009-AG(Reglamento de Clasif de Tierras).pdf)
- Müller, F., Caflisch, T., & Müller, G. (1977). Instructions for Compilation and Assemblage of Data for a World Glacier Inventory by. UNESCO, 22.
- Muñoz, R. (2017). Impacto del cambio climático en los recursos hídricos de la subcuenca Quillcayhuanca, Perú. Master En Ingeniería Hidráulica y Medio Ambiente. Retrieved from <https://riunet.upv.es/handle/10251/80276>
- Oberreuter, J., Badillo-Rivera, E., Loarte, E., Medina, K., Cochachin, A., & Uribe, J. (2021). Surface elevation and ice thickness data between 2012 and 2020 at Artesonraju Glacier, Cordillera Blanca, Perú. *Earth System Science Data (Artículo En Revisión)*, 1980(January), 1–20.
- Paul, F., & Ka, A. (2004). Rapid disintegration of Alpine glaciers observed with satellite data. *Geophysical Research Letters*, 31(September 1999), 12–15. <https://doi.org/10.1029/2004GL020816>
- Paul, F., & Linsbauer, A. (2012). Modeling of glacier bed topography from glacier outlines, central branch lines, and a DEM. *International Journal of Geographical Information Science*, (June 2014), 1–18. <https://doi.org/10.1080/13658816.2011.627859>
- Pralong, A., & Funk, M. (2006). On the instability of avalanching glaciers. *Journal of Glaciology*, 52(176), 31–48. <https://doi.org/10.3189/172756506781828980>
- Rabatel, A., Francou, B., Soruco, A., Gomez, J., Cáceres, B., Ceballos, J. L., ... Wagnon, P. (2013). Current state of glaciers in the tropical Andes: a multi-century perspective on glacier evolution and climate change. *The Cryosphere*, 7(1), 81–102. <https://doi.org/10.5194/tc-7-81-2013>
- Rabatel, Antoine, Machaca, A., Francou, B., & Jomelli, V. (2006). Glacier recession on Cerro Charquini (16°S), Bolivia, since the maximum of the Little Ice Age (17th century). *Journal of Glaciology*, 52(176), 110–118. <https://doi.org/10.3189/172756506781828917>
- Racoviteanu, A. E., Arnaud, Y., Williams, M. W., & Ordon, J. (2008). Decadal changes in glacier parameters in the Cordillera Blanca, Peru, derived from remote sensing. *Journal of Glaciology*, 54(186), 499–510. Retrieved from <https://hdl.handle.net/20.500.12543/3333>
- Racoviteanu, A. E., Williams, M. W., & Barry, R. G. (2008). Optical Remote Sensing of Glacier Characteristics: A Review with Focus on the Himalaya. *Sensors*, 3355–3383. <https://doi.org/10.3390/s8053355>
- Racoviteanu, A., & Williams, M. W. (2012). Decision Tree and Texture Analysis for Mapping Debris-Covered Glaciers in the Kangchenjunga Area, Eastern Himalaya. *Remote Sensing*, 3078–3109. <https://doi.org/10.3390/rs4103078>
- Rivera, A., Bown, F., Napoleoni, F., Muñoz, C., & Vuille, M. (2017). Manual: Balance de masa glaciar. University at Albany. State University of New York., 203.

- 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>
- Schaefli, B., Hingray, B., Niggli, M., & Musy, a. (2005). A conceptual glacio-hydrological model for high mountainous catchments. *Hydrology and Earth System Sciences Discussions*, 2(1), 73–117. <https://doi.org/10.5194/hessd-2-73-2005>
- Schauwecker, S., Rohrer, M., Acuña, D., Cochachin, A., Dávila, L., Frey, H., ... 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>
- Schmidt, S., & Nüsser, M. (2017). Changes of High Altitude Glaciers in the Trans-Himalaya of Ladakh over the Past Five Decades (1969–2016). *Geosciences*, 7(2), 27. <https://doi.org/10.3390/geosciences7020027>
- Schoolmeester, T., Johansen, K.S., Alfthan, B., B., & E., Hespings, M. y Verbist, K. (2018). Atlas de Glaciares y Aguas Andinos. El impacto del retroceso de los glaciares sobre los recursos hídricos. UNESCO y GRID-Arenda, 80.
- 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*, 2537–2556. Retrieved from <https://doi.org/10.5194/tc-13-2537-2019>
- Sidjak, R. W., & Wheate, R. . (2010). Glacier mapping of the Illecillewaet icefield , British Columbia , Canada , using Landsat TM and digital elevation data. *Remote Sensing*, (February 2012), 37–41.
- Silverio, W., & Jaquet, J. (2005). Glacial cover mapping (1987 – 1996) of the Cordillera Blanca (Perú) using satellite imagery. *Elservier*, 95, 342-350p. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2004.12.012>
- Silverio, W., & Jaquet, J. (2012). International Journal of Remote Multi-temporal and multi-source cartography of the glacial cover of Nevado Coropuna (Arequipa, Perú) between 1955 and 2003. *Remote Sensing*, (November 2014), 37-41p. <https://doi.org/10.1080/01431161.2012.676742>
- Silverio, W., & Jaquet, J. (2014). Cartographie satellitaire de la couverture glaciaire des cordillères andines du Pérou. *Archives Des Sciences*, 109-118p.
- Tacsi, A., Condom, T., Garcia, J., Cochachin, A., & Mejia, A. (2021). Modelización hidro-glaciológica actual y futura de la microcuenca Yanamarey en la cordillera Blanca, Perú. *Aqua-LAC*, 13(1), 108–127. <https://doi.org/10.29104/phi-aqualac/2021-v13-1-08>
- UGRH-ANA. (2014a). Inventario de Glaciares del Perú. In Unidad de Glaciología y Recursos Hídricos-ANA. Huaraz-Ancash. <https://doi.org/http://www.ana.gob.pe/media/981508/glaciares.pdf>
- UGRH-ANA. (2014b). Inventario de Lagunas Glaciares del Perú. Unidad de Glaciología y Recursos Hídricos-ANA. Huaraz-Ancash., 44p. Retrieved from http://www.ana.gob.pe/sites/default/files/normatividad/files/lagunas_0_0_2.pdf
- UNEP. (2007). Global outlook for ice and snow. UNEP/GRID, Arendal, Norway., 27(1), 75–77. <https://doi.org/10.1111/j.1751-8369.2008.00046.x>
- Valderrama, P., & Vilca, O. (2012). Dinamica E Implicancias Del Aluvión De La Laguna. *Researchgate*, 69(3), 400–406.
- Veettil, B. K. (2019). Global Disappearance of Tropical Mountain Glaciers : Observations , Causes , and Challenges. *Geosciences*, 1-25p.
- Veettil, B. K., Pereira, S. F. R., Wang, S., Valente, P. T., Grondona, A. E. B., Rondón, A. C. B., ... Simões, J. C. (2016). Un análisis comparativo del comportamiento diferencial de los glaciares en los Andes Tropicales usando teledetección. *Investigaciones Geográficas*, 51, 3–36. <https://doi.org/10.5354/0719-5370.2016.41215>

- Vilca, O., Mergili, M., Emmer, A., Frey, H., & Huggel, C. (2021). The 2020 glacial lake outburst flood process chain at Lake Salkantaycocha (Cordillera Vilcabamba, Peru). *Landslides*, 18(6), 2211–2223. <https://doi.org/10.1007/s10346-021-01670-0>
- Yin, D., Cao, X., Chen, X., & Shao, Y. (2013). International Journal of Remote Comparison of automatic thresholding methods for snow-cover mapping using Landsat TM imagery. *Remote Sensing*, (July 2013), 37–41. <https://doi.org/10.1080/01431161.2013.803631>

Las denominaciones que se emplean en esta publicación y la presentación de los datos que en ella figuran no suponen por parte de la UNESCO la adopción de postura alguna en lo que se refiere al estatuto jurídico de los países, territorios, ciudades o zonas, o de sus autoridades, ni en cuanto a sus fronteras o límites. Las ideas y opiniones expresadas en esta publicación son las de los autores y no representan, necesariamente, el punto de vista de la UNESCO, y no comprometen a la Organización.



Attribution-NonCommercial-ShareAlike 4.0 International
CC BY-NC-SA 4.0 license