

DOI: 10.24850/j-tyca-14-06-03

Artículos

Retroceso glaciar y el valor de los servicios ecosistémicos asociados con el recurso hídrico en la cuenca Parón-Parque Nacional Huascarán (Cordillera Blanca), 2009-2018
Glacier retreat and the value of ecosystem services associated with water resources in the Paron basin-Huascarán National Park (Cordillera Blanca), 2009-2018

Ricardo Pozada-Rengifo¹, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5894-7860>

Luigi Bravo-Toledo², ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2229-9467>

Joshua Iparraguirre³, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8893-4112>

¹Facultad de Ingeniería Geológica, Minera, Metalúrgica y Geográfica, Universidad Nacional Mayor de San Marcos, Lima, Perú, ricardo.pozada@unmsm.edu.pe

²Facultad de Ingeniería Ambiental y de Recursos Naturales, Universidad Nacional del Callao, Callao, Perú, labravot@unac.edu.pe

³Instituto Geológico, Minero y Metalúrgico, San Borja, Perú, iparraguirrea.joshua@gmail.com



Autor para correspondencia: Ricardo Pozada-Rengifo,
ricardo.pozada@unmsm.edu.pe

Resumen

Los glaciares tropicales son indicadores sensibles del cambio climático. La pérdida del volumen de los glaciares tropicales en la cuenca Parón (Cordillera Blanca, Perú) es una muestra de esto a nivel global y se espera que tales cambios afecten a los servicios ecosistémicos que son únicos e insustituibles. Este estudio estimó el valor económico de los servicios ecosistémicos asociados con el recurso hídrico impactados por el retroceso glaciar en la cuenca de Parón-Parque Nacional Huascarán (Cordillera Blanca, Perú) entre los años 2009 y 2018. La metodología inició cartografiando los glaciares de 2009 a 2018 usando imágenes satelitales de alta resolución tomadas en temporada seca. Luego, se reconstruyeron las superficies 3D de los mismos usando la herramienta GLABTOP permitiendo calcular el volumen. Con los datos obtenidos se calculó el valor del servicio ecosistémico del turismo y recreación, y provisión de flujo hídrico. Los resultados indican que los glaciares de la cuenca Parón se han reducido de $\sim 1.82\%$ del área glaciar y en una tasa de deglaciación máxima de $0.08 \text{ (km}^2/\text{año)}$. Los resultados de la reconstrucción 3D muestran un 1.8% más de espesores entre los 40 y 60 m, con una pérdida de hielo de 1.02 km^3 , a una tasa máxima de $0.14 \text{ km}^3/\text{año}$. Los valores monetarios presentes de los servicios de 2009 a 2018 se estimaron en \$52 029.34 para el servicio de turismo y recreación y de \$3 213 258.21 para el servicio de provisión de flujo hídricos,

calculados a 8% de tasa de descuento. Por lo tanto, se recomienda que se debe incrementar la inversión en programas sobre la red hídrica de la cuenca de Parón, como mayores servicios, usos poblacionales o industriales.

Palabras clave: criósfera, servicios ecosistémicos, valoración económica, Cordillera Blanca, cambio climático.

Abstract

Tropical glaciers are sensitive indicators of climate change. The loss of the volume of tropical glaciers in the Paron basin (Cordillera Blanca, Peru), is an example of this at a global level and these changes are expected to affect ecosystem services that are unique and irreplaceable. This study estimated the economic value of ecosystem services associated with water resources impacted by glacial retreat in the Paron basin - Huascarán National Park (Cordillera Blanca, Peru) between the years 2009 and 2018. The methodology started by mapping glaciers from 2009 to 2018 using high-resolution satellite images taken during the dry season. Then, the 3D surfaces of the glaciers were reconstructed using the GLABTOP tool to calculate the volume. With the data obtained, the value of the Tourism and Recreation ecosystem service, provision of Water Flow, was calculated. The results indicate that the glaciers of the Paron basin have been reduced by $\sim 1.82\%$ of the glacial area and at a maximum deglaciation rate of $0.08 \text{ (km}^2\text{/year)}$. The results of the 3D reconstruction show 1.8% more thickness between 40 and 60 m with an ice loss of 1.02 km^3 , at a maximum rate of $0.14 \text{ km}^3\text{/year}$. The present monetary values of the services from 2009 to 2018 were estimated at \$52 029.34 for the

tourism and recreation service and \$3 213 258.21 for the water flow provision service, calculated at 8% discount rate. Therefore, it is recommended that investment in programs on the Paron watershed water network, such as increased services, population or industrial use, should be increased.

Keywords: Cryosphere, ecosystem services, economic valuation, Cordillera Blanca, climatic change.

Recibido: 24/03/2021

Aceptado: 12/04/2022

Publicado online: 07/07/2022

Introducción

Los glaciares son reservas de agua dulce todo el año, ya que en los glaciares tropicales la ablación es anual (Cogley *et al.*, 2011) y proporciona agua de manera continua de acuerdo con el ciclo hidrológico (Rumbaour *et al.*, 2015). El retroceso progresivo de los glaciares en los Andes es conocido desde el siglo XX hasta la actualidad; el cambio en su balance de masa es un problema que genera gran impacto socioambiental (Mark & Seltzer, 2005). Según Urrutia y Vuille (2009), para el año 2050, todos los glaciares ubicados por debajo de los 5 500 msnm desaparecerían, lo cual tendría un efecto significativo en la regulación del régimen hidrológico (Jia *et al.*, 2020). El Perú posee la mayor superficie de glaciares tropicales a nivel global, aproximadamente el 71% cubriendo

un área de 1 200 km². La mayor parte de su población reside en la costa del océano Pacífico, una de las regiones más áridas de la Tierra. Su abastecimiento de agua depende en gran parte de los glaciares de la cordillera de los Andes (Kaser & Osmaston, 2002), y en mayor medida en la temporada seca (Schauwecker *et al.*, 2017). Por su parte, la Cordillera Blanca es la cadena montañosa glacial más extensa de los trópicos (Kaser, Ames, & Zamora, 1990). Tal vez por esta razón y por su relativa facilidad de accesibilidad a diferentes áreas glaciares es la zona más estudiada y con mayor cantidad de datos disponibles. Se localiza en la provincia de Ancash y poseía cerca de 348 km² (Rabatel *et al.*, 2012). Estudios en los últimos años han indicado que durante 1980 y 2010, los glaciares de los Andes tropicales perdieron en promedio entre 0.6 y 1.2 m/año (Rabatel *et al.*, 2013) de su masa. Pero de 2004 a 2014, la Cordillera Blanca presentó un retroceso glacial de 31 km², que representa una pérdida de 6% (Yap, 2015).

Se han postulado un gran número de metodologías para reconstruir los espesores de glaciares actuales (e indirectamente calcular el almacén hídrico) debido a que realizar mediciones directas sobre el glaciar no es posible en todas las montañas (Farinotti *et al.*, 2017). Estos modelamientos numéricos pueden ser de fácil aplicación (Chen & Ohmura, 1990; Bahr, Meier, & Peckham, 1997; Lüthi, Walter, Jouvett, & Werder, 2006; Radić & Hock, 2011; Grinsted, 2013) o de mayor complejidad (Farinotti, Huss, Bauder, Funk, & Truffer, 2009; Linsbauer *et al.*, 2009; Li, Ng, Li, Qin, & Cheng, 2012; Linsbauer, Paul, & Haeberli, 2012; Farinotti, King, Albrecht, Huss, & Gudmundsson, 2014; Frey *et al.*, 2014; James & Carrivick, 2016). El cálculo de volumen en los Andes peruanos no ha sido ampliamente estimado. En la actualidad existen datos para

glaciares puntuales en la Cordillera Blanca, así como para zonas al sur de los Andes. La metodología más usada hasta el momento es GLABTOP (Linsbauer *et al.*, 2009; Linsbauer *et al.*, 2012; Iparraguirre *et al.*, 2020) para la estimación de futuras lagunas de riesgo potencial, pero que también permite calcular el almacén hídrico (Iparraguirre *et al.*, 2020).

El retroceso de los glaciares y las anomalías en los patrones de precipitación plantean una grave amenaza en la disponibilidad de agua (Bury *et al.*, 2011) y una alta variabilidad que afectará de modo significativo los servicios ecosistémicos (Heikkinen, 2017), siendo una posible fuente de tensiones sociales y políticas, que pueden convertirse en inestabilidad o incluso en graves conflictos (Hijioka *et al.*, 2014). Tales conflictos podrían provocar un acceso restringido a ciertos servicios, como el uso de agua potable para consumo y riego, fuerte dependencia de la agricultura, y oportunidades limitadas de medios de vida alternativos (Das, 2009).

Las evaluaciones de estos servicios pueden hacerse por valoración económica, usando los métodos basados en el valor de mercado, métodos de preferencia revelada y métodos de preferencia declarada (MINAM, 2016). Hoy día existen escasos estudios de su aplicación, pero se tienen algunos en China (Yuan & Wang, 2018; Zhang *et al.*, 2019); España (Grima & Campos, 2020); Chile (Segovia, 2014), y Perú (Boyano, 2016). Por lo tanto, identificar y evaluar los impactos que genera el retroceso glaciar sobre servicios ecosistémico permitirá generar toma de decisiones para una conservación, medidas de prevención control y elaboración de proyectos dirigidos (Boyano, 2016).

La cuenca Parón-Parque Nacional Huascarán (Cordillera Blanca) tiene características propias intrínsecas, como los páramos (parte baja de las cordilleras) y la criósfera (parte alta de la cordillera), que proporcionan servicios ecosistémicos para las poblaciones presentes en la cuenca (Boyano, 2016), como soporte, aprovisionamiento y regulación (Liekens *et al.* 2013). Los glaciares de la cuenca Parón son altamente vulnerables al cambio climático, que han inducido cambios significativos en la pérdida del volumen, área superficial y permafrost (Medina & Mejía, 2014; Navarro *et al.*, 2017), como ya se ha expuesto. Sin embargo, esta vulnerabilidad afecta directamente a los servicios ecosistémicos relacionados con el recurso hídrico y en la actualidad no existe una cuantificación de su valor.

Por lo tanto, esta investigación intenta llenar este vacío (1) examinando los cambios del retroceso glaciar, como área superficial y el volumen perdido entre los años 2009 y 2018; (2) aproximarse a obtener un valor base de los servicios ecosistémicos de turismo y recreación, y provisión de flujo hídrico continuo, utilizando para ello el método de mercados reales.

Metodología

Área de estudio

La Cordillera Blanca se encuentra en el norte del Perú y es la cadena montañosa glaciar más extensa de los trópicos (Kaser *et al.*, 1990). Para todos los análisis de este estudio, nos referimos a la cuenca Parón, a una

de las 10 cuencas hidrográficas glaciadas dentro y adyacentes al Callejón de Huaylas (Figura 1).

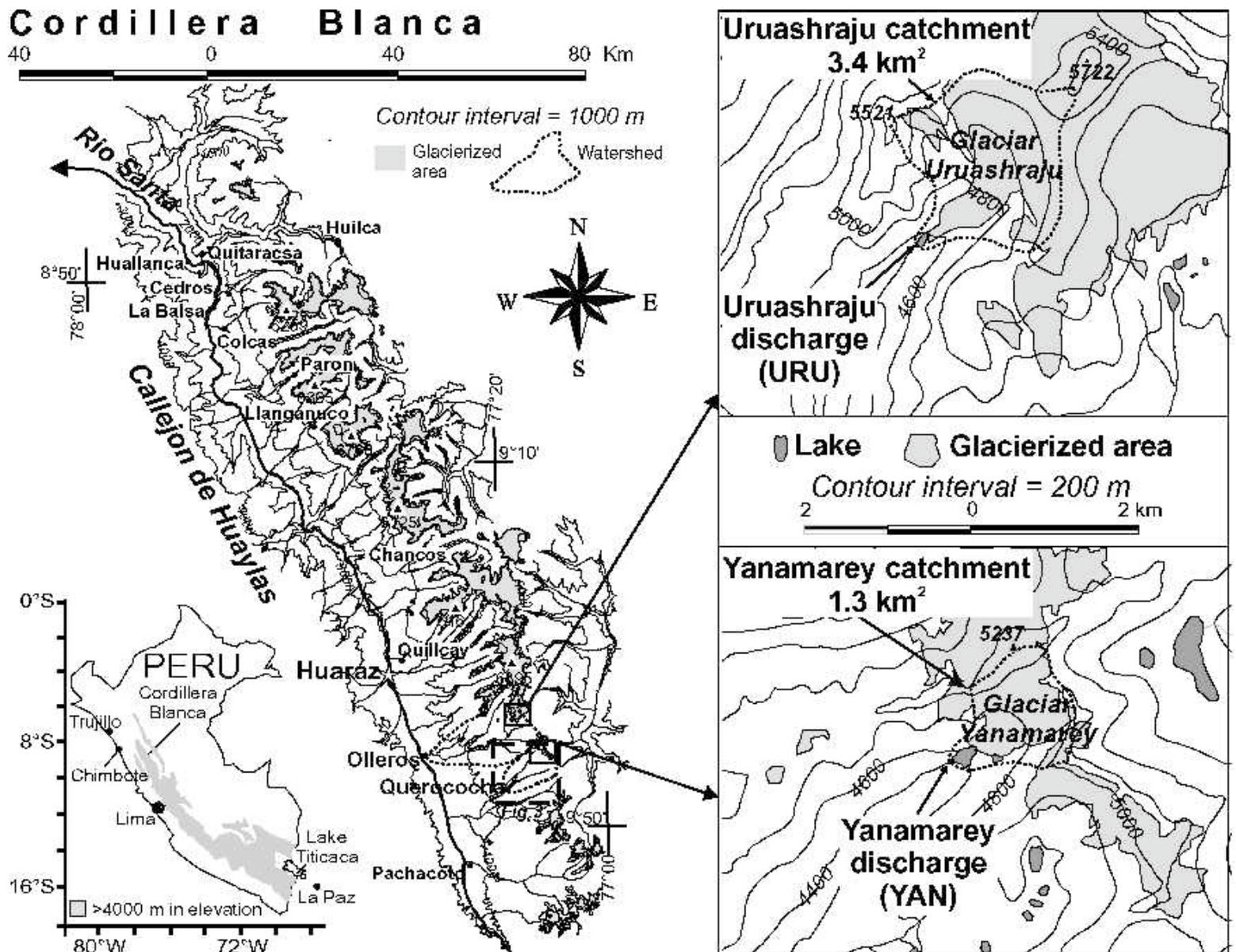


Figura 1. Ubicación de las cuencas glaciares de la Cordillera Blanca.

Fuente: Mark y Seltzer (2003).

La cuenca Parón está situada al norte de la Cordillera Blanca a ~90 km al este del océano Pacífico (tomando como referencia la isla Blanca del Callao). Se ubica en el distrito de Caraz, provincia de Huaylas, en el departamento de Ancash a ~57 km de la ciudad de Huaraz, extendiéndose entre los 8°S y 77°W. Drena sus aguas a la cuenca del río Santa y uno de los primeros inventarios estimaba que para el año de 1962 presentaba el 55% de su área glaciada (Tabla 1).

Tabla 1. Características físicas de las cuencas hidrográficas de la Cordillera Blanca.

Cuenca hidrográfica	Área glaciada (1962) (%)	Área de la cuenca (km ²)	Elevación media (msnm)	Mín. elevación (msnm)	Máx. elevación (msnm)
Parón	55	41	4 920	4 152	5 965
Llanganuco	41	89	4 832	3 831	6 670
Marcara (Chancos)	25	259	4 454	2 887	6 196
Cedros	22	114	4 544	1 975	6 128
Colcas	19	236	4 313	2 022	6 178
Quilcay	18	240	4 522	3 131	6 195
Pachacoto	12	206	4 610	3 713	5 574
Olleros	11	174	4 437	3 461	5 673
Santa (La Balsa)	9	4784	4 056	1 858	6 733
Quitarasca	8	384	4 237	1 587	5 921
Querococha	6	63	4 524	3 992	5 291

Fuente: extraído de Mark y Seltzer (2003).

Así también, el turismo en zonas glaciares constituye una importante fuente de ingresos y empleo para las comunidades locales adyacentes a sitios turísticos (Haimayer, 1989), siendo la cuenca Parón un importante sitio de turismo y de recreación dentro del Parque Nacional del Huascarán.

Extracción de información para el cambio del área glaciar

La delimitación de la superficie glaciar, así como la reconstrucción 3D de sus superficies se realizó usando el programa ArcGIS 10.5. Los materiales utilizados como insumos fueron imágenes satelitales obtenidas de *Google Earth* en temporadas secas correspondiente a cada año de estudio (desde 2009 hasta 2018); un modelo digital de elevación (o DEM) con 30 m de resolución correspondientes a los años de análisis; y por último, las curvas de nivel (equidistancia = 50 m) del área de estudio. Todos estos insumos fueron proporcionados por el Instituto Geológico, Minero y Metalúrgico (INGEMMET).

Delimitación de los glaciares actuales y paleoglaciares

La delimitación de la extensión glaciar se realizó con base en una imagen satelital de *Google Earth* de 30 metros por pixel de resolución.

La delimitación se hizo sobre la imagen satelital con la herramienta de cartografiado de ArcMap de ArcGIS. Se digitalizó manualmente cada aparato glaciar desde el circo hasta la lengua glaciar, en una escala de cartografiado de 1:250. Además, se usaron otros insumos, como el Hillshade de la imagen satelital (30 m/px), fotografías aéreas de 1 962 de la zona de estudio, y herramientas de apoyo como el ArcScene e imágenes históricas del *Google Earth*.

Para evitar una sobreestimación del área glaciar debido a un posible cartografiado de nieve, se escogió como imagen satelital una que fuera de temporada de estiaje.

Reconstrucción de la geometría 3D de las superficies glaciares y paleoglaciares

Conocer la geometría 3D de los glaciares actuales y del pasado es de gran importancia, pues permite cuantificar las reservas hídricas de la montaña, su ratio de deglaciación y por ende su evolución en un lapso establecido.

Las reconstrucciones 3D de los Andes peruanos se han efectuado usando el Ground Penetrating Radar (GPR), y debido a que los glaciares andinos son de muy difícil acceso, se ha usado el GPR en montañas glaciares puntuales: Artesonraju (Cordillera Blanca, Ancash), Coropuna (Cordillera Occidental, Arequipa) y Quelccaya (Cordillera Oriental, Cusco-Puno). Por lo tanto, es necesario complementar los trabajos de GPR con mediciones indirectas, empleando modelos numéricos que reconstruyan la superficie glaciar lo más ajustado a la realidad posible.

Actualmente, las metodologías más utilizadas para la reconstrucción 3D de los glaciales actuales y pasados son GLABTOP y GlaRe, respectivamente.

GlaBTop

Esta metodología permite estimar los espesores de hielo a lo largo de líneas de flujos, que representan el recorrido de los glaciares (Figura 2). Posteriormente, se interpolaron los espesores (Figura 3), abarcando toda el área glaciaria, obteniendo un ráster (representación 3D). La sumatoria de todos los espesores multiplicado por el tamaño de celda del ráster permitió obtener el volumen hídrico que representa la montaña. Por otro lado, estos espesores se restaron del modelo de elevación digital actual (DEM original menos DEM de espesores) para obtener la topografía basal (Linsbauer *et al.*, 2009; Paul & Linsbauer, 2012).

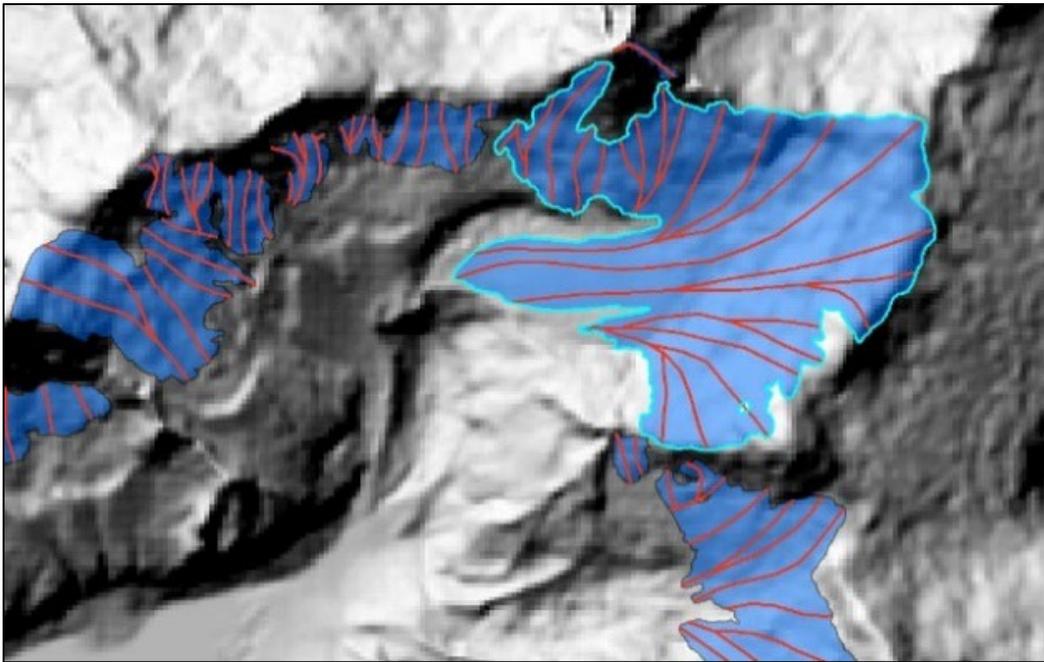


Figura 2. Cartografiado de las líneas de flujo en algunos glaciares de la cuenca Parón sobre el Hillshade del modelo digital de elevación (DEM).

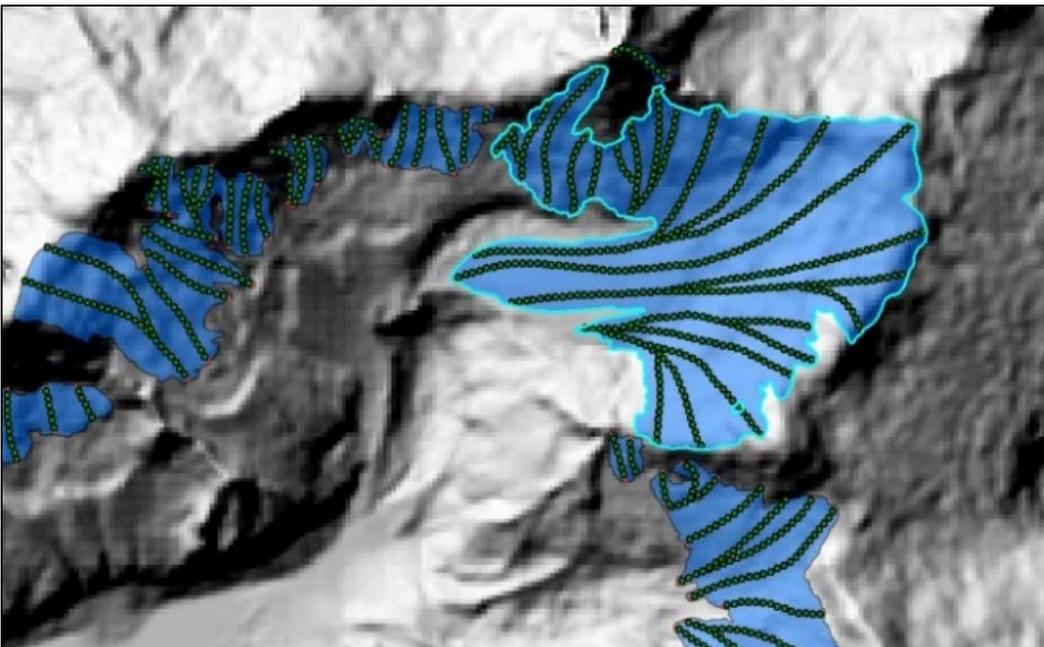


Figura 3. Interpolación de los espesores usando la herramienta "topo to raster" de la herramienta GlaRe.

GlaRe

Herramienta GIS (Pellitero *et al.*, 2016), que reconstruye de manera semiautomática la geometría tridimensional de paleoglaciares (en este artículo todos los escenarios de los años anteriores a 2018), con base en la topografía basal calculada con la metodología GLABTOP y nuevas líneas de flujo propia para cada escenario. La herramienta requiere de tres elementos de entrada: por un lado, las líneas de flujo convertidos en centroides (donde se almacenarán los espesores generados); el DEM de la topografía basal; y por último, ya que el modelo no refleja la tensión generada por las paredes laterales del valle, se requirieron factores de forma a partir de evidencia del espesor del glaciar observado por imágenes de satélite, morrenas laterales y la geometría del valle, siguiendo la ecuación propuesta por Nye (1952), ajustando los espesores generados en el frente paleoglacial.

Método de estimación del valor económico de los servicios ecosistémicos

Para medir el valor del servicio ecosistémico de turismo y recreación se usó el método de precios de mercado, al ser el más conocido y permitir estimar valores de uso directo (MINAM, 2015). Se propone que al menos el valor del servicio ecosistémico sea igual al valor en que incurren a visitarlas; se ha establecido que por cada valor de entrada al parque Huascarán, el% corresponda al hielo presente dentro de la misma; vale

decir que ese monto sería el correspondiente al valor monetario del servicio ecosistémico (Segovia, 2014) de turismo que proveen toda el área superficial Parque Nacional Huascarán (Cordillera Blanca) y en equivalencia los glaciares presentes en ésta. El valor de la entrada en los últimos 10 años se mantuvo entre los S./15.00 para turistas nacionales y S./30.00 para turistas internacionales:

$$As = VPse \quad (1)$$

$$As \equiv Ag \quad (2)$$

Donde:

As: área superficial del parque Huascarán.

VPs: valor presente del servicio de turismo y recreación.

Ag: área glacial de la laguna Parón, como parte del Parque Nacional Huascarán.

Para la valoración monetaria de los glaciares presentes en el área de estudio se estableció que por cada valor de entrada al Parque Nacional Huascarán existe cierta cantidad de área superficial de los glaciares presentes en la cuenca Parón; es decir, que esta cantidad de glaciar sería la correspondiente al valor monetario del servicio ecosistémico de turismo y recreación que se ha perdido por el retroceso de los glaciares. Por lo

tanto, el valor de la tasa de deglaciación por pérdida del servicio ecosistémico sería igual al% de pérdida de área superficial en el periodo 2009-2018:

$$VTD = \% Agp \times VPse \quad (3)$$

Donde:

VTD: valor de la tasa de deglaciación por pérdida del servicio ecosistémico.

VPse: valor presente del servicio de turismo y recreación.

Agp: área glacial retrocedido en la cuenca Parón de 2009 a 2018.

El cálculo del valor monetario del servicio ecosistémico de "aprovisionamiento de flujo hídrico continuo" se estimó con base en el caudal medio anual expresado en metros cúbicos por segundo (m^3/s) que aportan los glaciares de la cuenca Parón-Parque Nacional Huascarán (Cordillera Blanca), y el precio de los mercados de derechos de agua están de acuerdo con el Decreto Supremo que aprueba valores de retribuciones económicas a pagar por uso de agua superficial (El Peruano, 2018):

$$VSE_{FHC} = Pr \times QM_{AG} \quad (4)$$

Donde:



VSE_{FHC} = valor servicio ecosistémico de flujo hídrico continuo.

Pr = precio DAA no consuntivo.

QM_{AG} = caudal medio anual de aporte glaciar (m^3/s).

Estimación del valor económico por el retroceso glaciar

Se estimó el valor monetario a partir de precios reales de los servicios ecosistémicos de "Turismo y Recreación", "Almacenaje de Agua" y "Flujo Hídrico Continuo" del retroceso glaciar en la cuenca Parón. Para esto, se calcularon los valores anuales (beneficios económicos anuales) por estar dentro de un sitio protegido; los servicios ecosistémicos valorados por la pérdida glaciar mantendrán dichos servicios por un periodo de tiempo definido. Además, para obtener el valor presente (VP) de los servicios ecosistémicos valorados se utilizó una tasa social de descuento del 8% (MINJUS, 2017), que se considera para proyectos sociales del Ministerio de Justicia Peruano:

$$Fi = Pi \times (1 + r)^T \quad (5)$$

Donde:

Fi = valor inicial del flujo de dicho servicio i (beneficio económico anual).

Pi = valor presente de los flujos, el valor de *stock* del servicio.

T = tiempo.

r = tasa de descuento constante de todo el periodo (8%).

Resultados y discusión

Variación de las características del glaciar

Delimitación glaciar

El comportamiento de los glaciares en la cuenca Parón durante este periodo de 10 años debe inferirse al retroceso de la cobertura superficial del glaciar sufrido por la Cordillera Blanca, que se ha acelerado desde 1987 (Burns & Nolin, 2014), y teniendo en cuenta que las observaciones de Georges (2004), ya estimaban un aumento del 1% en la tasa de pérdida glaciar por año desde 1987 hasta 1996 en la Cordillera Blanca.

El cálculo de la extensión para cada periodo analizado en este trabajo se presenta en la Figura 4.

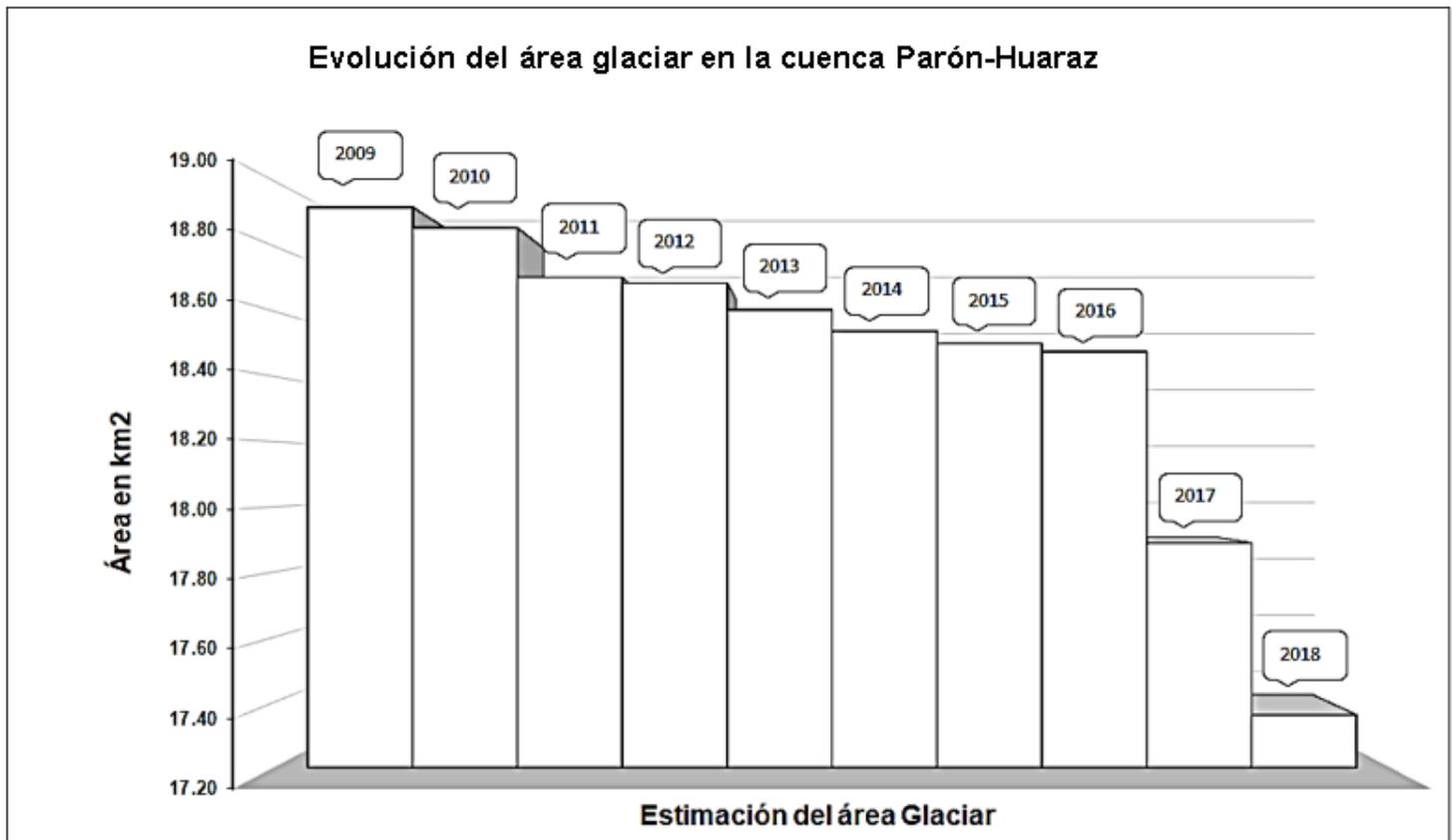


Figura 4. Comparación de reducción de las áreas glaciares entre 2009 y 2018 en la cuenca Parón.

Todos estos resultados solo han considerado masas de hielo descubiertas donde la extensión glaciaria de la cuenca Parón para 2009 cubrió un área de 18.82 km², mientras que para 2018 se redujo a 18.48 km². Esto significó una pérdida de ~1.82% del área glaciaria y puede traducirse en una tasa de deglaciación (km²/año) mínima desde 0.02 y máxima de 0.08 desde 2009-2018, lo cual significa que la tasa de deglaciación en los últimos 10 años se mantiene constante (Figura 5).

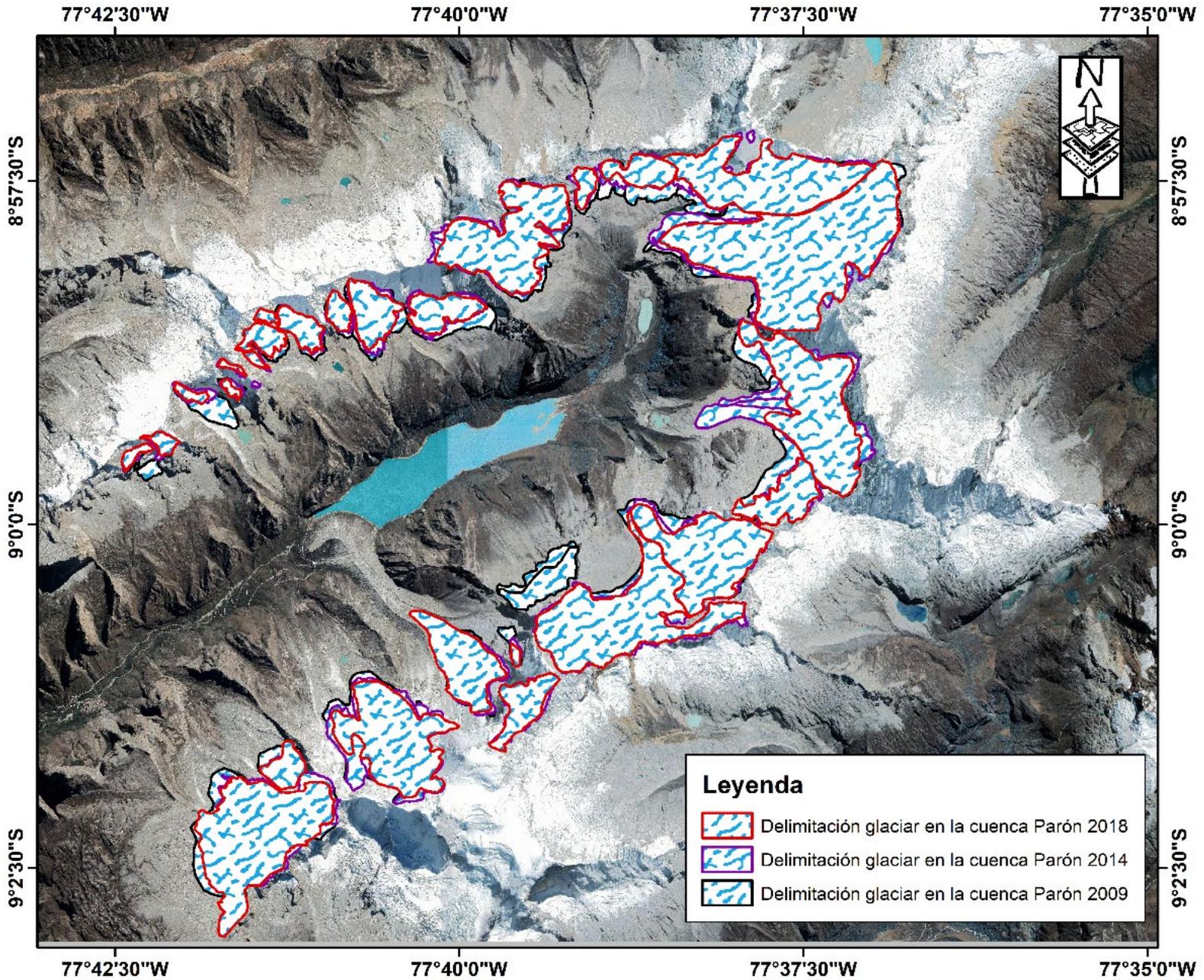


Figura 5. Modelo satelital de retroceso de la cobertura glaciar entre 2009 y 2018.

Así, nuestras estimaciones de cambio glaciar están alineadas con trabajos importantes (Burns & Nolin, 2014) que coinciden en un aceleramiento en la pérdida de superficie glaciar de la Cordillera Blanca desde 1970, donde pasó de 723 a 482 km².

Reconstrucción 3D de la geometría de glaciares y paleoglaciares

Deducir en cuánto se ha reducido el área glaciar en términos de área en cierto modo puede ser engañoso, pues al verse en un plano de 2D no es posible percibir cómo ha sido la variación del volumen de agua en estado sólido, ya que se desconocen los espesores que estarían desapareciendo. Por tal motivo, esta investigación aplica novedosos modelamientos numéricos que pueden dar un indicio de la manera en que están evolucionando las masas glaciares. Cabe mencionar que, de los glaciares delimitados, el mayor rango de espesores oscila entre 20 y 40 m, pero la gran diferencia radica en la prevalencia de las masas de hielo de mayor espesor (Figura 6). Es decir, la diferencia del volumen glaciar de 2009 se mantenía con mayor potencia; mientras que para el 2018 se ha visto afectada.

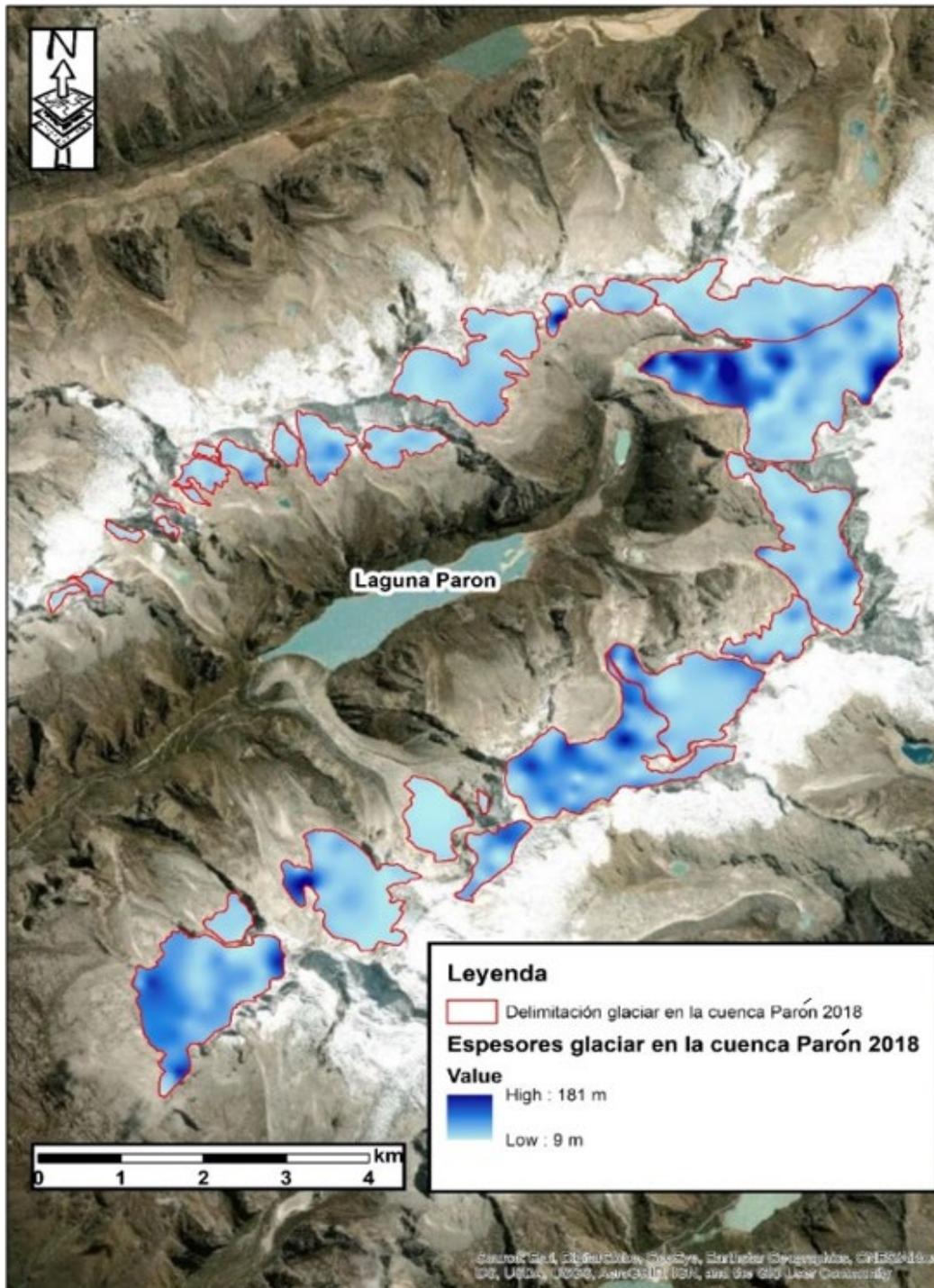


Figura 6. Modelo satelital de reconstrucción 3D de la pérdida del volumen glaciar entre 2009 y 2018.

Las distribuciones de los espesores revelan que en los glaciares del año 2018 (espesor máximo = 180 m en el nevado Artesonraju) predominaban los espesores entre 20 y 40 m. Estos espesores abarcan el 68% del área glaciara, representando $\sim 11 \text{ km}^2$. Los mayores espesores se encuentran en específico en el nevado Artesonraju (espesores máximos de 180 m y mayores a los 100 m). Ello se explica por el hecho de que este nevado se considera como un campo de hielo; es decir, donde la pendiente es baja. En los glaciares de 2009, si bien es cierto de todos modos predominan los espesores entre 20 y 40 m (66% \times 12 km^2), aún se mantenían espesores entre 40 y 60 m (por lo menos un 12% más en comparación con el año 2018).

Por ejemplo, Colonia *et al.* (2017) estimaron mediante esta metodología de reconstrucción 3D las posibles formaciones de lagunas a lo largo de los Andes peruanos. Este trabajo es excelente indicador de las zonas con mayor espesor a nivel regional, pero a nivel local pierde precisión. Uno de los inconvenientes que presenta es que el DEM de entrada tiene una resolución de 90 m. Por su parte, Torres *et al.* (2014) calcularon el volumen total de los Andes peruanos con base en dos enfoques: área-volumen y pendiente-espesor, siendo de 35 y 34.39 km^3 , respectivamente. Estos resultados también se han basado en DEM de baja resolución (60 m), que sirven para estimaciones a gran escala, pero que no permiten obtener una topografía basal detallada necesaria para reconstrucción de los paleoglaciares; pero que, a nivel local, en comparación con los estimados en este trabajo, los resultados son

próximos. Básicamente, estas pequeñas diferencias se ligan con el procesamiento y los datos de entrada (Figura 7).

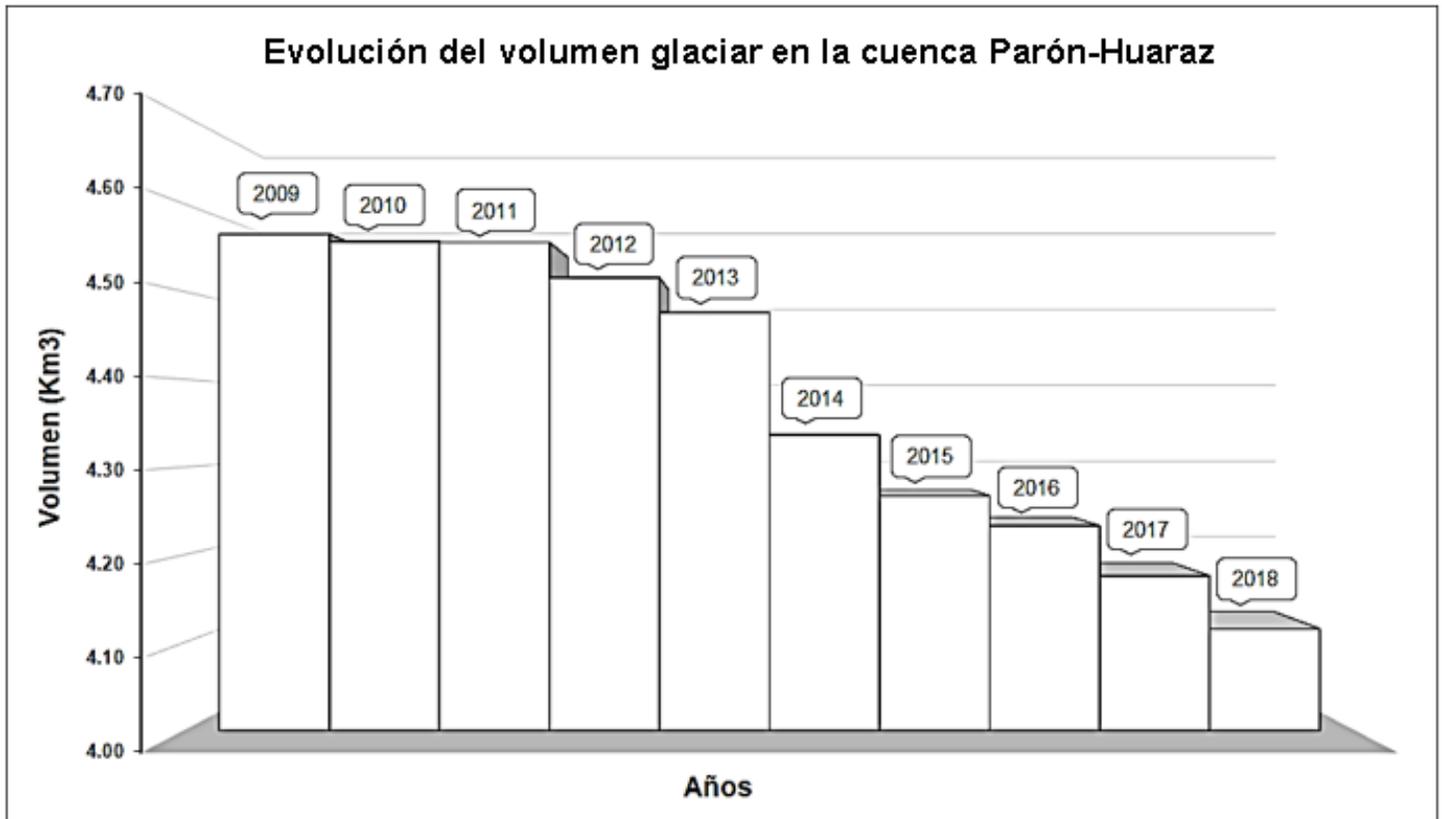


Figura 7. Reducción del volumen glaciar en la cuenca Parón 2009-2018.

De los glaciares de 2009, se tiene un 1.8% más de espesores entre los 40 y 60 m, en comparación con los glaciares en 2018, con 1.02 km³ perdidos, con una tasa máxima de 0.14 km³/año. Tal diferencia entre estos escenarios muestra que a pesar de tener una baja tasa de deglaciación en referencia al área estimada, se puede deducir que el

mejor indicador es la reconstrucción 3D, pues permite observar qué potencial de volumen de hielo se ha perdido en esa área.

Análisis del valor del servicio ecosistémico asociado con el retroceso glaciar

Valoración del servicio ecosistémico de turismo y recreación

El turismo en la Cordillera Blanca, la cadena montañosa más alta de los Andes peruanos, ha tenido un gran desarrollo en los últimos 30 años debido a la visita de turistas nacionales y extranjeros (Grötzbach, 2003). El Parque Nacional del Huascarán es el mayor parque con afluencia turística en la Cordillera Blanca, al promover muchas actividades locales, influyendo aspectos de la realidad ambiental, social, económica y turística de la región (Maguiña, Angulo, Gonzales, & López, 2020).

La cantidad total de visitantes al Parque Nacional Huascarán en los últimos 10 años (2009-2018) fue de 990 306 personas para el turismo nacional y de 320 065 turistas extranjeros, presentando una tendencia de crecimiento anual (Figura 8a). Existen más de 100 complejos turísticos de glaciares de montaña conocidos en el mundo que operan como atracciones naturales especiales (Wang, Zhao, & He, 2012); entre los más importantes está el Parque Nacional Huascarán, donde en los años posteriores a 2014, el turismo glaciar en las diferentes cuencas se ha desarrollado y operado con éxito, obteniendo altos beneficios económicos (Izaguirre, 2021).

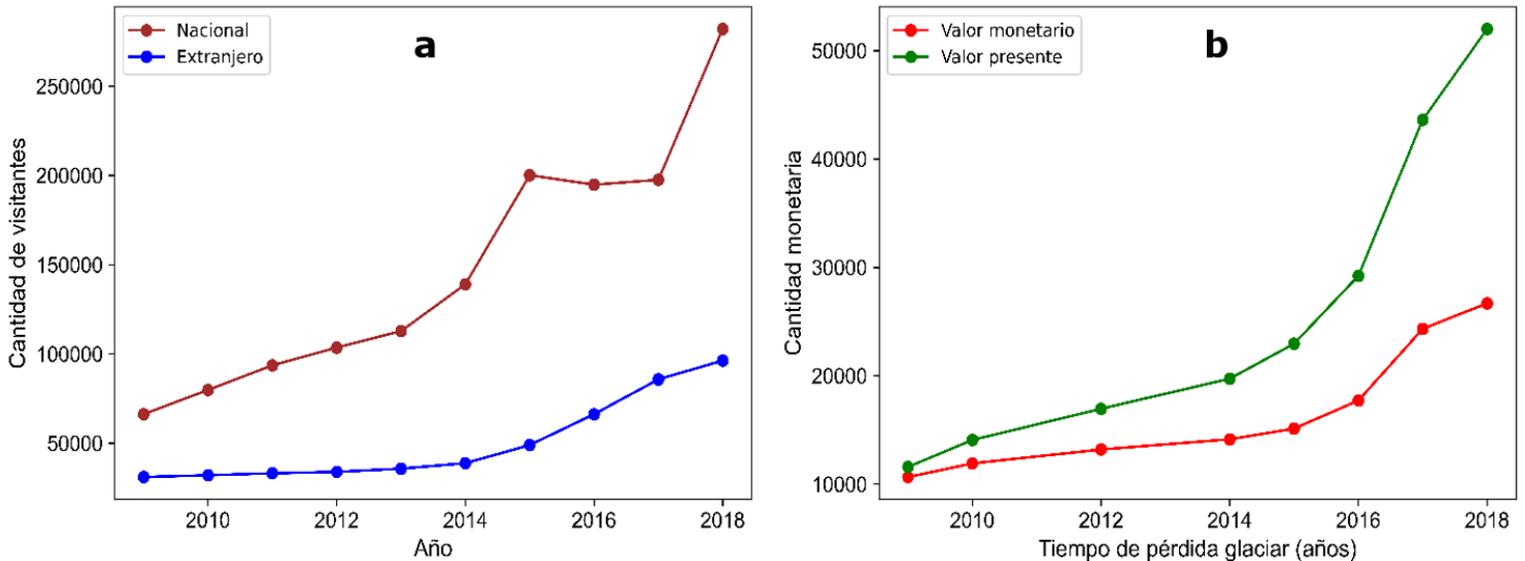


Figura 8. Variación del turismo y el valor económico del retroceso glaciér de la cuenca Parón (2009-2018). Lado izquierdo (a): cantidad de visitantes por año. Lado derecho (b): variación del ingreso monetario en función del retroceso glaciér.

Con el rápido crecimiento de la economía mundial, la accesibilidad al transporte y la creciente demanda de visitantes el turismo ha mejorado y aumentado de forma considerable, posicionándose con un promedio de 163 796.375 visitantes por año, siendo un ingreso medio en comparación con la tendencia mundial de otros lugares turísticos de glaciér de alta montaña, como por ejemplo el parque nacional de "Glacier Bay" (Alaska), con 400 000 visitantes por año (Pirhalla, Gende, & Mölders, 2014); glaciares de Athabasca (Canadá), con 600 000 visitantes por año; parque nacional de Glaciares (Argentina), con 167 000 visitantes por año; parque

nacional "Glaciar Jostedal" (Noruega), con 40 000 visitantes por año (Welling, Árnason, & Ólafsdottír, 2015), y Glaciar "Franz Jozef" (Nueva Zelanda), con 346 000 visitantes por año (Purdie, 2013).

La Figura 8b muestra que el valor económico se está perdiendo cada vez que exista una disminución del área glaciar en Parón; se reconoce que el retroceso glaciar repercute de manera significativa en el turismo y la recreación (Vuille *et al.*, 2018), reduciendo el número de visitantes en ciudades dependientes del turismo (Purdie, Gomez, & Espiner, 2015), y afectando de forma progresiva el valor económico de la cuenca de Parón que pueda ofrecer como servicio ecosistémico.

El método de valoración de preferencias personales con base en precios reales usados para calcular el valor monetario del servicio ecosistémico de turismo y recreación arrojó que del total equivalente al área superficial perdida por el retroceso glaciar entre 2009 y 2018 en el interior del Parque Nacional Huascarán, presenta un valor económico total de s./133 788.19 (equivalente a \$33 122.46 dólares, a una tasa de cambio de 4.04), que actualizando al valor presente a una tasa de 8% corresponde un valor de S/210 156.82 (equivalente a \$ 52 029.34) (Tabla 2); esto muestra que existe un incremento anual del valor monetario que se pierde por el retroceso glaciar. Estudios como el de Zhang, Zhuoran y Seenprachawong (2015) estimaron que la valorización monetaria anual de los glaciares en Mt. Yulong, Yunnan, China, para los turistas fue de \$500 millones, mientras que investigaciones llevadas a cabo al glaciar El Morado en Chile (Segovia, 2014) muestra valores monetarios de \$25 554 anuales, con valores más cercanos a los obtenidos

en este estudio, lo que indica que el valor de los glaciares para el sector turístico es sustancial.

Tabla 2. Flujos anuales de la cantidad monetaria del servicio ecosistémico de turismo y recreación en la cuenca Parón.

Núm.	Año	Nacionales	Extranjeros	Total valor monetario anual al Parque Huascarán	Área superficial pérdida	Total de valor de la deglaciación anual (S./ / m ² /año)	
						Valor monetario	Valor presente
1	2009	66278	31071	S/1,926,300.00	18819080.00	S/10,662.12	S/11,589.26
2	2010	79852	32067	S/2,159,790.00	18755666.21	S/11,914.21	S/14,076.33
3	2012	93635	33185	S/2,400,075.00	18704096.37	S/13,203.30	S/16,955.83
4	2014	103584	33950	S/2,572,260.00	18686107.44	S/14,136.92	S/19,733.47
5	2015	112818	35758	S/2,765,010.00	18604096.37	S/15,129.56	S/22,955.53
6	2016	139063	38799	S/3,249,915.00	18538561.70	S/17,720.22	S/29,224.17
7	2017	200189	48971	S/4,471,965.00	18500997.58	S/24,334.06	S/43,621.42
8	2018	194887	66264	S/4,911,225.00	18475738.22	S/26,687.80	S/52,000.81

Valoración del servicio ecosistémico de provisión de flujo hídrico

La deglaciación como parte de la dinámica natural de la criósfera cumple una función de aprovisionamiento para cubrir una demanda social-ecológica y puede plantear nuevos desafíos para las sociedades (Zhang *et al.*, 2021b). El uso de la provisión de flujo hídrico por la deglaciación

no solo se refleja en una contribución anual, sino también estacional, que actualmente viene sufriendo alteraciones por el cambio climático.

El servicio de provisión de flujos hídricos está sujeto a un incremento de temperaturas por el cambio climático, el cual genera un excedente de deshielo aumentando el flujo hídrico en la cuenca y una disminución del permafrost en la capa de hielo (Sotillo, 2017). El permafrost (suelos congelados de manera permanente) es escaso en la Cordillera Blanca, por lo que el descongelamiento por el aumento de temperatura ocasiona un incremento del servicio de provisión de flujo hídrico en las diferentes cuencas (Iparraguirre *et al.*, 2020), dando lugar de esta manera a servicio inusual de incrementos de flujos hídricos.

En la Tabla 3 se muestra que el valor económico del servicio ecosistémico provisión de flujo hídrico por la dinámica natural del permafrost más la deglaciación por el cambio climático de la cuenca Parón en los últimos 10 años fue de S./7,762,276.36, con un valor presente de S./ 12 981 563.18 (equivalente a \$3 213 258.21, con una tasa de cambio de 4.04) a 8% de tasa de descuento.

Tabla 3. Flujos anuales del valor monetario que se deja de percibir por el servicio ecosistémico de provisionamiento de flujo hídrico por tipo de uso en la cuenca Parón.

Núm.	Año	Flujos descargados por los glaciares (m ³ /año)	Tipo de derecho de uso de agua superficial	Retribuciones económicas a pagar por el uso de agua (S./ /m ³)	Total de valor de la deglaciación anual (S./ / m ³ /año)	
					Valor monetario	Valor presente
1	2009	4565299.84	Poblacional	S/0.0050	S/22,826.50	S/24,811.41
			Industrial*	S/0.0792	S/361,571.75	S/393,012.77
			Minero	S/0.1017	S/464,290.99	S/504,664.12
			Otros usos**	S/0.0330	S/150,654.89	S/163,755.32
2	2010	4556897.77	Poblacional	S/0.0050	S/22,784.49	S/26,919.29
			Industrial*	S/0.0792	S/360,906.30	S/426,401.59
			Minero	S/0.1017	S/463,436.50	S/547,538.40
			Otros usos**	S/0.0330	S/150,377.63	S/177,667.33
4	2012	4555888.81	Poblacional	S/0.0050	S/22,779.44	S/31,797.41
			Industrial*	S/0.0792	S/360,826.39	S/503,671.05
			Minero	S/0.1017	S/463,333.89	S/646,759.42
			Otros usos**	S/0.0330	S/150,344.33	S/209,862.94
6	2014	4515760.89	Poblacional	S/0.0050	S/22,578.80	S/37,236.94
			Industrial*	S/0.0792	S/357,648.26	S/589,833.12
			Minero	S/0.1017	S/459,252.88	S/757,399.35
			Otros usos**	S/0.0330	S/149,020.11	S/245,763.80

Núm.	Año	Flujos descargados por los glaciares (m ³ /año)	Tipo de derecho de uso de agua superficial	Retribuciones económicas a pagar por el uso de agua (S./ /m ³)	Total de valor de la deglaciación anual (S./ / m ³ /año)	
					Valor monetario	Valor presente
7	2015	4475986.41	Poblacional	S/0.0050	S/22,379.93	S/40,118.43
			Industrial*	S/0.0792	S/354,498.12	S/635,475.99
			Minero	S/0.1017	S/455,207.82	S/816,008.95
			Otros usos**	S/0.0330	S/147,707.55	S/264,781.66
8	2016	4333027.11	Poblacional	S/0.0050	S/21,665.14	S/42,214.22
			Industrial*	S/0.0792	S/343,175.75	S/668,673.28
			Minero	S/0.1017	S/440,668.86	S/858,637.28
			Otros usos**	S/0.0330	S/142,989.89	S/278,613.87
9	2017	4267081.52	Poblacional	S/0.0050	S/21,335.41	S/45,186.69
			Industrial*	S/0.0792	S/337,952.86	S/715,757.12
			Minero	S/0.1017	S/433,962.19	S/919,097.21
			Otros usos**	S/0.0330	S/140,813.69	S/298,232.13
10	2018	4190433.90	Poblacional	S/0.0050	S/20,952.17	S/48,233.72
			Industrial*	S/0.0792	S/331,882.36	S/764,022.07
			Minero	S/0.1017	S/426,167.13	S/981,073.79
			Otros usos**	S/0.0330	S/138,284.32	S/318,342.53

Estudios como los de Jeong, Sushama y Naveed-Khaliq (2017) muestran que en el hemisferio norte la masa promedio de la capa de nieve disminuye a un ritmo de 10.2 Mt por año, o disminuye en 0.3% por año por un efecto del calentamiento global. Así también, proyectando al 2030

los efectos del cambio climático, el valor de las pérdidas de la capa de nieve en el oeste de China se reduciría en CN¥2.9 mil millones (Wu *et al.*, 2021). Tales investigaciones sugieren que el cambio climático está afectando a todos los glaciares en el mundo y tendrá un efecto directo sobre los valores económicos de los servicios ecosistémicos.

Efectos directos como los mostrados en este estudio también se presentan en los glaciares de las regiones de Quilian (China), donde muestran que el valor del servicio de provisión de agua de deshielo de los glaciares a la esorrentía de los ríos fue de 8 072 millones de yuanes, equivalente al 33% (\$1 277 millones de dólares); el valor del servicio del suministro de agua dulce fue de 844 millones de yuanes (\$133 millones de dólares) (Sun *et al.*, 2020).

Algunos estudios como en Latinoamérica, como el de Segovia (2014), muestran que el valor presente del servicio ecosistémico de flujo hídrico continuo de los glaciares del monumento natural El Morado, Chile, es de clp\$2 327 683 926 (\$15.53 millones de dólares) y el valor anual de este servicio con una tasa de descuento del 6% llega a clp\$139 661 036 (\$175 mil dólares). Dicho estudio es el más cercano a la realidad presente en la cuenca de Parón; los valores económicos no se encuentran tan alejados como los presentados por Wu *et al.* (2021) y Sun *et al.* (2020).

Sobre el servicio de provisión de flujo hídrico es necesario enfatizar que el costo del agua se basa en los precios del mercado por su tipo de uso. En general, el costo por el empleo de agua en el Perú se refleja en función de la utilización minera, urbana, rural e industrial. Como se muestra en la Figura 9, el valor presente del servicio ecosistémico de provisión de flujo hídrico en el sector industrial o minero tiene los más

altos valores, a diferencia a los otros tipos de uso. De forma similar, el estudio de Zhang *et al.* (2021b) reporta que el valor económico anual promedio de los usos del agua para la agricultura, servicios, uso urbano y la industria se estimó en 1.7, 4.4, 9.9 y 15.7 millones de yuanes, respectivamente, siendo el sector industrial el de mayor consumo.

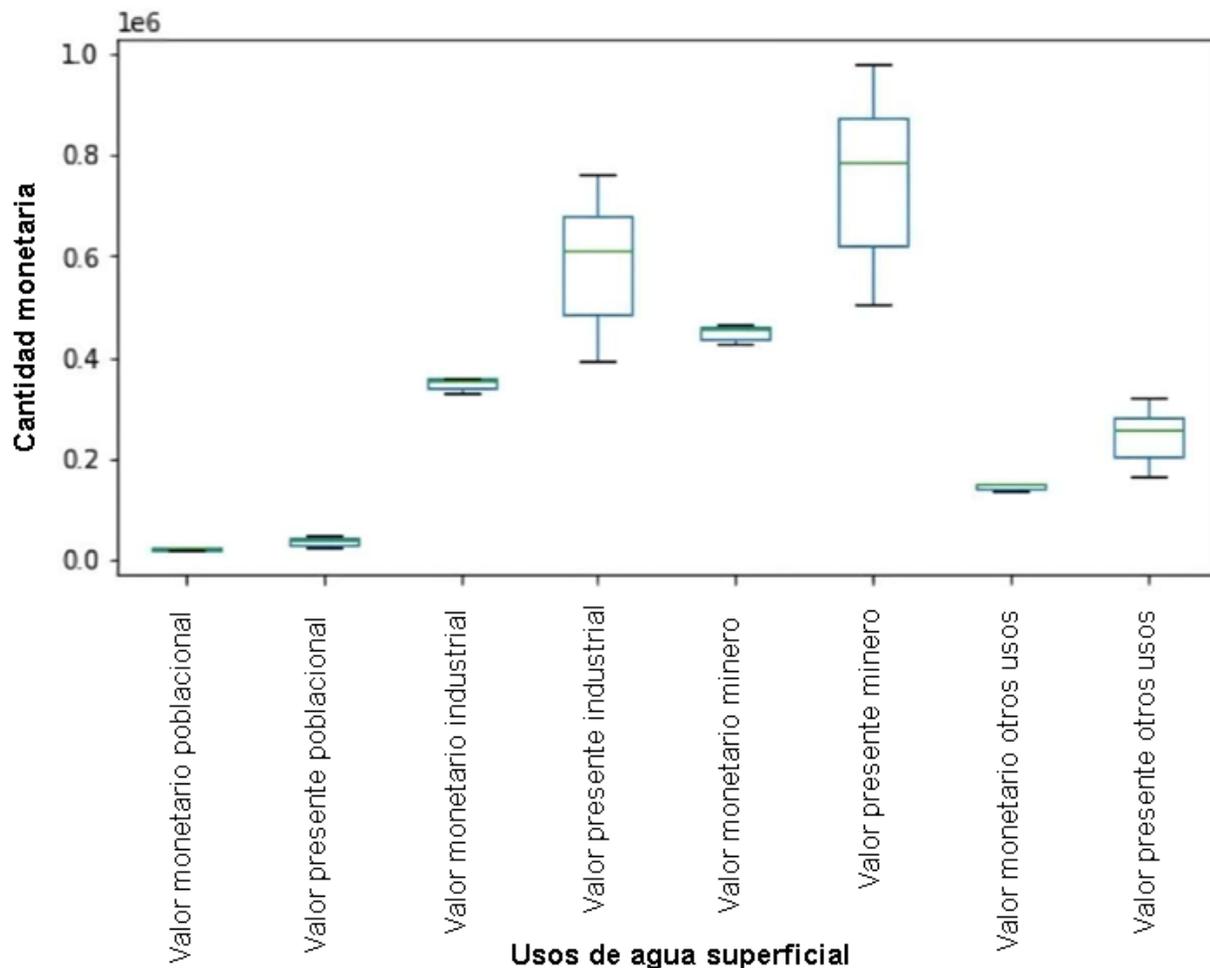


Figura 9. Variabilidad del valor económico del servicio ecosistémico de provisionamiento de flujo hídrico según el tipo de uso en la cuenca Parón.

Conclusiones

Esta investigación presenta la pérdida glaciaria en la cuenca Parón (Cordillera Blanca), cuyo retroceso influye directamente sobre los servicios ecosistémicos asociados con los recursos hídricos. La cuenca Parón se caracteriza por el servicio de turismo/recreación y el de aprovisionamiento de flujos hídricos, presentando una alta valoración económica que ha crecido en los últimos años (2009-2018).

La cuenca Parón en 2009 cubrió un área de 18.82 km², mientras que para 2018 se redujo a 18.48 km². Ello significó una baja de ~1.82% del área glaciaria y puede traducirse en una tasa de deglaciación (km²/año) mínima desde 0.02 y máxima de 0.08 desde 2009-2018. De igual manera, de los glaciares de 2009, se tiene un 1.8% más de espesor entre los 40 a 60 m, en comparación con los glaciares en 2018, con 1.02 km³ perdidos, con una tasa máxima de 0.14 km³/año. Estos resultados evidencian un efecto del cambio climático sobre la cuenca de Parón.

Se calculó el valor económico del servicio ecosistémico de turismo y recreación usando el método de valoración de preferencias personales con base en precios reales. Los resultados muestran la cantidad monetaria que se deja de percibir por el retroceso del área glaciaria superficial entre 2009 y 2018 en el interior del Parque Nacional Huascarán, que es de s./133 788.19 (equivalente a \$33 122.46 dólares, a una tasa de cambio

de 4.04), que actualizando al valor presente a una tasa de 8% corresponde un valor de S/210 156.82 (equivalente a \$52 029.34).

El valor económico correspondiente de los servicios de aprovisionamiento de flujo hídrico en los diferentes uso de aguas (poblacional, industrial, minero, otros usos) generado por el agua de deshielo de la cuenca de Parón entre 2009 y 2018 fue de S./7 762 276.36 con un valor presente de S./12 981,563.18 (equivalente a \$ 3 213 258.21, con una tasa de cambio de 4.04) a una tasa de 8%.

Si bien fue complejo capturar los valores de los servicios del retroceso glaciar en la cuenca en términos económicos, se muestra que el servicio de provisión de flujos hídricos tiene un mayor valor monetario que el de recreación y turismo, por lo que se sugiere que el cambio climático asociado con la deglaciación está generando una pérdida del valor hídrico que no está siendo aprovechada. Se recomienda incrementar la inversión en programas sobre la red hídrica de la cuenca de Parón, como mayores servicios, usos poblacionales o industriales.

Referencias

- Bahr, D. B., Meier, M. F., & Peckham, S. D. (1997). The physical basis of glacier volume-area scaling. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 102(B9), 20355-20362.
- Boyano, P. (2016). Servicios ecosistémicos de la criósfera y los páramos de la Cordillera Blanca, Perú. *Boletín del Colegio de Geógrafos del Perú*, 3, 1-20.

- Burns, P., & Nolin, A. (2014). Using atmospherically-corrected Landsat imagery to measure glacier area change in the Cordillera Blanca, Peru from 1987 to 2010. *Remote Sensing of Environment*, 140, 165-178.
- Bury, J. T., Mark, B. G., McKenzie, J. M., French, A., Baraer, M., Huh, K. I., Luyo, M. A. Z., & López, R. J. G. (2011). Glacier recession and human vulnerability in the Yanamarey watershed of the Cordillera Blanca, Peru. *Climatic Change*, 105(1-2), 179-206.
- Chen, J., & Ohmura, A. (1990). Estimation of Alpine glacier water resources and their change since the 1870s. *IAHS Publications*, 193, 127-135.
- Cogley, J. G., Hock, R., Rasmussen, L. A., Arendt, A. A., Bauder, A., Braithwaite, R. J., Jansson, P., Kaser, G., Möller, M., & Nicholson, L. (2011). Glossary of glacier mass balance and related terms. *IHP-VII Technical Documents in Hydrology*, 86(2), 1-124. Recuperado de https://wgms.ch/downloads/Cogley_etal_2011.pdf
- Colonia, D., Torres, J., Haeberli, W., Schauwecker, S., Braendle, E., Giraldez, C., & Cochachin, A. (2017). Compiling an inventory of glacier-bed overdeepenings and potential new lakes in de-glaciating areas of the Peruvian Andes: approach, first results, and perspectives for adaptation to climate change. *Water*, 9(5), 336.
- Das, N. R. (2009). Human Development Report 2007/2008 Fighting Climate Change: Human Solidarity in a Divided World, UNDP, New York. *Social Change*, 39(1), 154-159.

- El Peruano. (2018). *Decreto Supremo N° 014-2018-MINAGRI -Valores de retribuciones económicas a pagar por uso de agua superficial y subterránea y por el vertimiento de agua residual tratada a aplicarse en el año 2019.* Recuperado de <https://www.gob.pe/institucion/midagri/normas-legales/239331-014-2018-minagri>
- Farinotti, D., Brinkerhoff, D. J., Clarke, G. K. C., Fürst, J. J., Frey, H., Gantayat, P., Gillet-Chaulet, F., Girard, C., Huss, M., & Leclercq, P. W. (2017). How accurate are estimates of glacier ice thickness? Results from ITMIX, the ice thickness models intercomparison experiment. *The Cryosphere*, 11(2), 949-970.
- Farinotti, D., Huss, M., Bauder, A., Funk, M., & Truffer, M. (2009). A method to estimate the ice volume and ice-thickness distribution of alpine glaciers. *Journal of Glaciology*, 55(191), 422-430.
- Farinotti, D., King, E. C., Albrecht, A., Huss, M., & Gudmundsson, G. H. (2014). The bedrock topography of Starbuck Glacier, Antarctic Peninsula, as determined by radio-echo soundings and flow modeling. *Annals of Glaciology*, 55(67), 22-28.
- Frey, H., Machguth, H., Huss, M., Huggel, C., Bajracharya, S., Bolch, T., Kulkarni, A., Linsbauer, A., Salzmann, N., & Stoffel, M. (2014). Estimating the volume of glaciers in the Himalayan-Karakoram region using different methods. *The Cryosphere*, 8(6), 2313-2333.
- Georges, C. (2004). 20th-century glacier fluctuations in the tropical Cordillera Blanca, Peru. *Arctic, Antarctic, and Alpine Research*, 36(1), 100-107.

- Grima, N., & Campos, N. (2020). A farewell to glaciers: Ecosystem services loss in the Spanish Pyrenees. *Journal of Environmental Management*, 269, 110789.
- Grinsted, A. (2013). An estimate of global glacier volume. *The Cryosphere*, 7(1), 141-151.
- Grötzbach, E. (2003). Tourism in the Cordillera Blanca Region, Peru. *Revista Geográfica*, 133, 53-72.
- Haimayer, P. (1989). Glacier-skiing areas in Austria: A socio-political perspective. *Mountain Research and Development*, 9(1), 51-58.
- Heikkinen, A. (2017). Climate change in the Peruvian Andes: A case study on small-scale farmers' vulnerability in the Quillcay River Basin. *Iberoamericana – Nordic Journal of Latin American and Caribbean Studies*, 46(1), 77-88. Recuperado de <https://doi.org/10.16993/iberoamericana.211>
- Hijioka, Y., Lin, E., Pereira, J. J., Corlett, R. T., Cui, X., Insarov, G. E., Lasco, R. D., Lindgren, E., & Surjan, A. (2014). Asia. Climate change 2014: *Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Part B: Regional aspects. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* (pp. 1327-1370). Cambridge, UK, and New York, USA: Cambridge University Press.

- Iparraquirre, J. E., Úbeda, J., Concha, R. F., Pellitero, R., De-Marcos, F. J., Dávila, L., Vásquez, P., Gómez, J., & Araujo, J. E. (2020). Paleoclimatic reconstruction during the Little Ice Age in the Llanganuco Basin, Cordillera Blanca (Peru). *EGUGA*, 1726. Recuperado de <https://doi.org/10.5194/egusphere-egu2020-1726>
- Izaguirre, M. F. (2021). *Impactos del retroceso glaciar y disponibilidad hídrica en la subcuenca Illullán-Parón, cuenca del río Santa*. Lima, Perú: Pontificia Universidad Católica del Perú.
- James, W. H. M., & Carrivick, J. L. (2016). Automated modelling of spatially-distributed glacier ice thickness and volume. *Computers & Geosciences*, 92, 90-103.
- Jeong, D. I., Sushama, L., & Naveed-Khaliq, M. (2017). Attribution of spring snow water equivalent (SWE) changes over the northern hemisphere to anthropogenic effects. *Climate Dynamics*, 48(11), 3645-3658.
- Jia, Y., Li, Z., Jin, S., Xu, C., Deng, H., & Zhang, M. (2020). Runoff changes from Urumqi Glacier No. 1 over the Past 60 Years, Eastern Tianshan, Central Asia. *Water*, 12(5), 1286.
- Kaser, G., Ames, A., & Zamora, M. (1990). Glacier fluctuations and climate in the Cordillera Blanca, Peru. *Annals of Glaciology*, 14, 136-140.
- Kaser, G., & Osmaston, H. (2002). *Tropical glaciers*. Cambridge, UK: Cambridge University Press.

- Li, H., Ng, F., Li, Z., Qin, D., & Cheng, G. (2012). An extended “perfect-plasticity” method for estimating ice thickness along the flow line of mountain glaciers. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, 117(F1). Recuperado de <https://doi.org/10.1029/2011JF002104>
- Liekens, I., Broekx, S., Smeets, N., Staes, J., Van-der-Biest, K., Schaafsma, M., De-Nocker, L., Meire, P., & Cerulus, T. (2013). The ecosystem services valuation tool and its future developments environmental impact assessment review. In: *Ecosystem services: Global issues, local practices*. Ámsterdam, The Netherlands: Elsevier. Recuperado de <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-419964-4.00019-6>
- Linsbauer, A, Paul, F., Hoelzle, M., Frey, H., Haeberli, W., & Purves, R. S. (2009). The Swiss Alps without glaciers—a GIS-based modelling approach for reconstruction of glacier beds. In: Purves, Ross S et al. *Proceedings of Geomorphometry 2009* (pp. 243-247). Zurich, Switzerland: Department of Geography, University of Zurich. DOI: 10.5167/uzh-27834
- Linsbauer, A., Paul, F., & Haeberli, 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: Earth Surface*, 117(F3). Recuperado de <https://doi.org/10.1029/2011JF002313>
- Lüthi, M., Walter, F., Jouvett, G., & Werder, M. (2006). *Physics of glaciers (Versuchsan)*. Bern, Switzerland: Geographisches Institut, Universität Bern.

- Maguiña, M. E., Angulo, H. G., Gonzales, J. E., & López, M. A. (2020). Tourist support in Llanganuco Lagoon-Huascarán National Park, Perú. *RIAT: Revista Interamericana de Medioambiente y Turismo*, 16(1), 15-22.
- Mark, B. G., & Seltzer, G. O. (2003). Tropical glacier meltwater contribution to stream discharge: a case study in the Cordillera Blanca, Peru. *Journal of Glaciology*, 49(165), 271-281.
- Mark, B. G., & Seltzer, G. O. (2005). Evaluation of recent glacier recession in the Cordillera Blanca, Peru (AD 1962–1999): spatial distribution of mass loss and climatic forcing. *Quaternary Science Reviews*, 24(20-21), 2265-2280.
- Medina, G., & Mejía, A. (2014). Análisis multitemporal y multifractal de la deglaciación de la Cordillera Parón en los Andes de Perú. *Ecología Aplicada*, 13(1), 35-42.
- MINAM, Ministerio del Ambiente. (2015). *Manual de valoración económica del patrimonio natural*. Magdalena del Mar, Perú: Dirección General de Evaluación, Valoración y Financiamiento del Patrimonio.
- MINAM, Ministerio del Ambiente. (2016). *Guía de valoración económica y patrimonio cultural*. Magdalena del Mar, Perú: Ministerio del Ambiente.
- MINJUS, Ministerio de Justicia y Derechos Humanos. (2017). *RD-002-2017-EF-63.01-2, Tasa Social de Descuento*. Lima, Perú: Ministerio de Justicia y Derechos Humanos.

- Navarro, Á., Úbeda, J., Santillán, N., Dávila, L., Concha N, R. F., Cochachín, A., Gómez, J., Cruz, R., & Torres, L. (2017). *Reconstrucción de ELAAABI en glaciares de la cuenca Parón (Cordillera Blanca)*. Recuperado de <https://hdl.handle.net/20.500.12544/1065>
- Nye, J. F. (1952). The mechanics of glacier flow. *Journal of Glaciology*, 2(12), 82-93.
- 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*, 26(7), 1173-1190. DOI: 10.1080/13658816.2011.627859
- Pellitero, R., Rea, B. R., Spagnolo, M., Bakke, J., Ivy-Ochs, S., Frew, C. R., Hughes, P., Ribolini, A., Lukas, S., & Renssen, H. (2016). GlaRe, a GIS tool to reconstruct the 3D surface of palaeoglaciers. *Computers & Geosciences*, 94, 77-85.
- Pirhalla, M., Gende, S., & Mölders, N. (2014). Fate of particulate matter from cruise-ship emissions in Glacier Bay during the 2008 tourist season. *Journal of Environmental Protection*, 5(12), 1235.
- Purdie, H. (2013). Glacier retreat and tourism: Insights from New Zealand. *Mountain Research and Development*, 33(4), 463-472.
- Purdie, H., Gomez, C., & Espiner, S. (2015). Glacier recession and the changing rockfall hazard: Implications for glacier tourism. *New Zealand Geographer*, 71(3), 189-202.

- Rabatel, A., Francou, B., Soruco, A., Gomez, J., Cáceres, B., Ceballos, J. L., Basantes, R., Vuille, M., Sicart, J.-E., & Huggel, C. (2012). Current state of glaciers in the tropical Andes: A multi-century perspective on glacier evolution and climate change. *The Cryosphere*, 7(1), 81-102.
- Rabatel, A., Francou, B., Soruco, Á., Gomez, J., Cáceres, B., Ceballos, J. L., Basantes, R., Vuille, M., Sicart, J.-E., & Huggel, C. (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.
- Radić, V., & Hock, R. (2011). Regionally differentiated contribution of mountain glaciers and ice caps to future sea-level rise. *Nature Geoscience*, 4(2), 91-94.
- Rumbaur, C., Thevs, N., Disse, M., Ahlheim, M., Brieden, A., Cyffka, B., Duethmann, D., Feike, T., Frör, O., & Gärtner, P. (2015). Sustainable management of river oases along the Tarim River (SuMaRiO) in Northwest China under conditions of climate change. *Earth System Dynamics*, 6, 83-107.
- Schauwecker, S., Rohrer, M., Huggel, C., Endries, J., Montoya, N., Neukom, R., Perry, B., Salzmann, N., Schwarb, M., & Suarez, W. (2017). The freezing level in the tropical Andes, Peru: An indicator for present and future glacier extents. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 122(10), 5172-5189.

- Segovia, A. (2014). Caracterización glaciológica de Chile y valoración de servicios ecosistémicos de glaciares en base a mercados reales: estudio de caso del monumento natural El Morado. Memoria de Magíster. En: *Áreas silvestres y conservación de la naturaleza* (168 pp.). Santiago, Chile: Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Forestales y de la Conservación de la Naturaleza.
- Sotillo, D. B. (2017). Una breve descripción de los servicios ecosistémicos, hídricos y culturales de la Cordillera Blanca y su entorno. *Revista de Glaciares y Ecosistemas de Montaña*, 3, 14.
- Sun, M., Ma, W., Yao, X., Zhao, L., Li, Z., & Qin, D. (2020). Evaluation and spatiotemporal characteristics of glacier service value in the Qilian Mountains. *Journal of Geographical Sciences*, 30(8), 1233-1248.
- Torres, J., Colonia, D., Haeberli, W., Giráldez, C., Frey, H., & Huggel, C. (2014). Thicknesses and volumes of glaciers in the Andes of Peru estimated with satellite data and digital terrain information. EGU General Assembly Conference Abstracts. *Geophysical Research Abstracts*, 16, EGU2014-13759. Recuperado de <https://meetingorganizer.copernicus.org/EGU2014/EGU2014-13759.pdf>
- Urrutia, R., & Vuille, M. (2009). Climate change projections for the tropical Andes using a regional climate model: Temperature and precipitation simulations for the end of the 21st century. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 114(D2). Recuperado de <https://doi.org/10.1029/2008JD011021>

- Vuille, M., Carey, M., Huggel, C., Buytaert, W., Rabatel, A., Jacobsen, D., Soruco, A., Villacis, M., Yarleque, C., & Timm, O. E. (2018). Rapid decline of snow and ice in the tropical Andes—Impacts, uncertainties and challenges ahead. *Earth-Science Reviews*, 176, 195-213.
- Wang, S. J., Zhao, J. D., & He, Y. Q. (2012). Adaptative strategy of mountain glacier tourism under climate warming background-- A case study of Mt. Yulong Snow-Glacier-Geological Park. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 34(1), 207-213.
- Welling, J. T., Árnason, Þ., & Ólafsdóttir, R. (2015). Glacier tourism: A scoping review. *Tourism Geographies*, 17(5), 635-662.
- Wu, X., Wang, X., Liu, S., Yang, Y., Xu, G., Xu, Y., Jiang, T., & Xiao, C. (2021). Snow cover loss compounding the future economic vulnerability of western China. *Science of the Total Environment*, 755, 143025. Recuperado de <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.143025>
- Yap, A. (2015). *Análisis multitemporal de glaciares y lagunas glaciares en la Cordillera Blanca e identificación de potenciales amenazas GLOFs*. Lima, Perú: Pontificia Universidad Católica del Perú.
- Yuan, L., & Wang, S. (2018). Recreational value of glacier tourism resources: A travel cost analysis for Yulong Snow Mountain. *Journal of Mountain Science*, 15(7), 1446-1459.

- Zhang, W., Wang, X., Shen, Y.-P., Yang, X.-W., Wu, Y.-W., Chen, A.-A., Wu, X.-J., Liu, S.-W., Yang, Y., Zhang, J.-L., & Li, C.-Y. (2021a). Cryospheric water regime by its functions and services in China. *Advances in Climate Change Research*, 12(3), 430-443. Recuperado de <https://doi.org/10.1016/j.accre.2021.05.008>
- Zhang, X.-T., Chen, R.-S., Liu, G.-H., Yang, Y., & Feng, T.-W. (2021b). Economic value of freshwater provisioning services of the cryosphere in the Urumqi River, Northwest China. *Advances in Climate Change Research*, 12(6), 894-902. Recuperado de <https://doi.org/10.1016/j.accre.2021.09.003>
- Zhang, Zhengyong, Liu, L., He, X., Li, Z., & Wang, P. (2019). Evaluation on glaciers ecological services value in the Tianshan Mountains, Northwest China. *Journal of Geographical Sciences*, 29(1), 101-114.
- Zhang, Zhuoran, & Seenprachawong, U. (2015). Estimating recreational benefits of the glacier-based highland ecosystem. *AU Journal of Management*, 13(2), 1-10.