



Revisión de literatura para la estimación del volumen de lagunas glaciales en base a modelos empíricos

Literature review for estimating the volume of glacial lakes based on empirical models

 Fidel Aparicio Roque^{1*}

 Michellei Alvarez Benaute¹

¹Universidad Nacional Santiago Antúnez de Mayolo - Huaraz - Perú.

Recibido: 07 May, 2024 | Aceptado: 26 Jun, 2024 | 20 Jul.2024

Autor: de correspondencia*: daparcior@unasam.edu.pe

Como citar este artículo: Aparicio Roque, F., & Alvarez Benaute, M. Revisión de literatura para la estimación del volumen de lagunas glaciales en base a modelos empíricos. *Aporte Santiaguino*, 17(1). <https://doi.org/10.32911/as.2024.v17.n1.1153>

RESUMEN

El calentamiento global está provocando la recesión y adelgazamiento alarmante de glaciares de montaña a nivel mundial. Esto conlleva el riesgo directo de inundaciones explosivas de lagos glaciales (GLOF) que desencadenarían desastres como deslizamientos de tierra, que representa una amenaza significativa para la seguridad de la población, infraestructuras locales y numerosas pérdidas de vidas humanas. La investigación tuvo como objetivo recopilar hallazgos de publicaciones entre los años 2010 y 2023 a través de una revisión de literatura en las bases de datos Scopus, ScienceDirect y Researchgate. Según las directrices de Prisma, el proceso de revisión se segmentó en cuatro etapas preliminares: identificación, selección, evaluación e inclusión. Los resultados de volumen y área del lago están bien correlacionados $R^2 = 0.91$. Estos datos proporcionan una visión clara respecto de las metodologías para la estimación del volumen de lagunas. Se concluyó que las investigaciones ofrecen una visión profunda de las metodologías a lo largo de los años y han mejorado sus resultados teniendo correlaciones aceptadas. A su vez, proporcionan una base sólida para la estimación de volúmenes.

Palabras Clave: Estimación del volumen de lagunas glaciales; modelos empíricos; batimetría; GLOF.

ABSTRACT

Global warming is causing the recession and alarming thinning of mountain glaciers worldwide; this carries the direct risk of glacial lake outburst floods (GLOF); triggering disasters such as landslides, which represent a significant threat to the safety of the population, local infrastructure and numerous losses of human life. Its objective was to compile findings between the years 2010 and 2023 from publications in accordance with the research method adopted, through a literature review consulting the Scopus, ScienceDirect and Researchgate databases. The methodology, taking into consideration the Prisma guidelines, the review process was segmented into four preliminary stages: identification, selection, evaluation and inclusion. The results of lake volume and area are well correlated $R^2 = 0.91$, these data provide a clear vision regarding the methodologies for estimating the volume of lagoons. It was concluded that the investigations offer a deep insight into the methodologies over the years, they have improved their results, having accepted correlations, and in turn provide a solid basis for estimating volumes; There is an urgent need to strengthen integrated disaster risk management in mountainous regions.

Keywords: Estimation of the volume of the lakes; empirical models; bathymetry; GLOF.

Este es un artículo de acceso abierto distribuido bajo los términos de la licencia de atribución de Creative Commons, que permite el uso sin restricciones, distribución y reproducción en cualquier medio, siempre que se cite debidamente la obra original.



INTRODUCCIÓN

A nivel mundial, se observa una preocupante tendencia de recesión y adelgazamiento de los glaciares de montaña, fenómeno directamente vinculado al calentamiento global. Este proceso conlleva la reducción de los glaciares y su retirada, dando lugar a la formación inestable de lagos represados por morrenas (Allen et al., 2022; Cook y Quincey, 2015; Rawat et al., 2023; Remya et al., 2019; Zhang et al., 2023; Khanal et al., 2015; Duan et al., 2022; Islam y Patel, 2021; Mergili et al., 2020; Duan et al., 2023; Muñoz et al., 2020). La consecuencia directa de este proceso es la amenaza de inundaciones explosivas de lagos glaciares (GLOF), un peligro glacial caracterizado por la descarga repentina de grandes volúmenes de agua almacenada en un lago glaciar (Richardson y Reynolds, 2000; Emmer et al., 2021). Este evento es desencadenado por diversos factores externos como avalanchas de hielo/nieve, oleadas de glaciares, fuertes lluvias y factores autodestructivos como el asentamiento de morrenas inestables. Generalmente, un GLOF también va acompañado de eventos de desastres como deslizamientos de tierra, que representan un riesgo significativo para la seguridad de la población, las infraestructuras locales y numerosas pérdidas de vidas humanas (Wang y Jiao, 2015; Muñoz et al., 2020; Ashraf et al., 2015; Duan et al., 2023; Muñoz et al., 2020). El retroceso de los glaciares conlleva múltiples riesgos, así como nuevas opciones para los medios de vida (Drenkhan et al., 2018). El aumento de los peligros relacionados con los glaciares ha sido evidente en los últimos años debido al calentamiento global (Dubey y Goyal, 2020; Fan et al., 2022). La disminución de los glaciares inducida por el cambio climático afecta a las zonas de alta montaña a las regiones de todo el mundo, impactando los sistemas socioeconómicos en las áreas ubicadas aguas abajo. La mayoría de los lagos glaciares están ubicados en entornos relativamente inaccesibles, físicamente desafiantes o peligrosos, lo que dificulta los estudios batimétricos de las cuencas de los lagos. Aunque la batimetría del lago se puede estimar combinando datos de altimetría de radar satelital e imágenes Landsat (Jiang et al., 2016; Fair et al., 2020). En consecuencia, esta cuestión ha motivado el desarrollo de una variedad de relaciones empíricas entre las profundidades, áreas y volúmenes de los lagos. Una gran cantidad de investigaciones han desarrollado o aceptado un enfoque empírico para la estimación del volumen a partir de imágenes satelitales basado en estas relaciones de escala conocidas de las propiedades del lago (Huggel et al., 2002; Qi et al., 2022). Tradicionalmente, el cálculo preciso del volumen de los lagos se basa en mapas batimétricos de los lagos correctos (Qiao et al., 2019), cuya adquisición es inconveniente y muy costosa, especialmente si se estiman los volúmenes de una gran cantidad de lagos en regiones o nivel global (Bathymetric et al., n.d).

Zhu et al. (2010) analizaron el lago Nam Co en la meseta Tibetana. Encontraron un aumento significativo en su área y volumen, atribuido principalmente al agua de deshielo de glaciares, lo que destaca la influencia del cambio climático. Yao et al. (2012) estudiaron lagos represados por morrenas en el norte del Himalaya, observando correlaciones entre el volumen y área del lago y proponiendo una ecuación de regresión para estimar el volumen. Cook & Quincey (2015) examinaron lagos glaciares alpinos, concluyendo que el volumen y el área del lago están fuertemente correlacionados y sugiriendo la necesidad de más mediciones de batimetría para mejorar las predicciones de volumen. Wang & Jiao (2015) estudiaron lagos represados por morrenas en el Himalaya central chino, enfocándose en la gestión del riesgo de inundaciones y recomendando medidas de mitigación. Sharma et al. (2018) investigaron el lago glaciar South Lhonak en el este del Himalaya, destacando la contribución del deshielo glaciar a su expansión y proponiendo medidas preventivas para minimizar el riesgo de inundaciones repentinas. Schmidt et al. (2020) analizaron el riesgo de inundaciones repentinas asociadas a lagos glaciares en Ladakh. Resaltaron la necesidad de reevaluar la exposición de las poblaciones locales y propusieron un método de detección basado en imágenes satelitales. Muñoz et al. (2020) estudiaron lagos glaciares en la Cordillera Blanca, Perú. Concluyeron que la profundidad y el volumen del lago son difíciles de predecir con precisión, especialmente para lagos no medidos. Goswami & Goyal (2021) evaluaron el desarrollo de lagos glaciares y sus impactos aguas abajo. Destacaron la importancia de parámetros hidrológicos para la gestión del riesgo de inundaciones. Ma et al. (2021) monitorearon cambios en lagos glaciares en los Alpes e identificaron una expansión significativa en los últimos años y destacaron la importancia de este trabajo para la gestión de recursos hídricos y la evaluación del peligro glaciar. Khan et al. (2021) investigaron la expansión del lago glaciar Shishper en Pakistán y los riesgos asociados a las inundaciones repentinas. Subrayan la importancia de la planificación de emergencia. Miaomiao et al. (2022) propusieron un enfoque mejorado para estimar el volumen de lagos glaciares. Destacan su utilidad para

la simulación de inundaciones y la gestión del riesgo. Medeu et al. (2022) estudiaron lagos glaciares en el sureste de Kazajstán y observaron un aumento en el número de lagos glaciares y resaltan la importancia de monitorear los cambios en la región. Shrestha et al. (2023) analizaron la expansión de lagos represados en morrenas finales en Pakistán. Destacan la variabilidad regional y la necesidad de monitoreo continuo para evaluar peligros y riesgos.

Este artículo tuvo como objetivo recopilar hallazgos entre los años 2010 y 2023, mediante revisión de literatura, de las publicaciones realizadas en las bases de datos Scopus, Science Direct y Researchgate. Para ello, se estableció la siguiente research question: RQ1. ¿Cuáles son los temas más populares en el ámbito de la estimación del volumen de lagunas glaciales en base a modelos empíricos y con qué metodologías se han abordado?

El resto del artículo se estructura de la siguiente manera. La segunda sección introduce los materiales y métodos. En la sección tercera se presentan el desarrollo de la investigación, identificando las características generales de los papers seleccionados, analizando la literatura en base a modelos empíricos para analizar cada tema y profundizar en el análisis de los mismos. La cuarta sección discute los papers encontrados en la literatura. Finalmente, la última sección presenta las conclusiones del estudio.

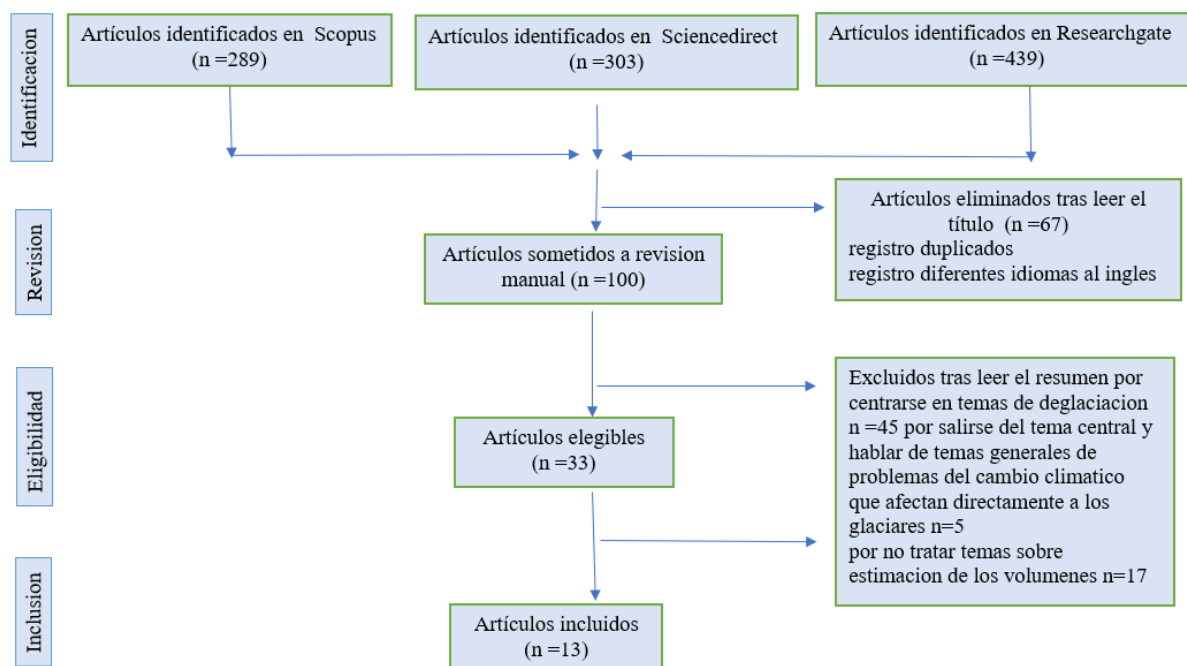
MATERIALES Y MÉTODOS

La revisión de la literatura es un método sistemático, explícito y reproducible para identificar, evaluar y sintetizar el cuerpo existente de trabajo producido por investigadores, académicos y profesionales sobre un tema específico (Ruiz et al., 2021). Para llevar a cabo esta investigación sobre la estimación del volumen de lagunas glaciales utilizando modelos empíricos, y siguiendo las directrices Prisma para estudios de revisión, el proceso se segmentó en cuatro etapas preliminares: identificación, selección, evaluación de elegibilidad e inclusión. La estructura de esta investigación se detalla en la Figura 1.

En fase de identificación, se inició con tres búsquedas independientes realizadas en marzo del 2024: en Scopus, Sciencedirect y Researchgate. Se identificaron registros que incluyeran en el título, resumen o en las palabras clave la combinación de los términos: “Estimation of the volume of the lake”, “empirical models” y “Bathymetry”. Durante la búsqueda, se aseguró de que los registros fueran pertinentes a: (i) “artículos originales” y en inglés, (ii) estudios comprendidos en un periodo de 13 años, entre 2010 y 2023. De esta forma, se generaron tres bases de datos: una compuesta por 289 registros (recogidos de Scopus), otra compuesta por 303 registros (recogidos de Sciencedirect) y finalmente 439 registros (recogidos de Researchgate). Las tres bases de datos se combinaron con el fin de eliminar cualquier duplicidad en los registros. Durante este procedimiento, también se excluyeron aquellos registros que hacían referencia a estudios escritos en idiomas distintos al inglés o al español.

Figura 1

Esquema de la metodología



Nota. En la figura se muestra los buscadores empleados en esta investigación: Scopus, Sciencedirect y Researchgate. En ambas búsquedas se identificaron registros que incluyeran en el título, resumen o en las palabras claves.

Como resultado, se generó una base de datos que contenía un total de 100 artículos. La segunda etapa, conocida como “revisión”, consistió en una evaluación manual exhaustiva de todos los registros previamente identificados. Este proceso permitió la selección de aquellos estudios que incluían temas sobre estimación de los volúmenes de lagunas glaciales. Finalmente, se logró reunir una muestra compuesta por 33 estudios, los cuales fueron llevados a la siguiente etapa de “elegibilidad”. Esta fase se enfocó en identificar aquellos estudios en los que “estimación de volúmenes lagunas glaciales”, “parámetros geométricos y batimetría “ se utilizaron como medidas principales. Trece estudios cumplieron con los criterios establecidos y pasaron a formar parte de la fase final de “inclusión”.

En los trece estudios que se muestran en la Tabla 1, que formaron parte de esta revisión, se recogió la siguiente información: (i) localización (país), (ii) título, (iii) años y hallazgos principales que estuvieran directamente relacionados con el propósito principal de esta revisión. En la Tabla 2, se muestran los papers con el número de citas y accesos.

Tabla 1*Aspectos generales de las investigaciones seleccionadas*

Autores	País	Título	Año
Zhu et al.	China	“Análisis cuantitativo de las variaciones del área del lago y los factores de influencia de 1971 a 2004 en la cuenca Nam Co de la meseta tibetana”.	2010
Yao et al.	China	“Cálculo del volumen y análisis de los cambios en los lagos represados por morrenas en el norte del Himalaya”.	2012
Cook & Quincey	China	“Estimación del volumen de los lagos glaciares alpinos”. Cuyo objetivo fue estimar el volumen de los lagos glaciares alpinos	2015
Wang & Jiao	China	“Evolución y análisis del riesgo de estallido de los lagos represados por morrenas en el Himalaya central chino”.	2015
Sharma et al.	India	“Detección remota y evaluación in situ del lago glacial South Lhonak en rápido crecimiento en el este de Himalaya, India”.	2018
Schmidt et al.	India	“Peligros de la criósfera en Ladakh: la inundación repentina del lago glacial Gya de 2014 y sus implicaciones para la evaluación de riesgos”	2020
Muñoz et al.	Perú	Estimación de la profundidad y el volumen del lago glacial basada en un gran conjunto de datos batimétricos de la Cordillera Blanca, Perú	2020
Goswami & Goyal	China	“Evaluación del desarrollo del lago glacial y los impactos de las inundaciones aguas abajo del lago glacial crítico”	2021
Ma et al.	Suiza y Austria	“Monitoreo resuelto espacial y temporalmente de los cambios en los lagos glaciales en los Alpes durante las últimas dos décadas”	2021
Khan et al.	Pakistán	Expansión del lago glacial Shishper y reciente inundación repentina del lago glacial (GLOF), Gilgit-Baltistán, Pakistán”	2021
Miaomiao et al.	China y Nepal	“Mejorando la precisión de la estimación del volumen del lago glacial: un estudio de caso en la cuenca de Poiqu, Himalaya central”.	2022
Medeu et al.	Kazajstán	“Lagos glaciares con represas de morrena y amenaza de flujos de escombros glaciares en el sureste de Kazajstán”.	2022
Shrestha et al.	Asia	Una base de datos completa y con versiones controladas_sobre inundaciones de lagos glaciares en las altas montañas de Asia	2023

Nota. En la Tabla se muestra los aspectos generales de los estudios seleccionados: país, título y año de publicación.

Por último, a la hora de presentar los resultados en la parte tres, la revisión incluyó una descripción detallada de los hallazgos de los artículos recopilados. Además, en esta fase, se identificaron las áreas potenciales para un mayor estudio.

Tabla 2

Papers con el número de citas y accesos

Autores	Año	Accesos	Número de citas
Zhu et al	2010	390	172
Yao et al	2012	342	69
Cook & Quincey	2015	168	130
Wang & Jiao	2015	520	63
Sharma et al.	2018	46	33
Schmidt et al.	2020	16	20
Muñoz et al.	2020	137	34
Goswami & Goyal	2021	158	4
Ma et al.	2021	54	8
Khan et al.	2021	7	10
Miaomiao et al.	2022	45	15
Medeu et al.	2022	23	18
Shrestha et al.	2023	15	21

Nota. En la tabla se muestran los papers más citados.

DESARROLLO

Características principales de los artículos revisados

Aspectos generales, metodológicos y procedimentales. Los trece artículos incluidos en esta revisión se publicaron entre 2010 y 2023. Por su localización, cinco corresponden a China, dos a India y uno a Perú, Pakistán, Nepal, China, Kajakistan, Asia, Suiza y Australia. Todos correspondieron a estudios cuantitativos basados en los resultados estimados en cada una de estas investigaciones. Además, emplearon modelos empíricos para corroborar sus cálculos de volumen, área y profundidad para sus áreas de estudios. Emplearon, también, técnicas de teledetección, uso de tecnologías de sistemas de información geográfica e imágenes Landsat 7 y 8 como una de las más recientes propuestas en análisis de imágenes espaciales con resoluciones de 30 metros.

Con el objetivo de conocer cómo ha evolucionado la atención de la investigación sobre la estimación del volumen de lagunas glaciales en base a modelos empíricos, los artículos seleccionados se agruparon por año de publicación, en orden cronológico. Además, se verificó que estos artículos cuentan con varios accesos en los buscadores de Scopus, ScienceDirect y Researchgate, que van desde 7 a 520 accesos. En el número de citas, van de 4 a 172 citas, como se puede observar en la Tabla 2, según los años de publicación de estas investigaciones.

Métodos de investigación empleados en la literatura

Para identificar en mayor detalle los temas tratados en la literatura sobre la estimación del volumen de lagunas glaciales en base a modelos empíricos, se partió del análisis del método de investigación empleado en cada artículo. Por ello, se agruparon los artículos según orden cronológico de publicación, de 2010 a 2023 (Tabla 3). Además, se clasificaron según la metodología del tema en investigación.

Tabla 3

Metodología de investigación empleada en los papers en estudio

Autores	Metodología
Zhu et al. (2010)	Sensores remotos, tecnologías GIS y formula empírica
Yao et al. (2012)	Información geográfica que incluyen GPS, teledetección, sig y formula empírica
Cook & Quincey (2015)	Fórmulas empíricas
Wang & Jiao (2015)	Fórmulas empíricas
Sharma et al. (2018)	Formula empírica de relación volumen-área
Schmidt et al. (2020)	Enfoque de teledetección de e alta resolución espacial temporal y emplearon la fórmula empírica
Muñoz et al. 2020	Conjunto de datos de batimetría y fórmulas empíricas
Goswami & Goyal (2021)	Modelos hidrológicos e hidrodinámicos con la aplicación de imágenes de teledetección y fórmula empírica
Ma et al. (2021)	Mapeo automático y la fórmula empírica
Khan et al. (2021)	Fórmulas empíricas
Miaomiao et al. (2022)	Datos batimétricos y formulas empíricas
Medeu et al. (2022)	Sensores remotos y de las estimaciones empíricas
Shrestha et al. (2023)	Sensores remotos temporales y sistemas de información geográfica (SIG) utilizando imágenes satelitales de Landsat 7 y 8

Nota. En la tabla se muestra la metodología de cada investigación.

Revisión de los hallazgos principales encontrados

A continuación, se presentan los hallazgos seleccionados según el tema en revisión.

Zhu et al. (2010) publicaron el artículo científico denominado “Análisis cuantitativo de las variaciones del área del lago y los factores de influencia de 1971 a 2004 en la cuenca Nam Co de la meseta Tibetana”. El objetivo fue calcular el área del espejo de agua y las variaciones de volumen del lago Nam Co entre 1971 y 2004. Emplearon sensores remotos, tecnologías GIS, análisis estadístico y fórmula empírica ; $V_g = 0.42S_g^{1.3565}$; $R^2 = 0.9998$, donde el área del glaciar (S_g) y el volumen del glaciar (V_g). Los resultados fueron: área del lago 2015 km² con una tasa media anual creciente de 2.81 km² y el volumen del lago 863.77×108 m³. Concluyeron que el aumento del agua de deshielo de los glaciares representó alrededor del 50.6% del aumento del volumen del lago, lo que sugiere que el aumento del agua de deshielo de los glaciares fue la razón principal del rápido agrandamiento del lago Nam Co bajo el continuo aumento de la temperatura.

Yao et al. (2012) publicaron el artículo “Cálculo del volumen y análisis de los cambios en los lagos represados por morrenas en el norte del Himalaya”. El objetivo fue calcular el volumen y analizar los cambios en lagos represados por morrenas. Mediante la estimación de la capacidad de almacenamiento del lago utilizando la profundidad del

agua junto con técnicas de información geográfica que incluyen gps, teledetección, Sig y una ecuación empírica de la relación volumen-área del lago ; $V = 0.0493A^{0.9304}$; ($n = 15$; $R^2 = 0.9903$); $a = A\left(\frac{2d}{\pi}\right)$.

Los resultados indican que las profundidades máximas y medias del lago fueron de 1022 m y 482 m, respectivamente, y el volumen del lago fue de 0.064 a 0.002 m³. Concluyeron que el fondo de la cuenca del lago es relativamente plano y sus flancos son empinados. Utilizando las estimaciones de área y capacidad de almacenamiento en diferentes períodos, establecieron una ecuación de regresión relacionando el volumen y el área del lago.

Cook & Quincey (2015) publicaron el artículo “Estimación del volumen de los lagos glaciares alpinos”. Su objetivo fue estimar el volumen de los lagos glaciares alpinos. Mediante fórmulas empíricas $V = 0.1217A^{1.4129}$; $D = 0.1217A^{1.4129}$ $V = 3.114A + 0.0001685A^2$; $D = 0.104A^{0.42}$, derivaron una relación entre el área del lago y el volumen para lagos represados por morrenas. Los resultados indican que volumen y el área del lago están bien correlacionados ($r^2 = 0.91$) y que hay distintos valores atípicos en el conjunto de datos. Concluyen con un modelo conceptual de cómo se debe esperar que el volumen cambie con el aumento de la superficie para una variedad de contextos lacustres, basándose en los datos según tipo de lago. Sugirieron que realizar más mediciones de la batimetría de estanques y lagos supra glaciales en crecimiento sería muy valioso en el desarrollo de relaciones robustas para la predicción de sus volúmenes evolutivos.

Wang & Jiao (2015) publicaron el artículo “Evolución y análisis del riesgo de estallido de los lagos represados por morrenas en el Himalaya central chino”. El objetivo fue estimar el volumen para analizar el riesgo de estallido de los lagos represados por morrenas. El método desarrollado fue mediante fórmulas empíricas para calcular el volumen del lago $V = 0.104A^{1.42}$; ($R^2 = 0.98$, $P < 0.001$) y $0.45\text{km}^2 / \text{año}$ ($R^2 = 0.95$, $P, 0.001$). Se obtuvo resultados de $3.04 \times 10^8 \text{m}^3$ y $3.67 \times 10^8 \text{m}^3$ de volúmenes, respectivamente. Concluyen que existe una necesidad urgente de fortalecer la gestión integrada de riesgos de los desastres por estallidos de lagos glaciares con múltiples objetivos y modos que deben incluir el seguimiento periódico de la dinámica de los lagos glaciares. Recomiendan la simulación GLOF utilizando modelos hidrodinámicos y, si es necesario, bajar el nivel del lago mediante el uso de un aliviadero abierto o reforzar la presa del lago.

Sharma et al. (2018) South Lhonak lake (SLL publicaron el artículo científico “Detección remota y evaluación in situ del lago glacial South Lhonak en rápido crecimiento en el este de Himalaya, India”. El objetivo fue determinar la capacidad de almacenamiento de lagos glaciales represados por morrenas empleando datos batimétricos mediante una fórmula empírica de relación volumen-área para calcular la capacidad de almacenamiento de lagos glaciales $V = \left[\frac{d}{3}\right](A_1 + A_2 + [A_1 A_2]^{0.5})$; $Ax\left(\frac{2d}{x}\right)$.

Según los resultados, el volumen de almacenamiento fue de 65.81 ± 2.5 millones de m³ y las profundidades máxima y media fueron 131 ± 2.5 y 67.05 ± 2.5 m, respectivamente, con una tasa de expansión promedio de 0.027 km². Concluyen que el desprendimiento sustancial de cuerpos de hielo durante las temporadas de derretimiento, y en parte por el derretimiento del glaciar North Lhonak y el flujo del lago Lhonak han contribuido a la expansión del lago glacial. Finalmente, propusieron medidas preventivas y de mitigación efectivas para minimizar el riesgo de glf en el futuro.

Schmidt et al. (2020) publicaron el artículo científico “Peligros de la criósfera en Ladakh: la inundación repentina del lago glacial Gya de 2014 y sus implicaciones para la evaluación de riesgos”. El objetivo fue evaluar el riesgo y volumen del lago glacial Gya 2014 mediante enfoque de teledetección de alta resolución espacial temporal con la fórmula empírica de volumen $V = 0.104xA^{1.42}$, donde V es el volumen y A es el área del lago. Los resultados indican que se obtuvieron 192 lagos glaciares que cubren un área de 5.93 ± 0.70 km² con un volumen de agua estimado de 61.11 ± 8.5 millones de m³, incluidos 127 lagos proglaciales y 9 supraglaciales y 56 lagos ubicados en morrenas recientes, 2018. Aparte de estos, observaron que 30 lagos se encuentran frente a morrenas recientes (área combinada: 1.53 ± 0.14 km²) y 14 lagos en circos (área combinada: 0.47 ± 0.04 km²). Concluyeron que se debe reevaluar la exposición de las poblaciones locales a los peligros de la criósfera, con consecuencias para la identificación de la vulnerabilidad y la necesidad de medidas de adaptación. El artículo ofrece un método

para identificar la exposición y la aparición de glocf utilizando análisis de imágenes satelitales. La confiabilidad de este método podría establecerse aún más mediante la investigación de campo y la verificación del terreno. La consiliencia y robustez de los métodos descritos aquí se pueden establecer utilizando dos formas de detección no relacionadas.

Muñoz et al. (2020) publicaron el artículo científico “Estimación de la profundidad y el volumen del lago glacial basado en un gran conjunto de datos batimétricos de la Cordillera Blanca, Perú”. El objetivo fue determinar la profundidad y volumen empleando datos batimétricos mediante el conjunto de datos de batimetría con 121 encuestas batimétricas, fórmulas empíricas $V = 0.0354y^{1.3724}$; $D = 0.0354A^{0.34}$; $V = 0.104y^{1.42}$; $D = 0.104A^{0.42}$; área de la laguna $d = \text{profundidad}$. El resultado de las estimaciones muestran que aproximadamente el 70 % (610) de los lagos tiene una profundidad media inferior a 10 m, y muy pocas de 40 m. El volumen de los lagos no medidos representa un 32 % ($5,18 \times 10^8 \text{ m}^3$) del volumen total del lago ($1,15 \times 10^9 \text{ m}^3$). Concluyen que la profundidad media y el volumen del lago son generalmente difíciles de predecir con otras variables morfométricas del lago.

Goswami & Goyal (2021) publicaron el artículo científico “Evaluación del desarrollo del lago glacial y los impactos de las inundaciones aguas abajo del lago glacial crítico”. El objetivo fue estimar el volumen aumento del agua del lago glacial mediante modelos hidrológicos e hidrodinámicos con la aplicación de imágenes de teledetección y fórmula empírica para calcular el volumen $V = \min[H_p, xD_m, A]$ donde V es el volumen máximo, $H_p =$ la altura potencial de descenso (H_p) y $D_m =$ la profundidad media del lago glacial y el error cuadrático medio $RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (q_s - q_t)^2}{n}}$; donde q_s son los valores del parámetro en estudio registrado, q_t son los valores del parámetro obtenidos con el modelo y N es el número de parejas de datos. Según los resultados alrededor del 90% de los lagos glaciares están situados en la zona de gran elevación ($> 4500 \text{ m}$ de altitud) y la mayoría de ellos está aumentando de tamaño; el volumen máximo fue de $19,92 \text{ Mm}^3$. Se concluye que el aumento de la profundidad del flujo de agua afectará directamente al proyecto hidroeléctrico Teesta en Chugthang, ya que no hay un terreno plano para la distribución del agua. A partir de este estudio integral, la descarga, la velocidad del flujo, la profundidad del agua y el tiempo de viaje son parámetros importantes que proporcionarían información valiosa sobre la conciencia de glocf, fomentando políticas gubernamentales y planes efectivos en respuesta a las consecuencias socioeconómicas, el clima futuro y los escenarios de inundaciones repentinas.

Ma et al. (2021) publicaron el artículo científico “Monitoreo resuelto espacial y temporalmente de los cambios en los lagos glaciares en los Alpes durante las últimas dos décadas”. El objetivo fue estimar el área y el volumen de los lagos glaciares en los Alpes mediante métodos de mapeo automático e interpretación visual manual de los algoritmos de extracción automática, clasificación de los lagos glaciares según sus características físicas y la fórmula empírica de volumen $V = 0.1217xA^{1.4129}$, donde V y A representan el volumen de agua y el área de cada lago. Según los resultados, en 2019 se identificaron 498 lagos glaciares ($>0,01 \text{ km}^2$) utilizando datos de teledetección, cubriendo un área total de $33,77 \pm 6,94 \text{ km}^2$. El área muestra una tendencia de tres etapas donde la expansión del lago glacial es rápida en los últimos 7 años (con una tasa de crecimiento anual de $0,44 \pm 0,07 \text{ km}^2 \text{ a}^{-1}$ y $0,28 \pm 0,05 \text{ km}^2 \text{ a}^{-1}$). Los volúmenes de los lagos aumentaron de $0,57$ a $0,66 \text{ km}^3$. Se concluye que el estudio intentó producir un inventario completo de lagos glaciares en los Alpes y examinó la densa serie temporal de cambios en el área y el volumen de los lagos relacionados con el retroceso de los glaciares a través de una clasificación detallada de los lagos glaciares.

Khan et al. (2021) publicaron el artículo científico “Expansión del lago glacial Shishper y reciente inundación repentina del lago glacial (GLOF), Gilgit-Baltistán, Pakistán” con el objetivo de estimar el área, volumen y descarga máxima en el lago glacial Shiper. Emplearon las técnicas empíricas para calcular el volumen $V = 0.35A^{1.5}$ y $V = 0.104A^{1.42}$; para la profundidad $D = 0.087A^{0.434}$. Los resultados obtenidos indican área máxima de $0,34 \text{ km}^2$ y volumen de $8 \times 10^6 \text{ m}^3$ el 20 de junio de 2019; en mayo de 2020, el lago alcanzó un área de $0,27 \text{ km}^2$, atrapando un volumen de $8.5 \times 10^6 \text{ m}^3$. La descarga máxima para 2019 y 2020 fue más de $4500 \text{ m}^3/\text{s}$. Se concluye que la delimitación del barranco Hassanabad aguas abajo muestra que más de 1000 edificios y más de 2000 habitantes son propensos a inundaciones. Sin embargo, el lago drena dos veces de manera constante, pero tiene un alto potencial de causar daños severos si estalla abruptamente.

Miaomiao et al. (2022) publicaron el artículo científico “Mejorando la precisión de la estimación del volumen del lago glacial: un estudio de caso en la cuenca de Poiqu, Himalaya central”. El objetivo fue estimar el volumen del lago glacial en la cuenca Poiqui mediante un conjunto de datos batimétricos y fórmulas empíricas $V = 0.35A^{1.5}$; $V = 0.104A^{1.42}$; $D = 0.087A^{0.434}$; $V = AxMD$; donde V es el volumen, A es el área, D es el diámetro y MD es el diámetro medio. Según los resultados, el volumen total del lago aumentó en un 148 % entre 1974 y 2020. Se concluye que en comparación con otras fórmulas, la estimación del volumen del lago proporciona un valor medio aproximado, un parámetro de entrada clave para la simulación de inundaciones y una nueva alternativa para estimar el volumen del lago.

Medeu et al. (2022) publicaron el artículo científico “Lagos glaciares con represas de morrena y amenaza de flujos de escombros glaciares en el sureste de Kazajstán”. El objetivo fue identificar la evolución de lagos glaciares represadas por morrenas y estimar los volúmenes mediante la información obtenida de las investigaciones de campo, sensores remotos y estimaciones empíricas para calcular el volumen de lagos $V = 0.59S^{1.44}$ donde V es el volumen del lago en m^3 y S el área del lago en m^2 y $V = 0.09S^{0.10}S_{max}^{0.10}h^{2.48}$; $S = 0.21S_{max}^{0.13}h^{1.51}$, donde S_{max} es el área máxima del lago, $10^3 m^2$, h es la profundidad del lago; S es el área estimada del lago, $10^3 m^2$; $Q_{max} = \lambda S_{max}$, donde Q_{max} es el caudal máximo de agua (m^3/s), λ corresponde a la intensidad de descongelación del canal (m/s) y S_{max} es la superficie máxima de agua (m^2). Según los resultados, las profundidades de los lagos estudiados fueron de 10 a 15 m; área de 2.38 km^2 - 2.42 km^2 ; volumen de $0.0276 \times 10^6 m^3$ - $2.5060 \times 10^6 m^3$ y descarga de 14.04 m^3/s - 27.2 m^3/s . Se concluye que el número total de lagos aumentó ligeramente entre 1970 y 2019, a pesar de la desaparición de muchos lagos como resultado de estallidos o cambios evolutivos. Debido al retroceso de los glaciares y la mayor reducción de su área total, se formaron nuevos lagos en los últimos años y la proporción de lagos glaciares aumentó significativamente durante el mismo período.

Shrestha et al. (2023) publicaron el artículo científico “Expansión heterogénea de lagos represados en morrenas finales en las cordilleras Hindukush-Karakoram-Himalaya de Pakistán durante 2001-2013”. Mediante un enfoque integrado basado en sensores remotos temporales y sistemas de información geográfica (SIG) utilizaron imágenes satelitales de Landsat 7 y 8. Los resultados muestran que el área de lagos represados varía en Karakoram (7.7%) y Himalaya (4.6%), con una contracción del 1.5% en Hindukush. El aumento máximo se observó sobre 4500 m en Hindukush, entre 3500 y 4000 m en Himalaya, y por debajo de 3500 m en Karakoram. Se concluye que es esencial realizar un monitoreo periódico de los lagos glaciares y sus glaciares asociados para desarrollar estrategias efectivas de evaluación de peligros y reducción de riesgos para esta región de gran altitud del Himalaya.

DISCUSIÓN

Respecto a los temas abordados, los estudios científicos revisados proporcionan una comprensión detallada de la dinámica de los lagos glaciares en diversas regiones montañosas del mundo, especialmente en el Himalaya y los Alpes. A través de métodos como el uso de sensores remotos, tecnologías GIS, análisis estadístico y fórmulas empíricas, los investigadores han calculado áreas y volúmenes de lagos glaciares, así como analizado los factores que influyen en su crecimiento y riesgos asociados.

En el estudio de Zhu et al. (2010) se concluye que el aumento del agua de deshielo de los glaciares contribuyó significativamente al rápido crecimiento del lago Nam Co en la meseta tibetana. Por otro lado, Cook y Quincey (2015) proporcionan una estimación del volumen de los lagos glaciares alpinos, destacando la importancia de realizar mediciones precisas de la batimetría para comprender mejor su evolución. Wang & Jiao (2015) se centraron en evaluar el riesgo de estallido de los lagos represados por morrenas en el Himalaya central chino, recomendando medidas preventivas y de mitigación efectivas. Por otro lado, Sharma et al. (2018) destacan la importancia del monitoreo de lagos glaciares para prevenir inundaciones repentinas y propusieron medidas para minimizar el riesgo.

Los estudios también abordaron diferentes técnicas para estimar el volumen de los lagos glaciares, como el enfoque propuesto por Muñoz et al. (2020), quienes utilizaron datos batimétricos para estimar profundidades

y volúmenes. Además, Goswami & Goyal (2021) emplearon modelos hidrológicos e hidrodinámicos junto con teledetección para evaluar el desarrollo de lagos glaciares y sus impactos aguas abajo. En resumen, estos estudios resaltan la importancia del monitoreo continuo de los lagos glaciares debido a su papel crucial en el suministro de agua, así como en la evaluación y mitigación de riesgos asociados como inundaciones repentinas y deslizamientos de tierra.

A lo largo de los años, las metodologías utilizadas en los estudios sobre estimación de volúmenes de lagos glaciares han experimentado una evolución significativa, reflejada en la diversificación de enfoques y herramientas empleadas como el uso de datos de teledetección y SIG (Sistemas de Información Geográfica). Desde Zhu et al. (2010) hasta Shrestha et al. (2023), se observa un uso generalizado de datos de teledetección y SIG para obtener información espacial sobre la dinámica de los lagos glaciares. Estos datos proporcionan una base sólida para realizar análisis de cambio de área y volumen de los lagos a lo largo del tiempo.

Asimismo, los estudios han utilizado fórmulas empíricas y relaciones área-volumen. Por ejemplo, se utilizaron diferentes fórmulas empíricas para estimar el volumen de los lagos glaciares basándose en su área. Estas fórmulas se derivan a partir de observaciones de campo y mediciones batimétricas, lo que permite una estimación relativamente precisa del volumen, incluso en ausencia de mediciones directas.

Estudios como el de Cook & Quincey (2015); Goswami & Goyal (2021) y Medeu et al. (2022), combinan datos de múltiples fuentes y utilizan diferentes metodologías para abordar la complejidad de los lagos glaciares. Esto incluye el uso de modelos hidrodinámicos, mediciones de campo, datos de teledetección y análisis estadístico para comprender mejor la dinámica de estos cuerpos de agua.

Énfasis en la gestión del riesgo y la mitigación

Algunas investigaciones como las de Wang & Jiao (2015) y Schmidt et al. (2020) no solo se centran en la estimación del volumen de los lagos glaciares. También evalúan el riesgo de eventos como inundaciones glaciares y proponen medidas de mitigación y gestión de riesgos para reducir su impacto en las comunidades cercanas.

Incorporación de mediciones in situ y datos batimétricos

En investigaciones como las de Muñoz et al. (2020) y Miaomiao et al. (2022) se utilizan mediciones in situ y datos batimétricos para validar y mejorar las estimaciones de volumen de lagos glaciares. Esto proporciona una base sólida para la calibración y validación de los modelos utilizados en los estudios. En resumen, la evolución de las metodologías en el estudio de lagos glaciares ha estado marcada por un enfoque cada vez más integrado y multidisciplinario, que combina datos de múltiples fuentes y técnicas analíticas para proporcionar una comprensión más completa de la dinámica de estos sistemas y los riesgos asociados.

Los trabajos de Zhu et al. (2010) y Yao et al. (2012) abordaron la estimación del área y volumen de lagos glaciares utilizando diferentes enfoques y técnicas. Zhu et al. (2010) emplearon sensores remotos, tecnologías GIS y análisis estadístico para calcular el área y volumen del lago Nam Co. Concluyen que el aumento del agua de deshielo de los glaciares fue la principal causa del agrandamiento del lago. Su modelo empírico demostró una alta precisión ($R^2=0.9998$), lo que lo convierte en una herramienta valiosa para estimar cambios en el volumen del lago. Por otro lado, Yao et al. (2012) estimó el volumen de lagos represados por morrenas en el norte del Himalaya, concluyendo que el aumento del volumen se relaciona con la capacidad de almacenamiento del lago. Su ecuación empírica también mostró alta correlación ($R^2=0.9903$), respaldando su precisión en la estimación del volumen del lago.

Sin embargo, Cook & Quincey (2015) y Wang & Jiao (2015) destacaron la necesidad de más investigaciones para mejorar la precisión de las estimaciones. En tanto, Cook & Quincey (2015) estimaron el volumen de lagos

glaciares alpinos y propusieron un modelo conceptual para predecir el cambio de volumen con el aumento del área del lago. Aunque su modelo mostró una alta correlación ($R^2 = 0.91$), resaltaron la necesidad de más mediciones de la batimetría para mejorar la precisión de las estimaciones. Por su parte, Wang & Jiao (2015) calcularon el volumen para analizar el riesgo de estallido de los lagos represados por morrenas en el Himalaya central chino. Su modelo empírico proporcionó resultados significativos ($R^2=0.98$), pero destacaron la importancia de fortalecer la gestión de riesgos de los desastres por estallidos de lagos glaciares.

Aplicabilidad de las relaciones de escala de volumen

Inevitablemente, las fórmulas empíricas tienen algunas limitaciones objetivas. Cook y Quincey (2015) sugirieron que los sesgos en los datos pueden deberse a un pequeño conjunto de datos batimétricos. Sin embargo, se cree que se debe dar prioridad a ampliar la mayor diversidad de conjuntos de datos de muestra, en lugar de simplemente aumentar el número de muestras para reducir la desviación. En términos de estimación del volumen de lagos individuales en este estudio, algunos valores atípicos representaron situaciones en las que las relaciones empíricas son limitadas para predecir los volúmenes de los lagos.

Muchas fórmulas consideraban que Jialong Co y Tara Co eran “impredecibles”, un resultado que podría estar relacionado con su gran profundidad de agua o su complicada morfología de fondo. Esta es una limitación objetiva para estimar el volumen de lagos glaciares con gran profundidad de agua. De manera similar, Cook y Quincey (2015) evaluaron críticamente el desempeño de las relaciones empíricas existentes por región y revelaron que incluso los lagos dentro de áreas geográficas similares no necesariamente tenían volúmenes igualmente predecibles. Estos hallazgos sugieren que no se debe considerar que las relaciones empíricas derivadas de posiciones específicas funcionan mejor que las relaciones existentes derivadas de una variedad de ubicaciones. Como resultado, es más probable que el origen y el contexto del lago desempeñen un papel a la hora de determinar qué tan predecible es el volumen del lago y qué forma de ecuación empírica debe utilizarse para hacer ese pronóstico (Cook y Quincey, 2015).

Se puede notar que existen algunas controversias sobre la elección de parámetros en la construcción de relaciones empíricas. Por ejemplo, ¿es mejor derivar las ecuaciones usando área y volumen o profundidad y volumen? Cook y Quincey (2015) indicaron que cualquier relación para predecir el volumen de un lago se basa en la noción de que el área y la profundidad del lago pueden no siempre ser confiables y que sí es más confiable la relación entre volumen y área, ya que en su artículo científico obtuvieron r^2 a 0.91 que representa muy buena correlación. Sin embargo, Muñoz et al. (2020) evaluaron el rendimiento de la relación empírica de estimación de volumen y profundidad promedio del lago más comúnmente utilizada y encontraron que la profundidad promedio era mejor para estimar el volumen del lago. Debido a las complejidades de la morfometría de la cuenca del lago, es difícil establecer un vínculo directo entre la cuenca de un lago y el volumen que contiene. Asimismo, Yao et al. (2012) indican que sus resultados muestran un aumento en longitud y área del lago durante los últimos 32 años, con una expansión significativa desde el año 2000; mientras tanto, Shrestha et al. (2023) manifiestan que según sus resultados el área de lagos represados varía en Karakoram (7.7%) y Himalaya (4.6%), con una contracción del 1.5% en Hindukush. El aumento máximo se observó sobre 4500 m en Hindukush, entre 3500 y 4000 m en Himalaya, y por debajo de 3500 m en Karakoram. Los cambios sugieren influencia climática y glacial. Es crucial monitorear periódicamente los lagos glaciares y glaciares asociados para evaluar peligros y riesgos en la región del Himalaya. Por su parte, (Khan et al. 2021) indican que el resultado del área máxima es de 0.34 km² y tiene un volumen de 8x10⁶ m³, atrapando un volumen de 8.5×10^6 m³ y que la descarga máxima para 2019 y 2020 fue de más de 4500 m³/s. Wang and Jiao (2015) obtuvieron resultados de 3.04 x 10⁸ m³ y 3.67 x 10⁸ m³ de volúmenes de r^2 de 0.98 y 0.95 que significa muy buena correlación. Concluyeron que existe necesidad urgente de fortalecer la gestión integrada de riesgos de los desastres por posibles estallidos de lagos glaciares.

El artículo considera completamente la geometría del lago (como el ancho y la longitud) para generar una relación entre el volumen y el área. Los hallazgos sugieren que nuestra nueva relación de escala de volumen fue más efectiva que las relaciones existentes, porque la geometría del lago está estrechamente vinculada al proceso

de retroceso de los glaciares, que está muy influenciado por los complejos procesos geomorfológicos en el paisaje circundante (Carrivick y Tweed, 2013; Cook y Swift, 2012). Al cuantificar el cambio en la longitud y el ancho del lago, podemos comprender mejor el crecimiento de los lagos glaciales.

Además, los diferentes tipos de lagos (como lagos represados por hielo o morrenas y los lagos supraglaciales) se caracterizan por diferentes fórmulas empíricas que no se aplican a los lagos supraglaciales en crecimiento, a los lagos con topografía compleja y a lagos formados en valles debido al avance de los glaciares (Cook y Quincey, 2015). En lo que respecta a los lagos supraglaciales, la existencia de hielo bajo el fondo del lago permite ser relativamente poco profundo en comparación con los lagos represados por morrenas. Como resultado, la relación empírica existente puede sobreestimar el volumen de los lagos supraglaciales. Actualmente, los datos batimétricos del lago represado por morrenas son más detallados que los de otros lagos. Con el continuo retroceso de los glaciares, tarde o temprano el lago supraglacial se convertirá en un lago represado por morrenas. Finalmente, la batimetría, y la relación escala volumen área en la estimación del volumen de lagunas glaciales, es un dato muy importante para la calibración de los diferentes enfoques propuestos por estos investigadores ya que mostró, en el tiempo, resultados significativos.

CONCLUSIONES

En la recopilación de los hallazgos respecto a la estimación del volumen de las lagunas glaciales de las investigaciones revisadas, se concluye que ofrecen una visión profunda de las metodologías a lo largo de los años y que han mejorado sus resultados teniendo correlaciones respecto a la dinámica de los lagos glaciares y los riesgos asociados. Zhu et al. (2010) destacaron que el deshielo glacial representó la mitad del aumento del lago Nam Co en la meseta tibetana. Yao et al. (2012) resaltaron la importancia de estimar el volumen de lagos represados por morrenas en el Himalaya. Cook & Quincey (2015) sugirieron medidas adicionales para mejorar la comprensión de los lagos glaciares alpinos. Wang & Jiao (2015) subrayaron la necesidad de una gestión integrada del riesgo para lagos represados en el Himalaya chino. Sharma et al. (2018) enfatizaron la importancia de medidas preventivas para minimizar el riesgo de inundaciones repentinas. Estos estudios proporcionan una base sólida para la gestión de los lagos glaciares y la evaluación de riesgos en regiones montañosas.

A pesar del gran avance en la investigación sobre estimación del volumen de lagunas glaciales en base a parámetros geométricos, los artículos publicados, generalmente, se han referido a problemas concretos. Para ello, se han identificado los temas tratados en los artículos identificados a través de su clasificación en función del método adoptado. De esta forma, los resultados proporcionan una descripción detallada de los temas abordados hasta la fecha, sirviendo como guía para futuras investigaciones.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Allen, Simon K et al. 2022. “Glacial Lake Outburst Flood Hazard under Current and Future Conditions: Worst-Case Scenarios in a Transboundary Himalayan Basin”: 3765–85. <https://doi.org/10.5194/nhess-22-3765-2022>.
- Ashraf, Arshad, Rozina Naz, and Muhammad Bilal Iqbal. 2015. “Heterogeneous Expansion of End-Moraine Dammed Lakes in the Hindukush-Karakoram-Himalaya Ranges of Pakistan during 2001–2013.” *Journal of Mountain Science* 12(5), 1113–24. <http://jms.imde.ac.cn> DOI: <https://doi.org/10.1007/s11629-014-3245-4>
- Bathymetric, Lake et al. “A New Digital Lake Bathymetry Model Using the Step-Wise Water Recession Method to Generate 3D.” <https://doi.org/10.3390/w11061151>
- Cook, S. J., and D. J. Quincey. 2015. “Estimating the Volume of Alpine Glacial Lakes.” *Earth Surface Dynamics* 3(4): 559–75. <https://doi.org/10.5194/esurf-3-559-2015>

- Drenkhan, Fabian, Lucía Guardamino, Christian Huggel, and Holger Frey. 2018. “Current and Future Glacier and Lake Assessment in the Deglaciating Vilcanota-Urubamba Basin, Peruvian Andes.” *Global and Planetary Change* 169(July): 105–18. <https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2018.07.005>
- Duan, Hongyu et al. 2022. “Water Storage and Potential Hazard of Moraine-Dammed Glacial Lake in Maritime Glaciation Region A Case Study of Bienong Co.” (April). <https://doi.org/10.5194/tc-17-591-2023>
- Duan, Hongyu et al. 2023. “Lake Volume and Potential Hazards of Moraine-Dammed Glacial Lakes a Case Study of Bienong Co , Southeastern Tibetan Plateau” 591–616. <https://doi.org/10.5194/tc-17-591-2023>
- Dubey, Saket, and Manish Kumar Goyal. 2020. “Glacial Lake Outburst Flood Hazard, Downstream Impact, and Risk Over the Indian Himalayas.” *Water Resources Research* 56(4): 0–1. <https://doi.org/10.3390/rs14235957>
- Emmer, Adam et al. 2021. “Glacier Retreat and Associated Processes since the Last Glacial Maximum in the Lejiamayu Valley, Peruvian Andes.” *Journal of South American Earth Sciences* 109(November 2020): 1–12. <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2021.103254>
- Fan, Xuanmei et al. 2022. “Imminent Threat of Rock-Ice Avalanches in High Mountain Asia.” *Science of the Total Environment* 836(April): 155380. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.155380>
- Goswami, Uttam Puri, and Manish Kumar Goyal. 2021. “Assessment of Glacial Lake Development and Downstream Flood Impacts of Critical Glacial Lake.” *Natural Hazards* 109(1): 1027–46. <https://doi.org/10.1007/s11069-021-04866-8>
- Islam, Nazimul, and Priyank Pravin Patel. 2021. “Inventory and GLOF Hazard Assessment of Glacial Lakes in the Sikkim Himalayas , India.” *Geocarto International* 0(0): 1–36. <https://doi.org/10.1080/10106049.2020.1869332>
- Khan, Garee et al. 2021. “Expansion of Shishper Glacier Lake and Recent Glacier Lake Outburst Flood (GLOF), Gilgit-Baltistan, Pakistan.” *Environmental Science and Pollution Research* 28(16): 20290–98. <https://doi.org/10.1007/s11356-020-11929-z>
- Khanal, Narendra Raj, Jin-ming Hu, and Pradeep Mool. 2015. “Glacial Lake Outburst Flood Risk in the Poiqu / Bhote Koshi / Sun Koshi River Basin in the Central Himalayas.” 35(4): 351–64. <https://doi.org/10.1659/MRD-JOURNAL-D-15-00009>
- Ma, Jingsong, Chunqiao Song, and Yanjun Wang. 2021. “Spatially and Temporally Resolved Monitoring of Glacial Lake Changes in Alps During the Recent Two Decades.” *Frontiers in Earth Science* 9(August): 1–11. <https://doi.org/10.3389/feart.2021.723386>
- Medeu, Akhmetkal R. et al. 2022. “Moraine-Dammed Glacial Lakes and Threat of Glacial Debris Flows in South-East Kazakhstan.” *Earth-Science Reviews* 229(February): 103999. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2022.103999>
- Mergili, Martin et al. 2020. “Reconstruction of the 1941 GLOF Process Chain at Lake Palcacocha (Cordillera Blanca, Peru).” *Hydrology and Earth System Sciences* 24(1): 93–114. <https://doi.org/10.5194/hess-24-93-2020>
- Miaomiao Qi , Shiyin Liu , Kunpeng , Wu Yu Zhu, Fuming Xie , Huian Jin, Yongpeng Gao, Xiaojun Yao. 2022. “Improving the Accuracy of Glacial Lake Volume Estimation: A Case Study in the Poiqu Basin, Central Himalayas.” *Journal of Hydrology* Volume 610. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2022.127973>

- Muñoz, Randy et al. 2020. “Glacial Lake Depth and Volume Estimation Based on a Large Bathymetric Dataset from the Cordillera Blanca, Peru.” *Earth Surface Processes and Landforms* 45(7): 1510–27. <https://doi.org/10.1002/esp.4826>
- Qi, Miaomiao et al. 2022. “Improving the Accuracy of Glacial Lake Volume Estimation: A Case Study in the Poiqu Basin, Central Himalayas.” *Journal of Hydrology* 610. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2022.127973>
- Qiao, Baojin et al. 2019. “Estimation of Lake Water Storage and Changes Based on Bathymetric Data and Altimetry Data and the Association with Climate Change in the Central Tibetan Plateau.” *Journal of Hydrology* 578(August): 124052. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2019.124052>
- Rawat, Manish et al. 2023. “Glacial Lake Outburst Flood Risk Assessment Using Remote Sensing and Hydrodynamic Modeling : A Case Study of Satluj Basin, Western” : 41591–608. <https://doi.org/10.1007/s11356-023-25134-1>
- Remya, S N, Anil V Kulkarni, S Pradeep, and D G Shrestha. 2019. “Volume Estimation of Existing and Potential Glacier Lakes, Sikkim Himalaya, India” 116(4). <https://doi.org/10.18520/cs/v116/i4/620-627>
- Schmidt, Susanne, Marcus Nüsser, Ravi Baghel, and Juliane Dame. 2020. “Cryosphere Hazards in Ladakh: The 2014 Gya Glacial Lake Outburst Flood and Its Implications for Risk Assessment.” *Natural Hazards* 104(3): 2071–95. <https://doi.org/10.1007/s11069-020-04262-8>
- Serrano-ruiz, Julio C, Josefa Mula, and Raúl Poler. 2021. “Smart Manufacturing Scheduling : A Literature Review Smart Manufacturing Scheduling: A Literature Review.” *Journal of Manufacturing Systems* 61(November): 265–87. <https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2021.09.011>
- Sharma, R. K., Pranay Pradhan, N. P. Sharma, and D. G. Shrestha. 2018. “Remote Sensing and in Situ-Based Assessment of Rapidly Growing South Lhonak Glacial Lake in Eastern Himalaya, India.” *Natural Hazards* 93(1): 393–409. <https://doi.org/10.1007/s11069-018-3305-0>
- Shrestha, Finu et al. 2023. “A Comprehensive and Version-Controlled Database of Glacial Lake Outburst Floods in High Mountain Asia” 7271187: 3941–61. <https://doi.org/10.5194/essd-15-3941-2023>
- Wang, Shi Jin, and Shitai Jiao. 2015. “Evolution and Outburst Risk Analysis of Moraine-Dammed Lakes in the Central Chinese Himalaya.” *Journal of Earth System Science* 124(3): 567–76. <https://doi.org/10.1007/s12040-015-0559-8>
- Yao, Xiaojun et al. 2012. “Volume Calculation and Analysis of the Changes in Moraine-Dammed Lakes in the North Himalaya: A Case Study of Longbasaba Lake.” *Journal of Glaciology* 58(210): 753–60. <https://doi.org/10.3189/2012JoG11J048>
- Zhang, Taigang, Weicai Wang, and Baosheng An. 2023. “A Conceptual Model for Glacial Lake Bathymetric Distribution.” : 5137–54. <https://doi.org/10.5194/tc-17-5137-2023>
- Zhu, Li Ping, Man Ping Xie, and Yan Hong Wu. 2010. “Quantitative Analysis of Lake Area Variations and the Influence Factors from 1971 to 2004 in the Nam Co Basin of the Tibetan Plateau.” *Chinese Science Bulletin* 55(13): 1294–1303. <https://doi.org/10.1007/s11434-010-0015-8>

