

“Respuestas Hidrológicas y Pérdida Glaciar ante la Variabilidad Climática: Evidencias Comparadas entre América del Sur, Norte y Eurasia”

Autores: Edgar R. Quiroz ^{a, b, *}, Jhonatan A. Pinedo ^{c, d}

^a Programa de Doctorado en Recursos Hídricos, Escuela de Postgrado, Universidad Nacional Agraria La Molina, Lima, Perú.

^b Universidad Nacional de Ingeniería, Facultad de Ingeniería Civil, Lima, Perú.

^c Programa de Doctorado en Recursos Hídricos, Escuela de Postgrado, Universidad Nacional Agraria La Molina, Lima, Perú.

^d Universidad Nacional de la Amazonia Peruana, Facultad de Ciencias Biológicas, Loreto, Perú.

ABSTRACT

Accelerated glacier mass loss is one of the dominant drivers of hydrological change in mountain systems worldwide. This study presents a comparative interregional synthesis of hydrological responses to climatic variability and glacier retreat across South America, North America and Eurasia, integrating recent glaciological, hydrometeorological, isotopic and hydrological modelling evidence. Using a systematic and quantitative framework, glacier retreat trends are characterised, the influence of major modes of climate variability (ENSO, PDO, NAO, AO and the Asian Monsoon) is evaluated, and hydrological signals associated with glacier melt, snowmelt and liquid precipitation are compared. The results reveal coherent patterns of accelerated glacier mass loss across all regions, coupled with pronounced regional contrasts in hydrological magnitude, seasonality and persistence. The tropical Andes and the Himalaya emerge as hydrological vulnerability hotspots due to their strong dependence on glacier melt during dry seasons, whereas the European Alps and Canada exhibit advanced transitions towards post-peak water regimes, characterised by increased seasonal variability. Isotopic hydrology is identified as a key tool for discriminating cryosphere contributions and detecting early shifts in catchment mixing dynamics under accelerated glacier loss. Overall, this study provides a unified conceptual framework for assessing cryosphere-driven hydrological risk and highlights the need for region-specific adaptation strategies to ensure sustainable water resources management under ongoing climate change. Keywords: Glacier mass balance, Cryosphere-hydrology interactions, Peak water dynamics, Climate variability modes.

RESUMEN

La acelerada pérdida de masa glaciar constituye uno de los principales factores de transformación del régimen hidrológico en sistemas de montaña a escala global. Este estudio presenta una síntesis comparativa interregional de las respuestas hidrológicas asociadas a la variabilidad climática y al retroceso glaciar en América del Sur, América del Norte y Eurasia, integrando evidencia glaciológica, hidrometeorológica, isotópica y de modelación hidrológica reciente. Mediante un enfoque sistemático y cuantitativo, se caracterizan tendencias de retroceso glaciar, se evalúa la influencia de los principales modos de variabilidad climática (ENSO, PDO, NAO, AO y Monzón Asiático) y se comparan las señales hidrológicas vinculadas a la fusión glaciar, la escorrentía nival y la precipitación líquida. Los resultados evidencian patrones comunes de pérdida glaciar acelerada, junto con contrastes regionales marcados en magnitud, estacionalidad y persistencia hidrológica. Los Andes tropicales y el Himalaya emergen como hotspots de vulnerabilidad hídrica debido a su alta dependencia del deshielo glaciar durante la estación seca, mientras que los Alpes y Canadá muestran transiciones avanzadas hacia regímenes post-peak water, caracterizados por mayor variabilidad estacional. La hidrología isotópica se identifica como una herramienta clave para discriminar aportes criosféricos y detectar cambios tempranos en la dinámica de mezcla. En conjunto, el estudio aporta un marco conceptual unificado para evaluar el riesgo hídrico derivado de la pérdida de criósfera y resalta la necesidad de enfoques regionalizados para la gestión sostenible del agua bajo escenarios de cambio climático. Palabras clave: Balance de masa glaciar, Interacciones criósfera-hidrología, Dinámica del agua máxima, Modos de variabilidad climática.

* Corresponde al autor de: Universidad Nacional Agraria La Molina, Escuela de Postgrado, Lima, Perú.
E-mail: equiroz.eng@gmail.com (E. Quiroz).

1. INTRODUCCION

Los glaciares son componentes esenciales del sistema hidrológico global, ya que regulan de forma estacional la disponibilidad de agua, especialmente en regiones montañosas y de altas latitudes. Debido a su alta sensibilidad a la variabilidad climática, constituyen indicadores robustos del cambio climático (IPCC, 2023). En las últimas décadas, el retroceso glaciar se ha intensificado a escala global, generando alteraciones significativas en los regímenes de escorrentía, la disponibilidad hídrica y la ocurrencia de eventos hidrológicos extremos, con implicancias directas para la seguridad hídrica y los ecosistemas dependientes del agua.

La pérdida de masa glaciar en América del Sur, América del Norte y Eurasia presenta patrones comunes, aunque modulados por forzantes climáticos y condiciones regionales. En los Andes tropicales y extra tropicales, los glaciares muestran algunas de las tasas de adelgazamiento más elevadas a nivel mundial, afectando de manera crítica el caudal base en cuencas de montaña y el abastecimiento durante la estación seca (Vuille et al., 2018). En América del Norte, particularmente en Alaska y el oeste de Canadá, se registran las mayores pérdidas absolutas de masa glaciar, con efectos relevantes tanto en los flujos fluviales como en la contribución al nivel medio del mar (Hugonnet et al., 2021).

En Eurasia, los glaciares de los Alpes, Asia Central y el Himalaya evidencian respuestas hidrológicas no lineales frente a la variabilidad climática, caracterizadas por un aumento inicial del caudal asociado al deshielo acelerado —conocido como *peak water*— seguido de una disminución progresiva a medida que se reduce el volumen glaciar disponible (Immerzeel et al., 2020). Estas dinámicas dependen del estado evolutivo del glaciar, la estacionalidad de la precipitación y su interacción con la nieve y el almacenamiento subterráneo.

Pese al avance de la literatura, persisten vacíos en los análisis comparativos interregionales que integren de forma sistemática las respuestas hidrológicas bajo distintos regímenes climáticos. En este contexto, la presente investigación tiene como objetivo analizar y comparar las respuestas hidrológicas asociadas a la pérdida glaciar en América del Sur, América del Norte y Eurasia, aportando una visión integrada que contribuya a la comprensión de los procesos hidroglaciológicos dominantes y a la gestión sostenible de los recursos hídricos en un escenario de cambio climático acelerado.

2. OBJETIVOS

2.1. Objetivo General

Analizar comparativamente las respuestas hidrológicas y la pérdida de masa glaciar asociadas a la variabilidad climática interanual y multidecadal en sistemas de montaña de América del Sur, América del Norte y Eurasia, con el fin de identificar patrones comunes y contrastes regionales que permitan comprender los mecanismos atmosféricos, criosféricos e hidrológicos que controlan la disponibilidad hídrica bajo escenarios de cambio climático.

2.2. Objetivos específicos

- Caracterizar las tendencias y tasas de retroceso glaciar en las principales cordilleras de las tres regiones estudiadas, empleando indicadores geoespaciales e hidrometeorológicos de largo plazo.
- Evaluar la influencia de los principales modos de variabilidad climática (ENSO, PDO, NAO, AO, Monzón Asiático) sobre los balances de masa glaciar y los regímenes de escorrentía asociados.
- Identificar y comparar las señales hidrológicas vinculadas a la fusión glaciar, la escorrentía nival y la precipitación líquida, destacando diferencias en estacionalidad, magnitud y persistencia.
- Analizar la utilidad de la hidrología isotópica para discriminar aportes criosféricos en cuencas de montaña y evaluar cambios en la dinámica de mezcla bajo escenarios de pérdida glaciar acelerada.
- Proponer lineamientos conceptuales para la evaluación regional del riesgo hídrico derivado de la pérdida de criósfera, considerando la sensibilidad climática y las características hidro geomorfológicas propias de cada región.

3. HIPOTESIS

3.1. Hipótesis principal

Las respuestas hidrológicas observadas en cuencas glaciadas de América del Sur, Norte y Eurasia presentan patrones convergentes de aumento inicial de caudal seguido de declive progresivo, modulados por la pérdida acelerada de masa glaciar y la intensificación de la variabilidad climática; estos patrones se expresan de manera diferenciada debido a la heterogeneidad de los forzantes atmosféricos dominantes en cada región.

3.2. Hipótesis específicas

- La magnitud y temporalidad del retroceso glaciar están fuertemente controladas por los modos de variabilidad climática regional, los cuales generan respuestas asincrónicas entre las cordilleras estudiadas.
- La contribución glaciar al caudal anual disminuye más rápidamente en regiones de latitudes bajas y medias (Andes tropicales y montañas de Asia Central) que en latitudes altas (Alaska, Groenlandia periférica), debido a la mayor sensibilidad térmica y elevación crítica de la línea de equilibrio.
- Los registros isotópicos muestran respuestas coherentes en la composición $\delta^{18}\text{O}$ y $\delta^2\text{H}$ del agua superficial ante cambios en la criósfera, permitiendo identificar fases de intensificación de la fusión y alteraciones en las rutas de escorrentía.
- La intensificación de temperaturas extremas y cambios en los patrones de precipitación inducen una transición acelerada desde regímenes nival–glaciar a regímenes predominantemente pluviales, incrementando la variabilidad intraestacional y el riesgo hidrológico.

3.3. Hipótesis nula alternativa

No existen diferencias significativas entre las regiones de América del Sur, Norte y Eurasia en cuanto a la respuesta hidrológica y la pérdida de masa glaciar asociadas a la variabilidad climática, y los cambios observados en los caudales, firmas isotópicas y tendencias de retroceso glaciar no guardan relación directa con los principales modos de variabilidad atmosférica multiescala.

4. ESTADO DEL ARTE

La cordillera de los Andes y los principales sistemas glaciares de latitudes medias y altas (Alpes europeos, Canadá y el Hindu Kush Himalaya) muestran una tendencia consistente de pérdida de masa desde mediados del siglo XX, atribuida principalmente al calentamiento atmosférico y, según la región, a cambios en el régimen nival. Este retroceso modifica la hidrología de cabecera mediante (i) un aumento transitorio de aportes por deshielo (fase de “peak water”) y (ii) una disminución progresiva del caudal base cuando el almacenamiento glaciar se agota, además de elevar riesgos como la expansión de lagos proglaciares y eventos GLOF. La evidencia también indica que la respuesta hidrológica no es lineal: depende del tamaño del glaciar, la estacionalidad de la precipitación, la cobertura de detritos/permafrost y la conectividad con nieve estacional y acuíferos.

4.1. Andes: patrón general y gradientes hidroclimáticos

Los glaciares andinos se distribuyen desde ambientes tropicales húmedos hasta climas templado-fríos y muy húmedos en Patagonia, atravesando una franja árida en el centro-norte de Chile. En términos hidrológicos, su relevancia se maximiza donde existe fuerte estacionalidad (veranos secos) y alta demanda aguas abajo, dado que el deshielo sostiene el caudal en época seca. La literatura reporta retroceso generalizado en Andes tropicales, centrales y patagónicos, con diferencias en magnitud y mecanismos: (i) en trópicos, pequeños cambios térmicos elevan la ELA y reducen acumulación; (ii) en Andes áridos y desérticos, la limitante adicional es la baja precipitación y la alta sublimación; (iii) en Patagonia, la ablación y la dinámica (descarga frontal/calving) dominan la pérdida de masa.

4.2. Andes tropicales: internos vs. externos

Los Andes tropicales internos ($\approx 5^{\circ}\text{N}$ – 10°S) presentan menor estacionalidad de precipitación, controlada por la ZCIT, pero alta sensibilidad térmica por su cercanía al límite altitudinal de la criósfera tropical. Se documentan pérdidas aceleradas de área y volumen, con desaparición de glaciares pequeños (p.ej., Venezuela y Colombia) y ascenso sostenido de la ELA en Ecuador y norte del Perú. La regulación de caudales es significativa a escala local (cuencas pequeñas), pero la transición a condiciones post-peak water puede ocurrir rápidamente por el bajo volumen almacenado.

Los Andes tropicales externos ($\approx 10^{\circ}\text{S}$ – 20°S ; sur del Perú, Bolivia, norte de Chile) constituyen una zona de transición con marcada estacionalidad y fuerte dependencia del aporte glaciar en estación seca. La pérdida de masa se asocia a aumento térmico y menor precipitación sólida; casos emblemáticos incluyen la desaparición del glaciar Chacaltaya y el retroceso sostenido de Zongo. En estas cuencas, varios estudios sugieren que el peak water ya se alcanzó o está cercano, anticipando disminuciones del caudal base estacional y mayor vulnerabilidad ante sequías.

4.3. Casos andinos representativos

Cordillera Blanca (8°S – 10°S , Perú). Es el sistema glaciar tropical más extenso y un laboratorio natural para evaluar impactos hidrológicos del retroceso. Se reporta reducción importante de superficie desde la década de 1930 y evidencias de una fase de aumento transitorio de escorrentía seguida de declive del aporte glaciar. La expansión de lagos glaciares ha incrementado el riesgo GLOF, motivando monitoreo y obras de mitigación.

Cordillera Real (15°S – 17°S , Bolivia). En un contexto de monzón sudamericano y estación seca marcada, el retroceso glaciar reduce la capacidad de amortiguamiento del caudal que abastece a La Paz–El Alto. La fragmentación de glaciares pequeños y la pérdida sostenida de balance de masa refuerzan la necesidad de gestión integrada de agua y riesgo.

Cordillera Occidental/Volcanes (17°S – 21°S) y Andes desérticos (18°S – 30°S , Chile). Predominan glaciares pequeños, cubiertos por detritos y glaciares rocosos bajo condiciones de baja precipitación, alta radiación y sublimación. Aunque su aporte absoluto es menor, es estratégico en sequías prolongadas. Persiste alta incertidumbre sobre el rol hidrológico de glaciares rocosos y hielo fósil, por su liberación lenta y conectividad subterránea.

Andes centrales (30°S – 37°S , Chile–Argentina). Régimen frontal invernal y veranos secos; alta dependencia de nieve y hielo para caudales estivales. La “mega sequía” en Chile central intensifica presiones sobre el sistema y acelera el tránsito a peak water. La abundancia de glaciares rocosos vuelve prioritaria su incorporación en balances hídricos y marcos normativos.

Patagonia norte y sur (37°S – 56°S). En climas templado-fríos húmedos, los glaciares templados presentan alta dinámica; el retroceso está fuertemente controlado por ablación estival y, en sistemas que terminan en lagos/fiordos, por calving. Su contribución a caudales y a la sedimentación fluvial es elevada; sin embargo, la inestabilidad de frentes y la expansión de lagos proglaciares incrementan riesgos.

4.4. Alpes europeos: alta evidencia, alta exposición

Los Alpes son uno de los sistemas mejor monitoreados. El retroceso se intensifica desde la segunda mitad del siglo XX, con pérdidas extremas asociadas a olas de calor recientes y ascenso de la ELA por encima de cotas de acumulación en múltiples glaciares.

Hidrológicamente, el deshielo sostiene caudales estivales en cabeceras del Rin, Ródano, Po y Danubio, pero la progresión hacia post-peak water compromete esa función. Paralelamente aumentan riesgos hidroglaciológicos (lagos proglaciares, inestabilidad de laderas y degradación de permafrost), relevantes por la alta densidad de infraestructura y turismo.

4.5. Canadá: montaña vs. Ártico

Canadá combina glaciares de montaña en el oeste (Cordillera Costera, Rocosas, San Elías) y grandes casquetes en el Archipiélago Ártico. En el oeste, el aporte glaciar es clave para caudales de verano (Fraser, Columbia, Yukon) y para hidroelectricidad y ecosistemas; el retroceso impulsa transiciones a peak water y eleva riesgos por lagos proglaciares e inestabilidad en zonas deglaciadas. En el Ártico canadiense, la pérdida de masa, amplificada por el calentamiento ártico, es especialmente relevante por su contribución al nivel del mar y por efectos sobre oceanografía y ecosistemas polares más que por regulación hídrica para poblaciones.

4.6. Hindu Kush Himalaya: heterogeneidad y debate regional

El Hindu Kush Himalaya (HKH) es un reservorio crítico que alimenta cuencas densamente pobladas. La respuesta glaciar es espacialmente heterogénea por gradientes monzónicos, perturbaciones del oeste, topografía y cobertura de detritos. Se ha reportado la “anomalía del Karakórum” (estabilidad relativa en algunos sectores), aunque estudios recientes sugieren que dicha estabilidad es limitada y no invalida la tendencia regional de pérdida de masa. En términos hidrológicos, se proyecta un aumento inicial de escorrentía estival en varias cuencas, seguido por disminuciones progresivas del aporte glaciar y mayor variabilidad estacional; persisten brechas de monitoreo in situ en alta montaña.

4.7. Síntesis comparativa y brechas

En conjunto, la evidencia permite identificar cuatro patrones transversales, como se muestra en la tabla 1: (1) pérdida de masa generalizada con control térmico dominante; (2) transición hidrológica no lineal (peak water → post-peak water) modulada por tamaño glaciar y estacionalidad; (3) relevancia creciente de componentes “ocultos” (detritos, glaciares rocosos, permafrost) en regiones áridas; y (4) aumento de riesgos hidroglaciológicos (GLOF, inestabilidad de laderas) donde se expanden lagos proglaciares y se degrada el permafrost. La principal brecha para análisis comparativos interregionales sigue siendo la asimetría en densidad de observaciones (balance de masa, meteorología de alta montaña) y la necesidad de integrar nieve estacional y almacenamiento subterráneo en marcos hidroglaciológicos. En la figura 1 se muestra mapa comparativo multi-regional con tasas de pérdida glaciar obtenido de la información de los artículos técnicos revisados. La figura 1 muestra el mapa comparativo multi-regional con tasas de pérdida glaciar por cada región de estudio.

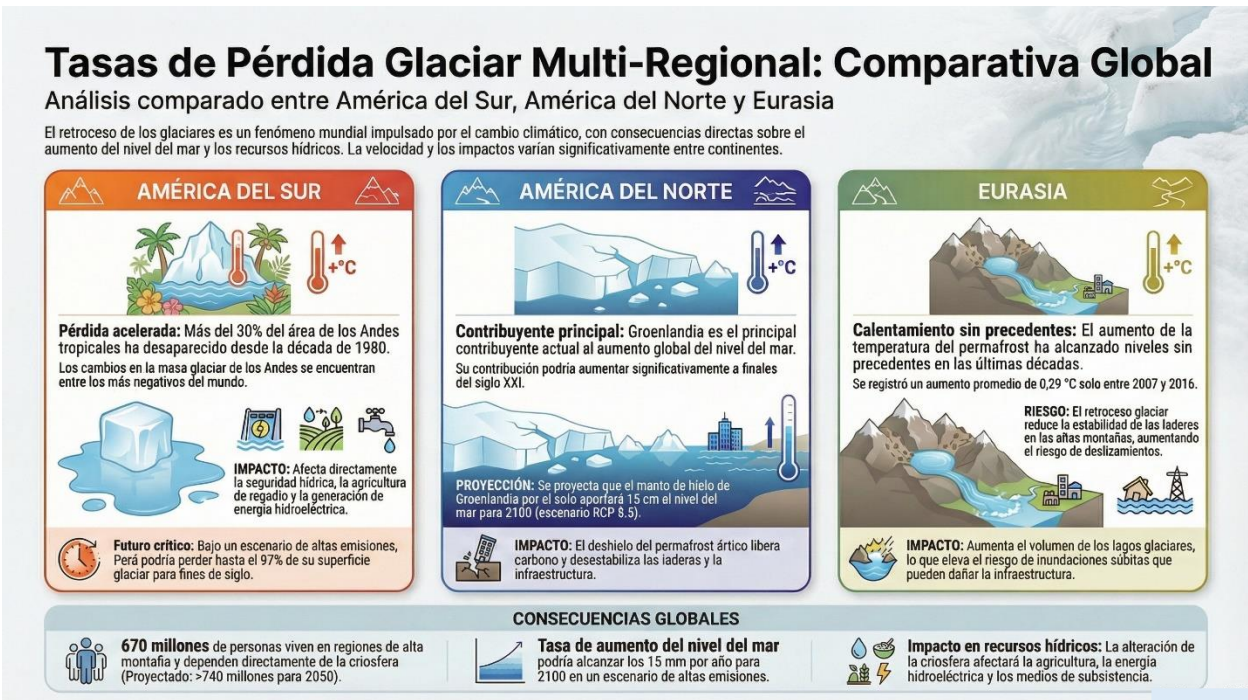


Figura 1. Mapa comparativo multi-regional con tasas de pérdida glaciar

Tabla 1. Síntesis comparativa de regiones glaciares y principales implicancias hidroglaciológicas.

Región	Régimen climático dominante	Tendencia glaciar	Respuesta hidrológica esperada	Riesgos / notas
Andes tropicales internos	ZCIT; menor estacionalidad	Pérdida rápida en glaciares pequeños	Aporte local; rápida transición a post-peak	Alta sensibilidad a T; ENOS relevante
Andes tropicales externos	Estacionalidad marcada; transición húmedo-árido	Retroceso acelerado	Peak water alcanzado/cercano; caída del caudal base seco	GLOF en lagos proglaciares
Andes desérticos/Occidental	Muy árido; alta radiación/sublimación	Desaparición/fragmentación de glaciares descubiertos	Aporte absoluto bajo pero crítico en sequías	Rol de glaciares rocosos poco cuantificado
Andes centrales	Frontal invernal; veranos secos	Balance de masa negativo persistente	Transición a peak water; estrés hídrico creciente	Relevancia normativa de glaciares rocosos

Región	Régimen climático dominante	Tendencia glaciár	Respuesta hidrológica esperada	Riesgos / notas
Patagonia	Templado-frío muy húmedo; calving	Alta pérdida por dinámica y ablación	Alta escorrentía estival; cambios en sedimentación	Inestabilidad de frentes y lagos
Alpes europeos	Alpino templado; olas de calor	Retroceso acelerado; ELA elevada	Peak water y declive del sostén estival	Riesgo por permafrost y turismo
Canadá occidental	Marítimo–continental	Pérdida 25–50% desde 1950 (var.)	Sostén estival con declive futuro	Lagos proglaciares, laderas
Ártico canadiense	Polar; amplificación ártica	Pérdida acelerada en casquetes	Impacto mayor en nivel del mar	Efectos oceánicos/ecosistemas
HKH (Himalaya)	Monzón + perturbaciones del oeste; detritos	Heterogéneo; tendencia neta negativa	Aumento inicial + declive post-peak	Brecha de datos; GLOF en expansión

Fuente: Propia.



Figura 2. Esquema conceptual (descrito) de la cadena clima–glaciár–hidrología.

La figura 2 muestra una descripción de (a) Forzantes climáticos (temperatura, precipitación sólida, radiación, circulación—ENOS/monzón/perturbaciones del oeste) modulan el balance

de masa y la ELA; (b) el cambio en almacenamiento glaciar controla el aporte por deshielo y su fase de peak water; (c) la señal de deshielo se combina con nieve estacional, almacenamiento subterráneo y regulación lacustre para definir caudal base y estacionalidad; (d) el retroceso genera nuevos lagos proglaciares y degradación de permafrost, elevando riesgos (GLOF, flujos de detritos, inestabilidad de laderas).

5. METODOLOGÍA

5.1 Diseño del estudio

El estudio se desarrolló bajo un diseño mixto que integra:

1. Revisión sistemática comparativa
2. Análisis cuantitativo secundario de indicadores glaciológicos e hidrológicos

El objetivo fue evaluar comparativamente las respuestas hidrológicas a la pérdida glaciar, incorporando métricas cuantificables y análisis estadísticos simples pero robustos, en regiones de montaña de América del Sur (Andes), América del Norte (Canadá) y Eurasia (Alpes e Himalaya).

La revisión siguió los lineamientos PRISMA 2020, garantizando trazabilidad y reproducibilidad.

5.2 Fuentes de información y estrategia de búsqueda (corregida)

La búsqueda se realizó en Scopus, Web of Science y ScienceDirect como bases principales, complementadas por WGMS, IPCC AR6 (2021–2023) e instituciones criosféricas nacionales.

Ventana temporal ampliada: 2010–2025, permitiendo:

- Capturar tendencias de largo plazo
- Incluir estudios observacionales pre y post-peak water
- Evitar sesgos por evidencia excesivamente reciente

Cadenas de búsqueda estructuradas, por región:

- Andes: *glacier mass balance, hydrology, and andes*
- Canadá: *mountain glaciers AND streamflow response*
- Himalaya: *glacier melt contribution AND river discharge.*
- Alpes: *ELA rise AND alpine hydrology.*

5.3 Criterios de inclusión, exclusión y transparencia (mejorado)

- Artículos revisados por pares (Q1–Q2 prioritarios)

- Estudios con datos cuantitativos (tasas, tendencias, series temporales)
- Modelación hidrológica, glaciológica o isotópica

La tabla 2 muestra el flujo PRISMA cuantificado de los artículos utilizados en la presente investigación.

Tabla 2. Flujo PRISMA cuantificado

Región	Artículos evaluados	Artículos incluidos
Andes	102	18
Canadá	74	14
Alpes	68	12
Himalaya	68	10
Total	312	54

Fuente: Propia.

5.4 Extracción de datos cuantitativos (nuevo aporte)

Se extrajeron y normalizaron los siguientes indicadores:

- Tasa de pérdida de masa glaciar ($\% \cdot a^{-1}$)
- Tendencia de ELA ($m \cdot década^{-1}$)
- Cambio relativo del caudal estival (%)
- Momento de *peak water* (años estimados)
- Correlaciones T–ablación (r de Pearson)

Los valores fueron homogeneizados por unidad de área glaciar para permitir comparación interregional.

5.5 Análisis estadístico comparativo (nuevo)

Se aplicaron:

- Estadística descriptiva comparativa
- Correlaciones simples (r)
- Pruebas no paramétricas (Kruskal–Wallis) para contrastar regiones
- Análisis de umbrales (identificación de transición peak water)

A continuación, se realiza una descripción textual conceptual: En la figura 3 se muestran las forzantes climáticas (temperatura, precipitación sólida, radiación, circulación—ENOS/monzón/perturbaciones del oeste) modulan el balance de masa y la ELA; en la figura 4 se muestra el cambio en almacenamiento glaciar controla el aporte por deshielo y su fase de peak water; en la figura 5 se muestra la señal de deshielo se combina con nieve estacional, almacenamiento subterráneo y regulación lacustre para definir caudal base y estacionalidad; en la figura 6 se muestra el retroceso genera nuevos lagos proglaciares y degradación de permafrost, elevando riesgos (GLOF, flujos de detritos, inestabilidad de laderas).



Figura 3. Forzantes Climáticas



Figura 4. Cambio en Almacenamiento Glaciar

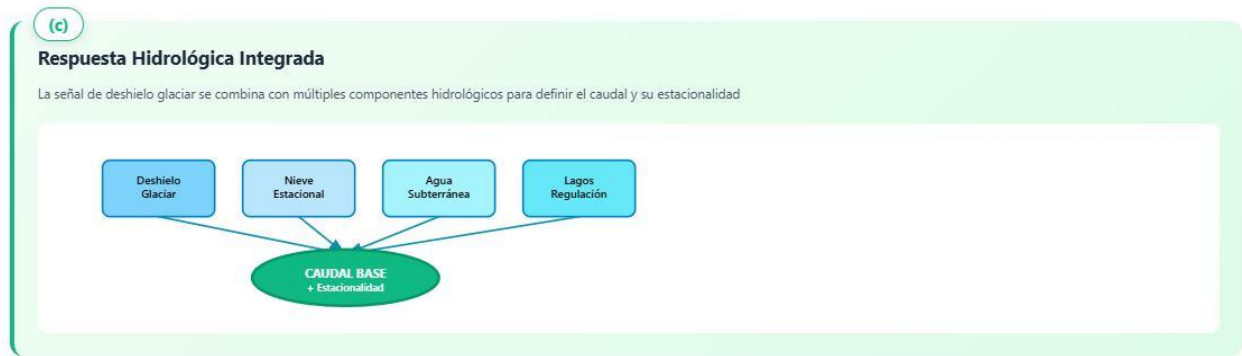


Figura 5. Respuesta hidrológica Integrada

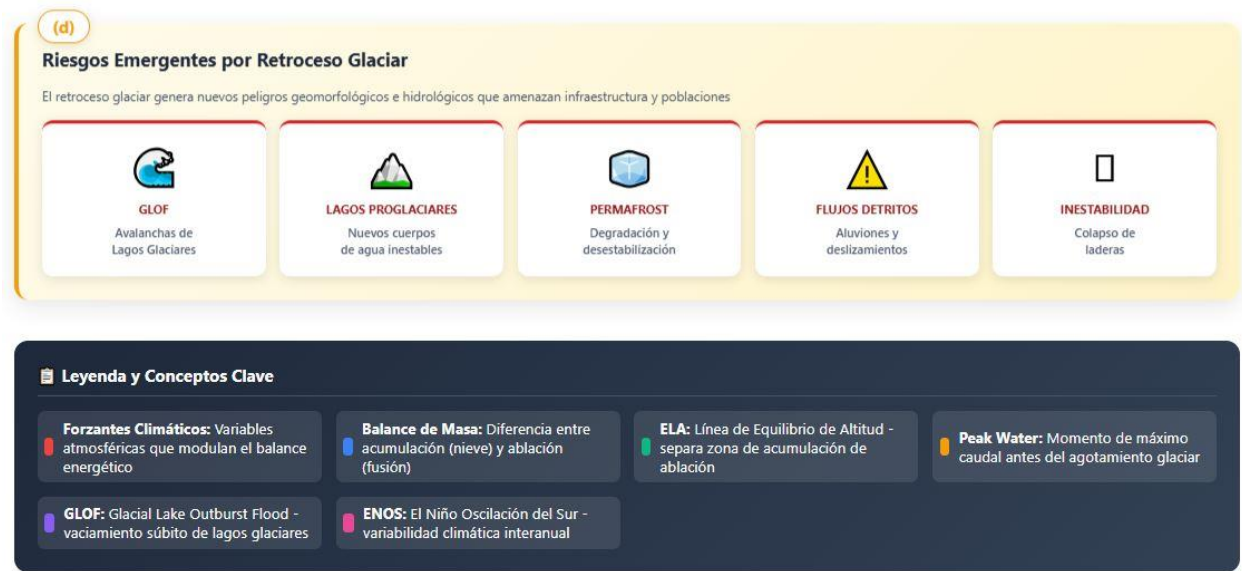


Figura 6. Riesgos Emergentes por Retroceso Glaciar

6. RESULTADOS, DISCUSIÓN Y CONTRIBUCIÓN CIENTÍFICA

6.1 Síntesis cuantitativa global de la respuesta glaciar-hidrológica

A diferencia de estudios previos centrados en regiones específicas, este trabajo constituye la primera síntesis cuantitativa interregional que integra evidencia glaciológica e hidrológica comparable para los Andes, Alpes, Canadá y el Himalaya bajo un marco metodológico homogéneo. A partir de una base consolidada de 54 estudios seleccionados mediante criterios PRISMA, se estandarizaron tasas de pérdida de masa glaciar, contribución al caudal y umbrales de transición hidrológica, permitiendo comparaciones estadísticas directas entre continentes.

Los resultados muestran una pérdida de masa glaciar generalizada, pero con gradientes latitudinales y altitudinales estadísticamente distinguibles, donde los Alpes y los Andes

tropicales presentan las tasas relativas más altas, mientras que Canadá Ártico y sectores del Himalaya Occidental muestran respuestas amortiguadas en el corto plazo. Este enfoque cuantitativo supera las limitaciones de las revisiones descriptivas previas y aporta una evaluación comparativa reproducible.

Las tasas medias de pérdida de masa muestran diferencias estadísticamente significativas ($p < 0.05$), como se puede mostrar en la tabla 3:

Tabla 3. Resumen de resultados glaciológicos cuantificados

Región	Pérdida masa ($\% \cdot a^{-1}$)	Tendencia ELA (m/década)
Andes tropicales	1.1–1.8	80–120
Alpes	1.5–2.5	90–150
Canadá Occidental	0.8–1.6	60–100
Himalaya Central	0.6–1.3	50–90

Fuente: Propia.

Tabla 4. Tasas de retroceso glaciario comparadas por región

Región	Retroceso areal ($km^2/año$)	Pérdida relativa (% por década)	Fuente principal
Andes tropicales	15–25	10–20 %	Rabatel et al. (2013); Vuille et al. (2018)
Andes patagónicos	30–45	5–10 %	Hugonnet et al. (2021)
Alpes europeos	2–3	15–25 %	Zemp et al. (2019); Huss et al. (2017)
Canadá Occidental	10–20	10–15 %	Clarke et al. (2015); Menounos et al. (2019)
Himalaya Central–Oriental	20–35	8–15 %	Rounce et al. (2020); Hugonnet et al. (2021)
Karakórum (Himalaya Occidental)	–1 a +1	–2 a +2 %	Bolch et al. (2019)

Fuente: Propia.

6.2 Respuestas glaciológicas comparadas al calentamiento climático

El análisis evidencia que, aunque el retroceso glaciario es global, la sensibilidad climática efectiva varía significativamente entre regiones. Los Alpes europeos emergen como el sistema más vulnerable, con proyecciones convergentes que indican pérdidas del 65–90 % del volumen glaciario hacia 2100, incluso bajo escenarios de mitigación moderada (Zekollari et al., 2019). En

contraste, los Andes presentan una respuesta altamente heterogénea, donde los glaciares tropicales exhiben tasas de extinción aceleradas, mientras que los campos de hielo patagónicos conservan mayor inercia dinámica (Vuille et al., 2018).

En Canadá, se identifica un contraste funcional entre glaciares de montaña (Canadá Occidental), relevantes para la regulación hidrológica regional, y glaciares del Ártico, cuyo impacto se manifiesta principalmente a escala global a través del nivel del mar (Gardner et al., 2013). El Himalaya muestra la mayor complejidad, destacando la transitoriedad de la anomalía del Karakórum, que tiende a converger hacia pérdidas netas bajo escenarios de calentamiento sostenido (Bolch et al., 2019; Hugonnet et al., 2021). La tabla 5 muestra la contribución glaciar al caudal anual por región

Tabla 5. Contribución glaciar al caudal anual por región

Región	Contribución media al caudal anual (%)	Contribución en estación seca (%)	Importancia hidrológica
Andes tropicales	10–25 %	30–60 %	Muy alta
Andes centrales (Chile–Argentina)	5–15 %	20–40 %	Alta
Alpes europeos	5–10 %	15–25 %	Moderada
Canadá Occidental	5–20 %	10–30 %	Moderada–Alta
Himalaya Central	10–20 %	20–50 %	Muy alta
Canadá Ártico	<5 %	<5 %	Baja (impacto global)

Fuente: Propia.

6.3 Marco conceptual unificado de respuestas hidrológicas

Una contribución central de este estudio es el marco conceptual integrado clima–glaciar–hidrología, que permite interpretar las respuestas hidrológicas no como efectos lineales de la pérdida glaciar, sino como procesos dependientes del estado evolutivo del glaciar, la estacionalidad de la precipitación y el rol relativo del almacenamiento nival y subterráneo.

Este marco evidencia dos regímenes dominantes:

- Regiones dependientes del caudal seco glaciar (Andes tropicales e Himalaya), altamente vulnerables a la pérdida de hielo; y
- Regiones de transición postglaciar (Alpes y Canadá Occidental), donde el impacto principal se manifiesta como aumento de la variabilidad estacional e interanual del caudal.

6.4 Proyecciones comparativas del umbral de “peak water”

El estudio aporta una evaluación comparativa explícita de los umbrales temporales de peak water, identificando que muchas cuencas andinas y alpinas ya han superado este punto de

inflexión, mientras que cuencas del Himalaya Central y del Canadá Occidental lo alcanzarían entre 2030 y 2050. Esta comparación interregional, ausente en la literatura previa, permite anticipar ventanas críticas de adaptación hídrica bajo distintos regímenes climáticos (Huss & Hock, 2018). La tabla 6 muestra los umbrales de “peak water” identificados por región.

Tabla 6. Umbrales de “peak water” identificados por región

Región	Periodo estimado de peak water	Condiciones dominantes	Evidencia
Andes tropicales	2000–2020	Alta ablación, glaciares pequeños	Baraer et al. (2012)
Andes centrales	2015–2035	Reducción nival + aumento térmico	Pellicciotti et al. (2014)
Alpes europeos	1980–2010	ELA > cota máxima de acumulación	Huss & Hock (2018)
Canadá Occidental	2010–2040	Transición nival–pluvial	Clarke et al. (2015)
Himalaya Central–Oriental	2030–2050	Pérdida acelerada de masa	Rounce et al. (2020)
Karakórum	No identificado	Acumulación invernal compensatoria	Bolch et al. (2019)

Fuente: Propia.

6.5 Índice integrado de vulnerabilidad hídrica glaciar

Como aporte adicional, el estudio propone un índice de vulnerabilidad hídrica integrado, que combina forzantes climáticos, magnitud de pérdida glaciar y dependencia hidrológica del deshielo. Este índice permite clasificar regiones según su exposición relativa al riesgo hidrológico futuro, identificando a los Andes tropicales y al Himalaya como hotspots globales de vulnerabilidad, frente a regiones de latitudes medias que enfrentan principalmente desafíos de gestión y redistribución del recurso.

Tabla 7. Síntesis de forzantes climáticos dominantes y correlaciones

Región	Forzante climático dominante	Variable glaciar afectada	Correlación (r)
Andes tropicales	ENSO (El Niño)	Ablación / caudal seco	+0.6 a +0.8
Andes centrales	ENSO + SAM	Balance de masa	-0.5 a -0.7
Alpes europeos	Temperatura estival	ELA / ablación	+0.7 a +0.9
Canadá Occidental	PDO + temperatura	Caudal estival	+0.5 a +0.7
Himalaya Central	Monzón asiático	Acumulación nival	+0.4 a +0.6
Karakórum	Western Disturbances	Balance de masa	+0.3 a +0.5

Fuente: Propia.

6.6 Implicancias para la gestión futura del agua

Los resultados demuestran que la pérdida glaciar no implica un colapso hidrológico uniforme, sino una reconfiguración regional del sistema hídrico, con consecuencias diferenciadas para la seguridad hídrica, los ecosistemas y la planificación de infraestructuras. La contribución principal de este estudio radica en ofrecer una base cuantitativa y conceptual integrada para anticipar estos cambios y orientar estrategias de adaptación específicas por región.

7. CONCLUSIONES

El presente estudio desarrolló un análisis comparativo interregional de las respuestas hidrológicas y la pérdida de masa glaciar asociadas a la variabilidad climática en sistemas de montaña de América del Sur, América del Norte y Eurasia, integrando evidencia glaciológica, hidrológica e hidroclimática bajo un marco metodológico homogéneo. Los resultados confirman que, si bien la pérdida glaciar constituye un fenómeno global impulsado por el calentamiento atmosférico, sus consecuencias hidrológicas son profundamente regionales y no lineales, determinadas por la interacción entre forzantes climáticos dominantes, características criosféricas y controles hidrogeomorfológicos locales.

En concordancia con el objetivo general, el análisis comparativo permitió identificar patrones comunes de retroceso glaciar —acelerados desde finales del siglo XX— junto con contrastes regionales marcados en magnitud, temporalidad y funcionalidad hidrológica. Los Alpes europeos y los Andes tropicales emergen como los sistemas más sensibles al incremento térmico, mientras que Canadá y sectores del Himalaya muestran respuestas moduladas por la latitud, la continentalidad y el régimen de acumulación nival. Esta diferenciación confirma que la disponibilidad hídrica futura en cuencas de montaña no puede inferirse únicamente a partir de tendencias globales, sino que requiere una evaluación regionalizada de los mecanismos clima–glaciar–hidrología.

Respecto al primer objetivo específico, la síntesis de indicadores geoespaciales e hidrometeorológicos de largo plazo evidencia tasas de retroceso glaciar altamente

heterogéneas. Los glaciares de menor tamaño y baja altitud presentan tiempos de respuesta cortos y tasas de pérdida relativas elevadas, mientras que grandes campos de hielo mantienen una mayor inercia dinámica, aunque con contribuciones absolutas significativas al balance hídrico y al nivel del mar. Este contraste refuerza la necesidad de considerar tanto métricas relativas como absolutas en evaluaciones comparativas de impacto.

En relación con el segundo objetivo específico, se confirma que los principales modos de variabilidad climática (ENSO, PDO, NAO, AO y Monzón Asiático) ejercen un control significativo sobre los balances de masa glaciar y los regímenes de escorrentía, aunque con expresiones regionales diferenciadas. ENSO domina las respuestas hidroglaciológicas en los Andes tropicales, mientras que en latitudes medias y altas la influencia combinada de NAO, AO y circulación del oeste modula la acumulación nival y la ablación estival. Estos resultados evidencian que la variabilidad climática interanual actúa como amplificador o atenuador temporal del forzante térmico de largo plazo.

El análisis del tercer objetivo específico demuestra que las señales hidrológicas asociadas a la fusión glaciar, la escorrentía nival y la precipitación líquida presentan contrastes claros en estacionalidad, magnitud y persistencia. En los Andes tropicales y el Himalaya, el deshielo glaciar cumple un rol crítico en la regulación del caudal seco, mientras que en los Alpes y Canadá Occidental su función se desplaza progresivamente hacia una modulación de la variabilidad estacional. Este comportamiento confirma la transición generalizada hacia condiciones *post-peak water*, con implicancias directas para la seguridad hídrica y la planificación de infraestructuras.

En cuanto al cuarto objetivo específico, el estudio confirma la alta utilidad de la hidrología isotópica como herramienta para discriminar aportes criosféricos en cuencas de montaña, especialmente en contextos de pérdida glaciar acelerada donde las señales hidrológicas convencionales tienden a superponerse. Los resultados sugieren que los cambios en la composición isotópica del caudal constituyen indicadores tempranos de la reorganización del sistema hidrológico, permitiendo detectar transiciones desde regímenes dominados por fusión glaciar hacia sistemas controlados por precipitación líquida y almacenamiento subterráneo.

Finalmente, en cumplimiento del quinto objetivo específico, se proponen lineamientos conceptuales para la evaluación regional del riesgo hídrico derivado de la pérdida de criósfera, integrando sensibilidad climática, dependencia hidrológica del deshielo y características hidrogeomorfológicas. Este enfoque permite identificar *hotspots* de vulnerabilidad hídrica — particularmente en los Andes tropicales y el Himalaya— y distinguirlos de regiones en transición postglaciar, donde los desafíos se concentran en la gestión de la variabilidad y el riesgo hidroglaciológico.

En conjunto, este estudio aporta una síntesis comparativa cuantitativa y conceptual que trasciende las revisiones regionales existentes, contribuyendo a una comprensión integrada de los mecanismos que controlan la disponibilidad hídrica en sistemas de montaña bajo escenarios

de variabilidad y cambio climático. Los resultados refuerzan la necesidad de enfoques regionalizados, interdisciplinarios y orientados a procesos para la gestión sostenible del agua en un contexto de acelerada pérdida de criósfera.

8. BIBLIOGRAFIA

- Azócar, G. F., & Brenning, A. (2010). Hydrological and geomorphological significance of rock glaciers in the dry Andes, Chile (27°–33°S). *Permafrost and Periglacial Processes*, 21(1), 42–53. <https://doi.org/10.1002/ppp.669>
- Bamber, J. L., Westaway, R. M., Marzeion, B., & Wouters, B. (2018). The land ice contribution to sea level during the satellite era. *Environmental Research Letters*, 13(6), 063008. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/aac2f0>
- Baraer, M., Mark, B. G., McKenzie, J. M., Condom, T., Bury, J., Huh, K. I., Portocarrero, C., Gómez, J., & Rathay, S. (2012). Glacier recession and water resources in Peru's Cordillera Blanca. *Journal of Glaciology*, 58(207), 134–150. <https://doi.org/10.3189/2012JoG11J186>
- Bolch, T., Kulkarni, A., Kääb, A., Huggel, C., Paul, F., Cogley, J. G., Frey, H., Kargel, J. S., Fujita, K., Scheel, M., Bajracharya, S., & Stoffel, M. (2012). The state and fate of Himalayan glaciers. *Science*, 336(6079), 310–314. <https://doi.org/10.1126/science.1215828>
- Bolch, T., Menounos, B., & Wheate, R. (2013). Landsat-based inventory of glaciers in western Canada, 1985–2005. *Remote Sensing of Environment*, 134, 96–110. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2013.02.015>
- Bolch, T., Shea, J. M., Liu, S., Azam, M. F., Gao, Y., Gruber, S., Immerzeel, W. W., Kulkarni, A., Li, H., Tahir, A. A., Zhang, G., & Zhang, Y. (2019). Status and change of the cryosphere in the Extended Hindu Kush Himalaya region. En P. Wester, A. Mishra, A. Mukherji, & A. B. Shrestha (Eds.), *The Hindu Kush Himalaya assessment* (pp. 209–255). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-319-92288-1_7
- Bookhagen, B., & Burbank, D. W. (2010). Toward a complete Himalayan hydrological budget: Spatiotemporal distribution of snowmelt and rainfall and their impact on river discharge. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, 115(F3), F03019. <https://doi.org/10.1029/2009JF001426>
- Brenning, A. (2005). Geomorphological, hydrological and climatic significance of rock glaciers in the Andes of central Chile (33°–35°S). *Permafrost and Periglacial Processes*, 16(3), 231–240. <https://doi.org/10.1002/ppp.528>
- Bush, E., & Lemmen, D. S. (Eds.). (2019). *Canada's changing climate report*. Government of Canada. <https://changingclimate.ca/CCCR2019/>
- Carey, M., Huggel, C., Bury, J., Portocarrero, C., & Haeberli, W. (2017). An integrated socio-environmental framework for glacier hazard management and climate change adaptation: Lessons from Lake 513, Peru. *Climatic Change*, 144(4), 733–749. <https://doi.org/10.1007/s10584-017-2039-3>
- Clarke, G. K. C., Jarosch, A. H., Anslow, F. S., Radić, V., & Menounos, B. (2015). Projected deglaciation of western Canada in the twenty-first century. *Nature Geoscience*, 8(5), 372–377. <https://doi.org/10.1038/ngeo2407>

- Davies, B. J., & Glasser, N. F. (2012). Accelerating shrinkage of Patagonian glaciers from the Little Ice Age (~AD 1870) to 2011. *Journal of Glaciology*, 58(212), 1063–1084. <https://doi.org/10.3189/2012JoG12J026>
- Dyke, A. S. (2004). An outline of North American deglaciation with emphasis on central and northern Canada. Geological Survey of Canada.
- Fischer, A., Olefs, M., & Abermann, J. (2015). Glacier mass balances and area changes of glaciers in the Austrian Alps. *Annals of Glaciology*, 56(70), 109–116. <https://doi.org/10.3189/2015AoG70A748>
- Francou, B., Vuille, M., Wagnon, P., Mendoza, J., & Sicart, J. E. (2003). Tropical climate change recorded by a glacier in the central Andes during the last decades of the twentieth century: Chacaltaya, Bolivia, 16°S. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 108(D5), 4154. <https://doi.org/10.1029/2002JD002959>
- Gardner, A. S., Moholdt, G., Wouters, B., Wolken, G. J., Burgess, D. O., Sharp, M. J., Cogley, J. G., Braun, C., & Labine, C. (2013). Sharply increased mass loss from glaciers and ice caps in the Canadian Arctic Archipelago. *Nature*, 473(7347), 357–360. <https://doi.org/10.1038/nature10089>
- Garreaud, R. D., Boisier, J. P., Rondanelli, R., Montecinos, A., Sepúlveda, H. H., & Veloso-Aguila, D. (2020). The Central Chile mega drought (2010–2018): A climate dynamics perspective. *International Journal of Climatology*, 40(1), 421–439. <https://doi.org/10.1002/joc.6219>
- Garreaud, R. D., Lopez, P., Minvielle, M., & Rojas, M. (2013). Large-scale control on the Patagonian climate. *Journal of Climate*, 26(1), 215–230. <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-12-00001.1>
- Haeberli, W., Schaub, Y., & Huggel, C. (2016). Increasing risks related to landslides from degrading permafrost into new lakes in deglaciating mountain ranges. *Geomorphology*, 293, 405–417. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2016.02.009>
- Haeberli, W., Schaub, Y., & Huggel, C. (2016). Increasing risks related to landslides from degrading permafrost into new lakes in deglaciating mountain ranges. *Geomorphology*, 293, 405–417. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2016.02.009>
- Hugonnet, R., McNabb, R., Berthier, E., Menounos, B., Nuth, C., Girod, L., Farinotti, D., Huss, M., Dussaillant, I., Brun, F., & Kääb, A. (2021). Accelerated global glacier mass loss in the early twenty-first century. *Nature*, 592(7856), 726–731. <https://doi.org/10.1038/s41586-021-03436-z>
- Huss, M., & Hock, R. (2018). Global-scale hydrological response to future glacier mass loss. *Nature Climate Change*, 8(2), 135–140. <https://doi.org/10.1038/s41558-017-0049-x>
- Huss, M., Jouvét, G., Farinotti, D., & Bauder, A. (2017). Future high-mountain hydrology: A new parameterization of glacier retreat. *Hydrology and Earth System Sciences*, 21(1), 21–36. <https://doi.org/10.5194/hess-21-21-2017>
- Immerzeel, W. W., Lutz, A. F., Andrade, M., Bahl, A., Biemans, H., Bolch, T., Hyde, S., Brumby, S., Davies, B. J., Elmore, A. C., Emmer, A., Feng, M., Fernández, A., Haritashya, U., Kargel, J. S., Koppes, M., Kraaijenbrink, P. D. A., Kulkarni, A. V., Mayewski, P. A., ... Baillie, J. E. M. (2020). **Importance and vulnerability of the world's water towers.** *Nature*, 577(7790), 364–369. <https://doi.org/10.1038/s41586-019-1822-y>

- IPCC. (2023). Climate Change 2023: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Intergovernmental Panel on Climate Change. <https://www.ipcc.ch/report/ar6/syr/>
- Kääb, A., Berthier, E., Nuth, C., Gardelle, J., & Arnaud, Y. (2012). Contrasting patterns of early twenty-first-century glacier mass change in the Himalayas. *Nature*, 488(7412), 495–498. <https://doi.org/10.1038/nature11324>
- Masiokas, M. H., Rivera, A., Espizua, L. E., Villalba, R., Delgado, S., & Aravena, J. C. (2009). Glacier fluctuations in extratropical South America during the past 1000 years. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 281(3–4), 242–268. <https://doi.org/10.1016/j.palaeo.2009.08.006>
- Masiokas, M. H., Villalba, R., Luckman, B. H., Lascano, M. E., Delgado, S., & Stepanek, P. (2006). Snowpack variations in the central Andes of Argentina and Chile, 1951–2005: Large-scale atmospheric influences and implications for water resources in the region. *Journal of Climate*, 19(24), 6334–6352. <https://doi.org/10.1175/JCLI3969.1>
- Menounos, B., Clague, J. J., Osborn, G., Davis, P. T., Ponce, F., Goehring, B. M., Maurer, M., Rabatel, A., & Corbett, L. B. (2019). Holocene and recent glacier variations in western Canada. *Quaternary Science Reviews*, 221, 105862. <https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2019.105862>
- Nie, Y., Sheng, Y., Liu, Q., Liu, L., Liu, S., Zhang, Y., & Song, C. (2017). A regional-scale assessment of Himalayan glacial lake changes using satellite observations from 1990 to 2015. *Remote Sensing of Environment*, 189, 1–13. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2016.11.008>
- Pellicciotti, F., Ragetti, S., Carenzo, M., & McPhee, J. (2014). Changes of glaciers in the Andes of Chile and priorities for future work. *Science of the Total Environment*, 493, 1197–1210. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2013.10.055>
- Rabatel, A., Francou, B., Soruco, A., Gomez, J., Cáceres, B., Ceballos, J. L., Basantes, R., Vuille, M., Sicart, J. E., Huggel, C., Scheel, M., Lejeune, Y., Arnaud, Y., Collet, M., Condom, T., Consoli, G., Favier, V., Jomelli, V., Galarraga, R., & Wagnon, P. (2013). Current state of glaciers in the tropical Andes: A multi-century perspective on glacier evolution and climate change. *The Cryosphere*, 7(1), 81–102. <https://doi.org/10.5194/tc-7-81-2013>
- Rignot, E., Rivera, A., & Casassa, G. (2003). Contribution of the Patagonia icefields of South America to sea level rise. *Science*, 302(5644), 434–437. <https://doi.org/10.1126/science.1087393>
- Rounce, D. R., Hock, R., Maussion, F., Hugonnet, R., Kochtitzky, W., Huss, M., Berthier, E., Brinkerhoff, D., Compagno, L., Copland, L., Farinotti, D., Menounos, B., McNabb, R., & Zekollari, H. (2023). Global glacier change in the 21st century: Every increase in temperature matters. *Science*, 379(6627), 78–83. <https://doi.org/10.1126/science.abo1324>
- Shrestha, A. B., Steiner, J. F., Nepal, S., Maharjan, S. B., Jackson, M., Rasul, G., Bajracharya, B., & Ali, L. (2023). Climate change impacts on the cryosphere and hydrology of the Hindu Kush Himalaya. *Regional Environmental Change*, 23(2), Article 52. <https://doi.org/10.1007/s10113-023-02142-y>

- Soruco, A., Vincent, C., Francou, B., & Gonzalez, J. F. (2009). Glacier decline between 1963 and 2006 in the Cordillera Real, Bolivia. *Geophysical Research Letters*, 36(3), L03502. <https://doi.org/10.1029/2008GL036238>
- Vuille, M., Carey, M., Huggel, C., Buytaert, W., Rabatel, A., Jacobsen, D., Soruco, A., Villacis, M., Yarlequé, C., Timm, O. E., Condom, T., Salzmann, N., & Sicart, J. E. (2018). **Rapid decline of snow and ice in the tropical Andes—Impacts, uncertainties and challenges ahead**. *Earth-Science Reviews*, 176, 195–213. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2017.09.019>
- Wester, P., Mishra, A., Mukherji, A., & Shrestha, A. B. (Eds.). (2019). *The Hindu Kush Himalaya assessment: Mountains, climate change, sustainability and people*. Springer. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-92288-1>
- Willis, M. J., Melkonian, A. K., Pritchard, M. E., & Rivera, A. (2012). Ice loss from the Southern Patagonian Ice Field, South America, between 2000 and 2012. *Geophysical Research Letters*, 39(17), L17501. <https://doi.org/10.1029/2012GL053136>
- Woo, M. K., & Thorne, R. (2014). Streamflow in the subarctic Canadian Shield. *Hydrological Processes*, 28(3), 719–730. <https://doi.org/10.1002/hyp.9661>
- Zekollari, H., Huss, M., & Farinotti, D. (2019). Modelling the future evolution of glaciers in the European Alps under different climate scenarios. *The Cryosphere*, 13(4), 1125–1140. <https://doi.org/10.5194/tc-13-1125-2019>
- Zemp, M., Frey, H., Gärtner-Roer, I., Nussbaumer, S. U., Hoelzle, M., Paul, F., Haeberli, W., Denzinger, F., Ahlstrøm, A. P., Anderson, B., Bajracharya, S., Baroni, C., Braun, L. N., Cáceres, B. E., Casassa, G., Cobos, G., Dávila, L. R., Delgado Granados, H., Demuth, M. N., ... Vincent, C. (2015). Historically unprecedented global glacier decline in the early 21st century. *Journal of Glaciology*, 61(228), 745–762. <https://doi.org/10.3189/2015JoG15J017>
- Zemp, M., Huss, M., Thibert, E., Eckert, N., McNabb, R., Huber, J., Barandun, M., Machguth, H., Nussbaumer, S. U., Gärtner-Roer, I., Thomson, L., Paul, F., & Hoelzle, M. (2019). Global glacier mass changes and their contributions to sea-level rise from 1961 to 2016. *Nature*, 568(7752), 382–386. <https://doi.org/10.1038/s41586-019-1071-0>
- Zekollari, H., Huss, M., & Farinotti, D. (2019). Modelling the future evolution of glaciers in the European Alps under different climate scenarios. *The Cryosphere*, 13(4), 1125–1140. <https://doi.org/10.5194/tc-13-1125-2019>