

Valoración de servicios ecosistémicos vinculados al recurso hídrico de los glaciares de las cuencas Olivares-Colorado, Andes de Chile Central

Evaluation of ecosystem services linked to the water resource of the glaciers of the Olivares-Colorado basins, Andes of Central Chile

Alexis Segovia Rocha^{1,2} , Gino Casassa Rogazinski³ 

RESUMEN

Se realizó una valoración de los servicios ecosistémicos del almacenaje de agua y aporte hídrico continuo en las cuencas de los Ríos Olivares y Colorado, cuenca del Río Maipo, Región Metropolitana, Chile. Para realizar la valoración del servicio ecosistémico de almacenaje de agua se utilizó el método indirecto de mercado “costo evitado”, y para estimar el valor del aporte hídrico continuo se utilizó una valoración directa de mercado. Los resultados arrojaron que las cuencas Olivares-Colorado en conjunto contienen el 29,2% de glaciares, el 46,2% de la superficie de hielo y el 55,7% del agua en forma de hielo de la cuenca del Río Maipo. La suma de ambos valores de servicios ecosistémicos para ambas cuencas resultó en un valor anual de USD 902 millones, y a un valor presente proyectado a 50 años de USD 14.224 millones. Dicho valor anual supera en 32 veces el presupuesto para todo el Sistema Nacional de Áreas Silvestres Protegidas el Estado (SNASPE) para el año 2022, por lo que su alto valor asociado, justifica ampliamente la protección de estos glaciares.

Palabras clave: Aporte hídrico, Glaciar, Parque Nacional, Servicios ecosistémicos

ABSTRACT

An assessment of the ecosystem services of water storage and continuous water supply was carried out in the Olivares and Colorado River basins, Maipo River basin, Metropolitan Region, Chile. To carry out the assessment of the ecosystem service of water storage, the indirect market method “avoided cost” was used, and to estimate the value of continuous water supply, a direct market valuation was used. The results showed that the Olivares-Colorado basins together contain 29.2% of glaciers, 46.2% of the ice surface and 55.7% of the water in the form of ice in the Maipo River basin. The sum of both ecosystem service values for both basins resulted in an annual value of USD 902 million, and a projected present value of USD 14,224 million over 50 years. This annual value exceeds by 32 times the budget for the entire National System of State Protected Wild Areas

¹ Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Forestales y de la Conservación de la Naturaleza, Santiago, Chile; alexisegov@uchile.cl

² Universitat de Barcelona, Departamento de Geografía, Barcelona, Catalunya, España; alexisegov@uchile.cl

³ Universidad de Magallanes, Centro de Investigación GAIA Antártica, Instituto de la Patagonia, Punta Arenas, Chile; gino.casassa@gmail.com

(SNASPE) for the year 2022, so its high associated value amply justifies the protection of these glaciers.

Keywords: ecosystem services, glacier, national park, water supply

Introducción

La cuenca del Río Maipo en la Región Metropolitana (RM), según datos del Inventario Público de Glaciares 2022 versión 2 (IPG2022_v2), posee 1.272 glaciares con una superficie total de 451 km². De estos, la mayoría corresponde a glaciares del tipo rocosos (802 glaciares con una superficie de 141 km²). No obstante lo anterior, la mayor superficie de hielo está representada por glaciares de valle (37 glaciares con 168,9 km²), que, a pesar de ser solo 37 cuerpos de hielo en esta categoría, representan los glaciares más extensos en términos de superficie de la cuenca del Río Maipo, concentrando un 37,5% del total de superficie de hielo.

Los glaciares juegan un rol esencial en el ciclo hidrológico y en el medio ambiente, especialmente en el almacenamiento, la generación y preservación del escurrimiento en los cursos de agua, con un rol crítico en los ecosistemas bajo su influencia (Segovia, 2014). Para la población estos cuerpos de hielo ofrecen variados servicios ecosistémicos tanto de provisión, de regulación y culturales, tomando cada más relevancia producto a la merma ambiental acelerada que los glaciares han sufrido en las últimas décadas con motivo del calentamiento climático, unido en gran parte de Chile a la baja en las precipitaciones. Al respecto, Caro (2020) plantea que los glaciares que se encuentran en los Andes chilenos (17,6° a 55,4°S) muestran grandes diferencias en cuanto a variables climáticas y topográficas, y la variabilidad espacial de los cambios está controlada principalmente por la variabilidad espacial de la precipitación desde los trópicos hasta los Andes secos (8°–37°S), así, una reducción de las precipitaciones anuales tendrán un mayor impacto en la pérdida de masa de los glaciares en los Trópicos Exteriores y los Andes Secos en comparación con los Andes Húmedos (Caro, 2021).

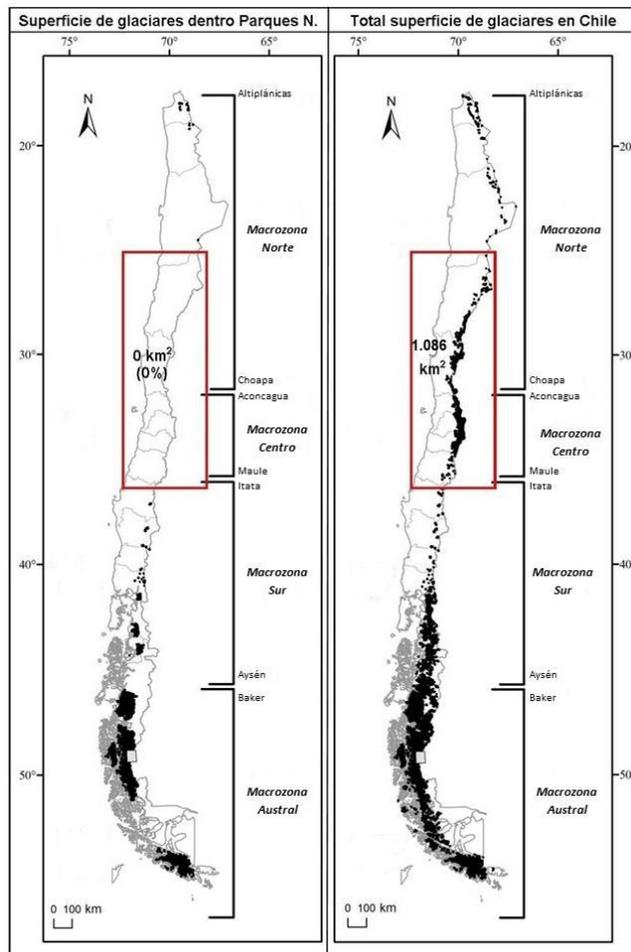
Así, a medida que los glaciares ajustan su tamaño en respuesta a las variaciones climáticas, se pueden esperar cambios a largo plazo en la producción de agua de deshielo, lo que afectará la disponibilidad local de recursos hídricos. Ayala et al. (2020), establece que el balance de masa de los glaciares de la cuenca del Maipo entre 1955-2016 tuvo una tendencia general decreciente, destacándose la cuenca del río Olivares con fuertes balances de masa negativos. Aún más, en un escenario hipotético de clima constante, el volumen de los glaciares se reduciría a un 81 ± 38 % del volumen del año 2000. Del mismo modo, Farías-Barahona et al. (2020) indica balances de masa negativos promedio de $-0,12 \pm 0,06$ m eq agua⁻¹ para la cuenca del río Maipo entre 1955 y 2013, y que el balance de masa más negativo fue el de la subcuenca del río Olivares, con un valor medio de $-0,29 \pm 0,07$ m eq agua⁻¹.

En términos de protección específica de ecosistemas de ambientes glaciares, la cuenca del Río Maipo no poseía hasta el año 2023 ningún Parque Nacional, por lo tanto tampoco había glaciares dentro de esta categoría de protección que cumplieran con la representación ambiental de estos ecosistemas (Casassa et al., 2019). Es más, según Segovia (2015), a nivel nacional existía en la zona norte-centro del país una faja que comprendía 6 regiones, desde la Región de Atacama

hasta la Región del Maule inclusive, con ausencia de glaciares dentro de la categoría de Parque Nacional (Figura N°1). No obstante, dichas 6 regiones en conjunto suman un total de 4.846 glaciares con una superficie de 1.086,9 km² de hielo glaciár⁴.

Figura N°1.

Izquierda: Esquema de glaciares dentro de Parques Nacionales, por macrozonas glaciológicas, en negro. Derecha: Esquema del total de glaciares en cada macrozona glaciológica, también en negro.



Fuente: Adaptado de Segovia (2015), en base a IPG2022_v2.

En Chile, las restricciones ambientales en glaciares incluyen lo que estipula el Código de Aguas en su artículo n°5, en que no se podrán constituir derechos de aprovechamiento en glaciares, y la ley N°19.300 sobre bases del medio ambiente que estipula en su artículo n°11 letra "d" que los proyectos que se localicen próximos a glaciares requerirán de la elaboración de un estudio de impacto ambiental (EIA), y en su artículo n°36 dice que los glaciares forman parte de las áreas protegidas si se encuentran dentro de su perímetro. No obstante lo anterior, la gran parte de los tipos de áreas protegidas permiten aprovechamientos sostenibles. Además, el artículo 10 letra "p" de

⁴ Según IPG2022_v2

la misma Ley N°19.300 estipula que la: *“Ejecución de obras, programas o actividades en parques nacionales, reservas nacionales, monumentos naturales, reservas de zonas vírgenes, santuarios de la naturaleza, parques marinos, reservas marinas, humedales urbanos o en cualesquiera otras áreas colocadas bajo protección oficial, en los casos en que la legislación respectiva lo permita”,* deberán someterse al sistema de evaluación de impacto ambiental si los proyectos o actividades son susceptibles de causar impacto ambiental en cualesquiera de sus fases.

Entonces, no existiendo un estatuto jurídico específico que proteja los glaciares, la protección más explícita es a través del sistema de áreas protegidas, esto debido a que los planes de manejo como instrumentos de gestión hacen mención a la zonificación y a las normas de las áreas glaciarias dentro de las zonas protegidas. En este sentido, y debido a la subrepresentación de ecosistemas glaciares en parques nacionales en las macrozonas norte y centro de Chile, es que el 4 de marzo del 2022 el Consejo de Ministros para la Sustentabilidad se pronunció favorablemente y propuso al Presidente de la República de Chile la creación del “Parque Nacional Glaciares de Santiago” en la Región Metropolitana (República de Chile, 2022), que comprende las cuencas del Río Olivares y Río Colorado, abarcando 75.114 ha en la comuna de San José de Maipo por sobre los 3.600 m s.n.m. y hasta la divisoria de las mencionadas cuencas⁵. Más tarde, el día 2 de mayo de 2023 se oficializó la creación del parque nacional en el diario oficial de fecha 16 de agosto de 2023 (Diario oficial, 2023).

En base a lo anterior, es importante establecer el aporte de los glaciares que justifica la iniciativa de crear un Parque Nacional que establece entre sus objetivos el resguardar las máximas reservas de agua de la cuenca del Río Maipo. La realización de un análisis de los principales servicios ecosistémicos que aportan los glaciares al territorio es pertinente para establecer la importancia, en este caso económica, para la sociedad, de los cuerpos de hielo en la parte alta de la cuenca más poblada del país.

El concepto de “servicios ecosistémicos” deviene en un esfuerzo por crear puentes entre los tomadores de decisiones y la sociedad en general acerca de la estrecha relación entre el mantenimiento de las funciones ecológicas básicas de la naturaleza y el bienestar humano (Balvanera y Cotler, 2007). La definición de servicios ecosistémicos más aceptada es: *“Aquellos beneficios que las personas obtienen de los ecosistemas, estos incluyen servicios de provisión como comida, agua y madera; servicios de regulación tales como regulación de ciclos climáticos, regulación de inundaciones, residuos y calidad de aguas y servicios culturales de tipo recreacional, estéticos y espirituales”* (Millennium Ecosystem Assessment, 2005). Es importante señalar, que las metodologías y aproximaciones para estimar el valor económico de los servicios ecosistémicos no siempre tienen como objetivo la determinación de un valor monetario, pero si hay algunas, principalmente desarrolladas en el marco de la economía ambiental, que permiten obtener valores monetarios para algunos bienes ambientales. En este sentido, cabe señalar que con metodologías de valoración directa no se pretende valorar el ambiente en su acepción más amplia sino que muchas veces se busca estimar valores económicos base (Labandeira et al., 2007). Por esta razón este estudio pretende cuantificar, en base a metodologías de valoración directas e indirectas de mercado, el valor económico de los servicios ecosistémicos de almacenaje de agua contenida en los glaciares y de aporte hídrico al caudal de la cuenca Olivares - Colorado en los meses de verano, periodo en que los glaciares hacen su máxima contribución.

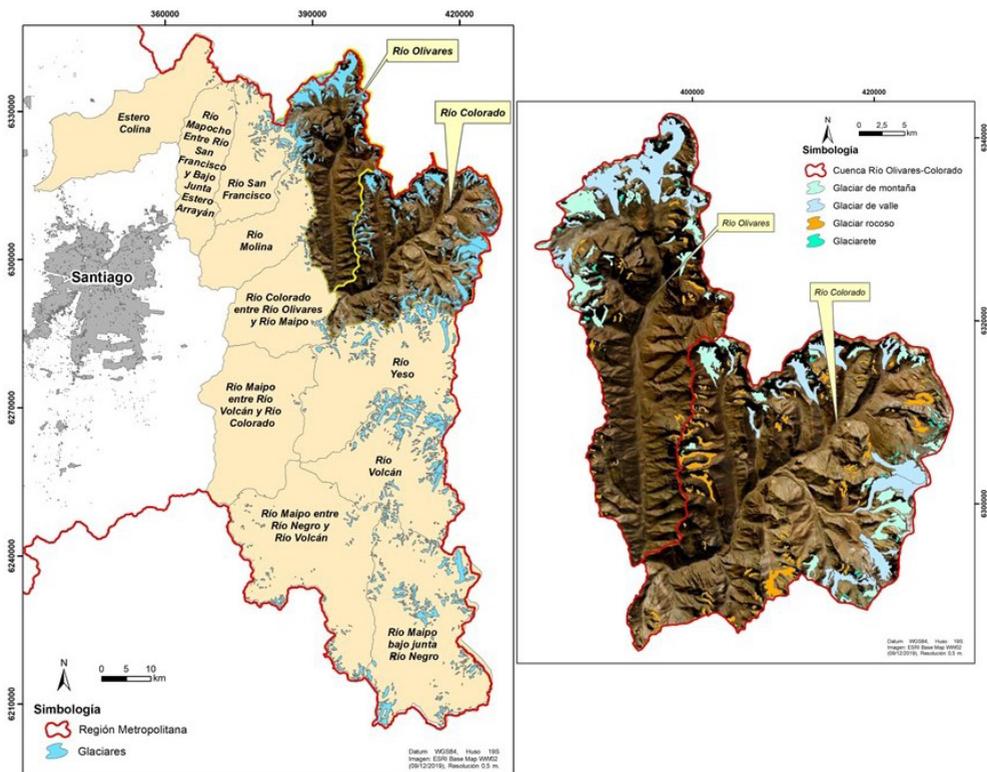
⁵ CONAF, 2022. <https://www.conaf.cl/parque-nacional-glaciares-de-santiago-polo-de-investigacion-y-de-turismo-de-interes-especial/>

Área de estudio

El área de estudio se sitúa en las cuencas de los ríos Olivares y Colorado, dentro de la cuenca del río Maipo, en la Región Metropolitana de Chile. Las cuencas de los ríos Olivares y Colorado, son de las más importantes en términos de glaciación dentro de la cuenca del río Maipo. Así, la cuenca del Río Olivares, representa un 9,4% de todos los glaciares de la cuenca del Río Maipo y un 19% de su superficie de hielo. Esta cuenca tiene una superficie de 543,2 km², elevándose desde los 1.540 m s.n.m. en la confluencia con el Río Colorado, hasta los 6.070 m s.n.m. en la cumbre del cerro Nevado del Plomo. Aquí se sitúan algunos de los glaciares más grandes de la Región Metropolitana, como el glaciar Juncal Sur (24,4 km²), el glaciar Olivares Gamma-A (11,2 km²) y el glaciar Olivares Beta (8,2 km²) (IPG2022_v2). Por su parte, la cuenca del Río Colorado representa un 19,7% de todos los glaciares de la cuenca del río Maipo y un 27,1% de la superficie de hielo. Tiene 788,8 km² de superficie y se eleva desde los 1.550 m s.n.m. en el exutorio donde confluye con el Río Olivares, hasta los 6.570 m s.n.m. en la cumbre del volcán Tupungato. En esta cuenca también se sitúan algunos de los glaciares más grandes de la Región Metropolitana, como el glaciar Azufre (9,7 km²), el glaciar Tupungatito (7,5 km²) y el glaciar Yeso 1 (6,3 km²) (IPG2022_V2). En conjunto ambas cuencas representan el 29,1% del total de glaciares de la cuenca del Río Maipo, el 46,1% de la superficie de hielo y el 57,7% del agua almacenada (Figura N°2 y 3).

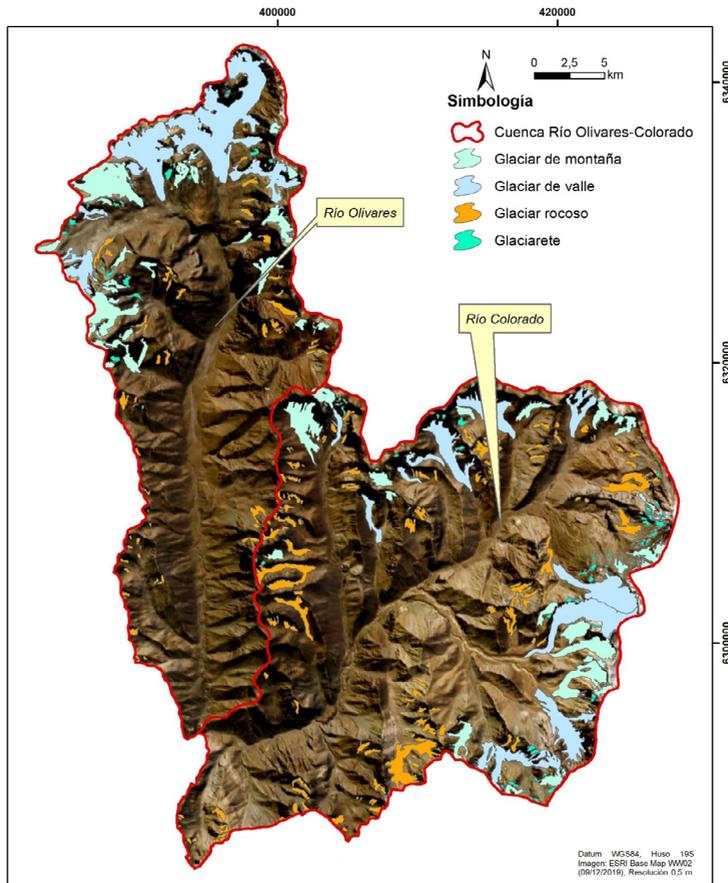
Figura N°2.

Ubicación de las cuencas del río Olivares y río Colorado dentro de la cuenca del río Maipo. En la figura de la izquierda se muestran todas las cuencas del Río Maipo que incorporan glaciares.



Fuente: Elaboración propia. Imagen ESRI Base MAP WW02 (09/12/2019), resolución 0,5 m. Datum WGS84, Huso 19s.

Figura N°3.
Glaciares en las cuencas del Río Olivares y Río Colorado.



Fuente: Elaboración propia. Imagen ESRI Base MAP WW02 (09/12/2019), resolución 0,5 m. Datum WGS84, Huso 19s.

Metodología

Estimación del equivalente en agua de los glaciares

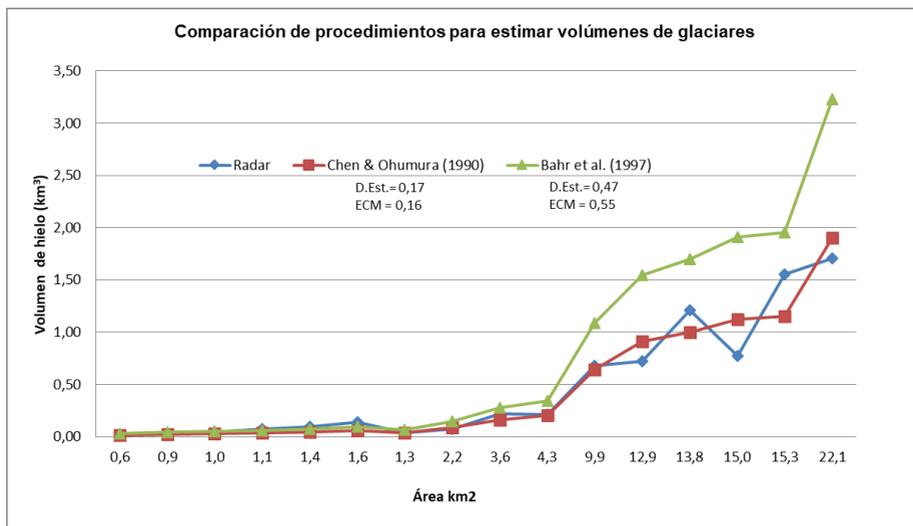
A pesar de que solo estudios específicos con métodos geofísicos son capaces de estimar adecuadamente el espesor, volumen y por consiguiente el equivalente en agua de un glaciar, existen otros métodos indirectos como el utilizado por Farinotti et al. (2019) y Farinotti et al. (2021), en base a modelos que utilizan los principios de la dinámica de flujo del hielo para invertir el espesor del mismo respecto de las características de la superficie. No obstante lo anterior, los esfuerzos de Farinotti et al. (2019) y Farinotti et al. (2021) son ejercicios globales y locales respectivamente utilizando el inventario mundial de glaciares Randolph versión 6.0 (RGI, 2017). Pero aún existe un amplio margen de mejora, puesto que en comparaciones entre mediciones y modelaciones, todos los modelos muestran usualmente desviaciones locales de hasta el doble del espesor del hielo observado, por lo tanto esto debe considerarse sobre todo para topografías a escalas más peque-

ñas (Farinotti et al., 2019). Además los resultados muestran que la variabilidad entre modelos en el espesor local calculado es alta por lo que se necesita utilizar modelos combinados para disminuir la incertidumbre. Así, mientras que algunos modelos proporcionan resultados similares independientemente de la cantidad y distribución espacial de las observaciones del espesor del hielo disponibles para la calibración, otros modelos muestran variabilidades típicas en los resultados de diferentes experimentos del orden del 30% del espesor medio del hielo. Si bien las bajas variabilidades es una indicación de la solidez del modelo, en la mayoría de los casos, parecen reflejar una falta de flexibilidad en el procedimiento de calibración en casos individuales. De este modo, la aplicabilidad de los modelos individuales es muy variable, mientras que algunos modelos son fácilmente aplicables también a conjuntos más grandes de glaciares e incluso cuando los datos de entrada se limitan al mínimo, otros modelos requieren estrictamente información adicional, como las velocidades distribuidas del flujo de hielo en la superficie del glaciar (Farinotti et al., 2021).

En base a lo anteriormente expuesto, y por no ser esta una investigación específica sobre espesor de hielo, para la estimación del volumen y equivalente en agua en estado sólido contenida en los glaciares, se optó por la utilización de una fórmula de relación área-volumen, para ello, primeramente se comparó 16 mediciones de radar realizadas por la DGA el año 2012 en glaciares de la zona central de Chile con dimensiones entre 0,6 y 22 km², dimensiones similares a los tamaños de glaciares de las cuencas Olivares-Colorado (0,003 – 24 km²) con las fórmulas de Chen y Ohmura (1990) y Bahr et al., (1997), obteniendo resultados más similares a las observaciones con radar aplicando la fórmula de Chen y Ohmura (1990), con una desviación estándar de 0,17 y un error medio cuadrático de 0,16. Además el 99,5% de los glaciares de las cuencas Olivares-Colorado se encuentran en el rango de hasta los 10 km² de área, agrupando el 88,8% del total de área de hielo en ambas cuencas y para este rango la desviación estándar baja a 0,029 y el error cuadrático medio a 0,039. Por lo que solo el 0,5% de los glaciares (2 glaciares) tendrían diferencias superiores a los valores antes mencionados. No obstante, a modo de observación, se visualiza que a mayor área glaciar los errores son mayores (Figura N°4).

Figura N°4.

Comparación de procedimientos para estimar volúmenes de glaciares.



Fuente: Elaboración propia.

En consecuencia, se ocupó la fórmula de Chen y Ohmura (1990), la cual basa la estimación del espesor con una relación asociada a la superficie del glaciar. Este método es una relación estadística validada originalmente en la observación de 67 glaciares de los Alpes, medidos con técnicas de radar de penetración o sondeos sísmicos. Para ello se estima una densidad promedio del glaciar de $0,85 \text{ g/cm}^3$, lo que es un promedio adecuado para glaciares de montaña, de valle y glaciaretos (Huss, 2013), considerando la zona de acumulación (donde hay una capa de nieve y neviza sobre hielo) y la zona de ablación (donde hay solamente hielo en la temporada de verano). Para los glaciares de montaña, de valle y glaciaretos de las cuencas Olivares-Colorado, se considera que están constituidos enteramente por hielo, sin contenido de detritos, vale decir el volumen equivalente de hielo es un 100% de su volumen. De esta manera, la secuencia de cálculos se puede expresar de la siguiente forma:

$$\begin{aligned} \text{Espesor medio (m)} &= 28,5 * (\text{Superficie en km}^2)^{0,357} \\ \text{Volumen (km}^3\text{)} &= \text{Espesor medio (km)} * \text{Superficie (km}^2\text{)} \\ \text{Equivalente en agua (km}^3\text{)} &= \text{Volumen (km}^3\text{)} * 0,85 \end{aligned}$$

Donde:

- 28,5 = constante.
- 0,357 = exponente constante.
- 0,85 = densidad del hielo (g/cm^3) para glaciares de valle, montaña y glaciaretos.

Por su parte, para calcular el contenido de hielo y equivalente en agua de los glaciares rocosos, según Schaffer et al. (2019), en los andes semiáridos solo se dispone de aproximaciones del volumen de hielo de glaciares rocosos, calculados a partir de la extensión superficial, lo que representa estimaciones aproximadas debido a la escasez de estudios, especialmente sobre el espesor de los glaciares y el porcentaje de contenido de hielo. Así, aunque el conocimiento sobre la dinámica de los glaciares rocosos aumenta constantemente, la integración en estudios hidrológicos a gran escala sigue siendo un desafío (Wagner et al., 2020). Un glaciar rocoso se caracteriza por una estructura interna estratificada con una capa base no congelada responsable del almacenamiento de agua subterránea y del escurrimiento retardado (Wagner et al., 2021). A su vez, el núcleo interno de un glaciar rocoso está compuesto por una mezcla de hielo y roca con un espesor típico de 10 a 25 m, pero la estructura de la matriz puede ser muy heterogénea dentro de un mismo glaciar, y a pesar de que muchos glaciares rocosos tienen una apariencia externa similar, la composición interna puede variar significativamente (Cicoira et al., 2021; Arenson et al., 2002). A este respecto, Cicoira et al. (2021), propone estimar el espesor de glaciares rocosos con un modelo que relaciona velocidades de deslizamiento y ángulos de pendiente, obtenidos a través de teledetección o de mediciones in situ. Pero, si bien la mayoría de los glaciares rocosos presentan un espesor de su parte móvil entre 10 m y 30 m, sólo unos pocos han sido estudiados con tanto detalle que la incertidumbre sea confiable, por lo tanto, se sugiere complementar con métodos geofísicos, como la tomografía de resistividad eléctrica, estudios sísmicos y radares de penetración terrestre, en combinación con un conocimiento avanzado de los materiales y los procesos para validar el enfoque (Cicoira et al., 2021; Haeberli et al., 2024). Por último, Cicoira et al. (2021) indica que observaciones de pozos en glaciares rocosos arrojan contenidos de hielo por sobre el 50%.

En consecuencia, dada la incertidumbre de aplicación de métodos generales para calcular el equivalente en agua de glaciares rocosos, ya sean activos o inactivos, y tomando como referencia el contenido de hielo sobre el 50% que plantea Cicoira et al. (2021), además de la indicación de la utilización de métodos de monitoreo in situ, se consideró que el equivalente en hielo corresponde al 78% del volumen total de cada glaciar rocoso. Este valor proviene del análisis de decenas de sondajes realizados hasta el subsuelo de los glaciares del alto valle del río Blanco, cuenca de río Aconcagua, en el marco del Estudio de Impacto Ambiental del proyecto Andina 244 (2013). Considerando la cercanía de estos glaciares a la cuenca de los ríos Olivares y Colorado, se asume el mismo valor del 78% para el contenido de hielo de los glaciares rocosos. Para estos glaciares rocosos se considera una densidad del hielo de 0,917 g/cm³ según lo indican Cuffey y Paterson (2010), puesto que no existe nieve ni neviza, salvo durante una temporada restringida principalmente al invierno y principios de la primavera. De este modo el cálculo para los glaciares rocosos queda de la siguiente manera:

$$\begin{aligned} \text{Espesor medio del glaciar (m)} &= 28,5 * (\text{Superficie en km}^2)^{0,357} \\ \text{Volumen (km}^3) &= (\text{Espesor medio (km)} * \text{Superficie (km}^2)) * 0,78 \\ \text{Equivalente en agua (km}^3) &= \text{Volumen (km}^3) * 0,917 \end{aligned}$$

Donde:

- 28,5 = constante.
- 0,357 = exponente constante.
- 0,78 = volumen de hielo estimado para glaciares rocosos en las cuencas de estudio.
- 0,917 = densidad del hielo (g/cm³) para glaciares rocosos.

Estimación del servicio ecosistémico de almacenamiento de agua

Para la valoración del servicio ecosistémico de agua almacenada en los glaciares se utilizó la metodología utilizada por Vergara et al. (2007) y Segovia (2014), en donde se asume que el rol de acumulación y retención de agua de los glaciares, es asimilable a las inversiones en infraestructura hídrica (embalses), obras, que entre otras cosas, sirven para enfrentar los períodos secos. De esta manera, conceptualmente, el valor económico de la retención de agua por los glaciares se puede estimar a través de los costos no incurridos (o costos evitados) en la construcción de embalses que cumplirían el mismo rol. Este es un método indirecto de mercado denominado "Método de Costo Evitado", y sirve para valorar bienes ambientales no mercadeables pero que pueden estar relacionados indirectamente con bienes que sí tienen o se puede obtener su precio de mercado (Cristeche y Penna, 2008).

De este modo, se utilizó el valor referencial del m³ de agua embalsado, expresado en pesos chilenos (CLP) de \$ 1.050 de Segovia (2014), el cual se obtuvo del documento "Chile 2020" del Ministerio de Obras Públicas de Chile (2010), en donde aparecen los proyectos de infraestructura hídrica realizados y proyectados para Chile entre los años 1990 y el 2020. Por último, los valores de inversión obtenidos se actualizaron al 2022 con la variación del IPC desde diciembre de 2013 a diciembre de 2022, la cual corresponde al 50,9%, quedando entonces en un valor de CLP\$1.584 (USD 1,8) por cada m³ embalsado. De esta manera la fórmula de cálculo es la siguiente:

$$VSE_{aa} = P_e \times EQ_{ag}$$

Donde:

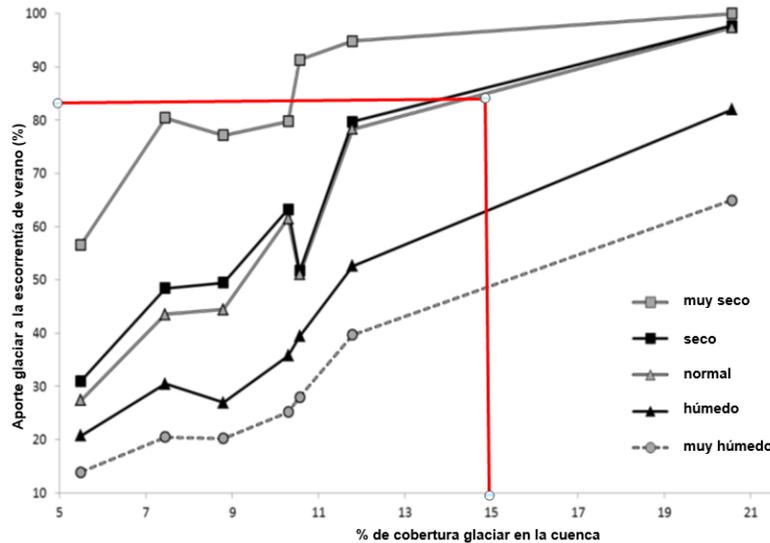
- VSE_{aa} = Valor servicio ecosistémico de almacenaje de agua
- P_e = Precio del m^3 embalsado
- EQ_{ag} = Equivalente en agua almacenada en los glaciares (m^3)

Estimación del aporte al caudal de los glaciares al caudal de la cuenca

Para estimar el aporte al caudal de los glaciares en cada cuenca, primeramente, se obtuvo la estadística fluviométrica y los promedios mensuales de 30 años (1991-2021) de caudales en las estaciones operadas por la DGA ubicadas en los exutorios de cada una de las cuencas en análisis. Para este caso las estaciones fueron "Río Olivares antes junta Río Colorado" para la cuenca del Río Olivares y "Río Colorado antes junta Río Olivares" para la cuenca del Río Colorado. Luego se utilizó el estudio de Castillo (2015), en donde se hace una relación entre el porcentaje de glaciación de la cuenca en estudio y el aporte a la escorrentía que los glaciares deberían entregar en distintos tipos de años desde muy húmedo a muy seco. A modo de establecer un número conservador, se consideró para este análisis un año normal, y como ambas cuencas en análisis poseen aproximadamente un 15% de glaciación, entonces se utilizó un valor de 83% de aporte hídrico de los glaciares para los meses de verano, vale decir entre diciembre y marzo.

A modo de comparación, en la estación "Río Maipo en El Manzano", que coincide con la junta del Río Colorado, unos 30 km aguas debajo de la estación "Río Olivares antes junta Río Colorado", donde el porcentaje de glaciación es del 7,5%, el estudio de Casassa et al., (2015) indica un aporte glaciar de 62% durante los meses de verano, valor similar al 67% estimado por Peña y Nazarala (1987), ambos estudios referidos a un año muy seco (95% de excedencia). Durante el verano, para un año normal, el estudio más reciente de Ayala et al. (2020) estima una contribución glaciar del 59% en la estación "Río Maipo en El Manzano" para el periodo 1955-2016. Expresado como promedio anual, también para un año normal, Ayala et al. (2020) estiman una contribución glaciar del 17% en la estación "Río Maipo en El Manzano" para el periodo 1955-2016, que es mayor al valor de contribución glaciar medio anual de 7% estimado por Casassa et al. (2015) para el periodo 1950-2001. Estos tres estudios que simulan la escorrentía de origen glaciar del río Maipo en El Manzano (Peña y Nazarala, 1987; Casassa et al., 2015; Ayala et al., 2020) confirman la relevancia y el orden de magnitud del aporte glaciar al Río Maipo. Como es de esperar, el aporte hídrico glaciar es mayor mientras más cerca se encuentre la estación de monitoreo fluviométrico al glaciar (Casassa et al., 2015). Por lo cual se estima que el valor de 83% de Castillo (2015) utilizado en este estudio es razonable, considerando que la estación Olivares antes junta Río Colorado se ubica 30 km aguas arriba de la estación Río Maipo en El Manzano. La figura 5 explica el aporte de la escorrentía de los glaciares de una cuenca según el porcentaje de glaciación y el tipo de año desde muy húmedo hasta muy seco, siendo por consiguiente mayores los aportes en los años muy secos (Figura N°5).

Figura N°5.
Contribución del hielo glaciar a la escorrentía total de verano para tipos de años según porcentaje de glaciación.



Fuente: Modificado de Castillo (2015).

Estimación del servicio ecosistémico de aporte al caudal de los glaciares a la cuenca

Para estimar el valor del servicio ecosistémico de aporte hídrico se utilizó el método denominado "Valor directo en base a precios de mercado". En este caso, se busca el valor del agua que aportan los glaciares, puesto que se espera que en una economía con un mecanismo de precios no distorsionados se puede suponer que los precios de mercado reflejan la disposición a pagar por los bienes y servicios. Por tanto, dichos precios deberían representar una medida fiel del valor de uso directo de los recursos que se explotan (Barbier et al., 1997).

En base a la utilización del método antes descrito, se tomó el valor del estudio de CNR-AyCDL (2013), el cual establece el precio comercial de los derechos de aprovechamiento de agua (DAA) consuntivos y no consuntivos. Este estudio establece para el año 2013 un precio de 2,72 UF/l/s para el DAA no consuntivo y de 549,6 UF/l/s para el DAA consuntivo para la Región Metropolitana. En base a lo anterior, el Código de Aguas chileno (2022), define el DAA consuntivo como "aquel que faculta a su titular para consumir totalmente las aguas en cualquier actividad", asimismo, define el DAA no consuntivo como "aquel que permiten emplear el agua sin consumirla y obliga a restituirla". Esta extracción o restitución de las aguas se realiza siempre en forma que no perjudique los derechos de terceros constituidos sobre las mismas aguas, en cuanto a su cantidad, calidad, substancia, oportunidad de uso y demás particularidades. La definición enunciada anteriormente, deja de manifiesto que los DAA consuntivos y no consuntivos son bienes distintos por lo que constituyen mercados distintos (CNR-AyCDL, 2013). Por ende, en una valoración económica del servicio ecosistémico del flujo hídrico continuo aportado por los glaciares, se debe considerar primeramente el mercado de DAA no consuntivos, y luego realizar un segundo conteo con los

valores de los mercados de DAA consuntivos (Segovia, 2014). Por lo tanto, la fórmula de cálculo es la siguiente:

$$\text{VSEFHC} = (\text{PDAANC} + \text{PDAAC}) \times \text{QMAAG}$$

Donde:

- VSEFHC = Valor servicio ecosistémico de flujo hídrico continuo
- PDAANC = Precio DAA no consuntivo
- PDAAC = Precio DAA consuntivo
- QMAAG = Caudal medio anual de aporte glaciar (l/s)

Especificaciones de los cálculos

El precio de la Unidad de Fomento (UF) y del dólar americano (USD) se estableció en pesos chilenos (CLP o \$) según el valor del día 30 de diciembre de 2022. Para este caso la UF es igual a \$ 35.099, y el dólar es igual a \$ 859,5.

Para realizar los cálculos, se utilizó una tasa de descuento de 6%, puesto que aquel guarismo es el utilizado como “tasa social de descuento” por la Subsecretaría de Evaluación Social en su documento de “Precios Sociales 2021” (SES, 2021). Para los estudios de valoración con técnicas de economía ambiental se suele utilizar la tasa de descuento social del territorio en donde se realiza el estudio en cuestión. No obstante lo anterior, entre los economistas ambientales no hay consenso sobre el número que debe utilizarse de tasa de descuento, puesto que al tratarse de recursos naturales y en el caso de los glaciares, presumiblemente no renovable, entonces se plantea que no se debiese utilizar tasa de descuento, o inclusive que sería más pertinente utilizar la tasa de interés, dado que se supone que el recurso ambiental valorado será más escaso en el futuro y por ende aumentará su valor. No obstante, para realizar un análisis conservador y ajustado a los parámetros más usuales, se decidió utilizar la tasa de descuento del 6% antes descrita. Para calcular los valores presentes netos (VPN), se estimó una proyección a un horizonte de 50 años, puesto que para recursos naturales que tienen amplia variabilidad estacional, incluso se podría utilizar una proyección al infinito como la utilizada por Segovia (2014), ya que para ambas proyecciones, infinito y 50 años o más el resultado varía muy poco. No obstante lo anterior, se prefirió proyectar a 50 años puesto que este corresponde a un tiempo de vida útil comúnmente empleado en el proceso de diseño de obras de este tipo y considerando que la evaluación del beneficio social de los embalses se realiza a 30 años según metodologías del Ministerio de Desarrollo Social (2013), metodología en la que se indica que la vida útil es mayor a dicho periodo, resultando entonces los 50 años un periodo de tiempo adecuado, acotado y fácil de visualizar a escala humana.

Como ambos valores de servicios ecosistémicos calculados en primera instancia, almacenaje de agua y aporte al caudal de las cuencas, corresponden a valores totales de stock de los servicios, vale decir, corresponden al VPN, entonces se procedió a anualizar los valores, a modo de obtener el flujo anual de cada servicio ecosistémico, y luego se re proyectó a 50 años, según se muestra en las siguientes fórmulas. Por último, todos los valores finales son expresados en USD para simplificar la lectura y hacer que los resultados del estudio sean atemporales.

- Beneficio económico anual

$$F = VP * r$$

Donde:

F = Valor inicial del flujo de dicho servicio (beneficio económico anual)

VP = Valor presente de los flujos, corresponde al valor de stock del servicio

r = Tasa de descuento constante de todo el período (6%)

- Valor presente neto (VPN), representa el valor total de stock

$$VPN = \sum_{t=0}^n \frac{Ft}{(1+i)^t}$$

Donde:

VPN: valor presente neto. Denota el valor de stock del servicio.

Ft: valor del flujo del servicio en cada momento del tiempo t.

n: Horizonte de provisión del servicio.

i: tasa de descuento constante (6%).

Resultados

Cuenca del Río Olivares

Esta cuenca en su conjunto posee 119 glaciares y una superficie glaciada de 86 km², en donde los glaciares rocosos concentran un 46,2% del total en número de glaciares, y 10% en superficie, pero la mayor superficie de hielo es aportada por los glaciares de valle con un 53,4% (Cuadro N°1).

Cuadro N°1.

Número y superficie de glaciares presentes en la cuenca del Río Olivares por tipo de clasificación morfológica (IPG2022_v2).

Tipo de Glaciar Cuenca del Río Olivares	N° de glaciares	Superficie (km ²)	Eq. agua (km ³)	% N° de glaciares	% Superficie de glaciares	% Eq. agua (km ³)
Glaciar de montaña	22	29,0	1,05	18,5	33,8	25,7
Glaciar de valle	5	45,8	2,91	4,2	53,4	71,0
Glaciar rocoso	55	8,5	0,11	46,2	10,0	2,6
Glaciarete	37	2,4	0,03	31,1	2,8	0,7
Total	119	85,7	4,1	100	100	100

Fuente: Elaboración propia.

En cuanto al equivalente en agua y valoración del servicio ecosistémico de almacenamiento de agua de los glaciares de la cuenca del Río Olivares, se obtuvo que el hielo equivalente en agua de todos los glaciares corresponde a 4,1 km³, lo que equivale aproximadamente a 16 embalses de la misma capacidad del embalse El Yeso a su máxima capacidad de 0,25 km³ (DGA, 2004). Por lo tanto, el valor del costo evitado anual en construcción de embalses, puesto que los glaciares cumplen el rol de acumulación de agua y regulación del flujo hídrico, es de USD 452.143.151, lo cual proyectado a 50 años equivale a un valor presente de USD 7.126.617.334.

Por su parte, en cuanto al aporte de agua a la escorrentía y valoración del servicio ecosistémico del aporte hídrico de los glaciares de la cuenca del Río Olivares, se determinó que el río Olivares tiene un caudal medio anual de 3,1 m³/s, según la estadística de los últimos 30 años (1991-2021), medido en la estación fluviométrica operada por la DGA "Río Olivares antes junta Río Colorado", la cual está ubicada en el exutorio de la cuenca del Río Olivares (Cuadro N°2).

Para el caso de la cuenca del Río Olivares (543,1 km²), considerando el punto de salida correspondiente a la estación "Río Olivares antes junta Río Colorado", el porcentaje de glaciación alcanza el 15,8%. A modo de establecer un número conservador, se consideró para este análisis un año normal, por lo tanto la contribución hídrica de los glaciares a la escorrentía de la cuenca llegaría a un 83% en los meses de verano (diciembre a marzo), basado en el estudio de Castillo (2015), aunque cabe consignar que, según el mismo autor, el aporte hídrico de los glaciares puede ser cercano a 95% para un año muy seco.

Cuadro N°2.

Aporte de glaciares en verano para un año normal en la cuenca del Río Olivares.

	Dic	Ene	Feb	Mar
Caudal medio mensual (1991-2021) (m³/s)	6,10	11,84	6,54	2,52
83% del caudal (m³/s)	5,06	9,83	5,43	2,09

Fuente: Elaboración propia.

En este sentido, y calculando el caudal de aporte glaciar de 83% por cada mes de verano para un año normal, se tiene entonces un aporte estival total de 58.733.203 m³, lo que anualizado en términos de litros/s continuos al año, se estima que los glaciares de la cuenca del Río Olivares aportan 1.861 l/s (cuadro N°3).

Cuadro N°3. Aporte hídrico de los glaciares a la cuenca del Río Olivares.

	Dic	Ene	Feb	Mar
m³/mes	13.560.739	26.321.172	13.249.151	5.602.141
Total m³ verano	58.733.203			
m³/s de aporte continuo en un año	1,86			
litros/s de aporte continuo en un año	1.861			

Fuente: Elaboración propia.

En base a lo anterior, con un valor de USD 111 para 1 litro/s para el DAA no consuntivo y USD 22.444 para el DAA consuntivo, se tiene que el valor del servicio ecosistémico del aporte hídrico de los glaciares de la cuenca del Río Olivares es de USD 2.518.666 anuales, y un valor presente proyectado a 50 años de USD 39.698.862.

Cuenca del Río Colorado

La cuenca del Río Colorado en su conjunto posee 251 glaciares y una superficie glaciada de 122,3 km², en donde predominan los glaciares rocosos con un 54,6% del total en número de glaciares, y 29,8% en superficie, pero la mayor superficie de hielo es aportada por los glaciares de valle con un 38,8% (Cuadro N°4).

Cuadro N°4.

Número, superficie y equivalente en agua de glaciares presentes en la cuenca del Río Colorado por tipo de clasificación morfológica (IPG2022_v2).

Tipo de Glaciar	N° de Glaciares	Superficie (km ²)	Eq. agua (km ³)	% N° de glaciares	% Superficie (km ²)	% Eq. agua (km ³)
Glaciar de montaña	23	33,3	1,1	9,1	27,2	27,3
Glaciar de valle	11	47,5	2,2	4,4	38,8	54,2
Glaciar rocoso	137	36,4	0,7	54,6	29,8	17,2
Glaciarete	80	5,1	0,1	31,9	4,2	1,3
Total	251	122,3	4,1	100	100	100

Fuente: Elaboración propia.

En cuanto al equivalente en agua y valoración del servicio ecosistémico de almacenamiento de agua de los glaciares de la cuenca del Río Colorado, el equivalente en agua corresponde a 4 km³, lo que equivale a 16 embalses El Yeso a su máxima capacidad de 0,25 km³. Por lo tanto, el valor del costo evitado anual en construcción de embalses es de USD 443.468.083, lo cual proyectado a 50 años equivale a un valor presente de USD 6.989.882.121.

Por su parte, en cuanto al aporte de agua a la escorrentía y valoración del servicio ecosistémico del aporte hídrico de los glaciares de la cuenca del Río Colorado, se tiene un

caudal medio anual de 7,03 m³/s, según la estadística de los últimos 30 años (1991-2021) medido en la estación fluviométrica operada por la DGA "Río Colorado antes junta Río Olivares", la cual está ubicada en el exutorio de la cuenca del Río Colorado (Cuadro N°5). Para el caso de la cuenca del Río Colorado, el porcentaje de glaciación alcanza el 15,5%, y a modo de establecer un número conservador, se consideró para este análisis un año normal. Por lo tanto, la contribución hídrica de los glaciares de la cuenca del Río Colorado a la escorrentía de la cuenca llegaría a un 83% en los meses de verano según Castillo (2015).

Cuadro N°5.

Aporte de glaciares en verano para un año normal en la cuenca del Río Colorado.

	Dic	Ene	Feb	Mar
Caudal medio mensual (1991-2021) (m³/s)	15,08	16,82	9,71	4,97
83% del caudal (m³/s)	12,52	13,96	8,06	4,13

Fuente: Elaboración propia.

En este sentido, calculando el caudal de aporte glaciar del 83% por cada mes para un año normal, se tiene entonces un aporte estival total de 101.633.749 m³, entregando por ende 3,2 m³/s continuos a la cuenca, lo que corresponde a 3.221 litros/s de flujo continuo en un año (Cuadro N°6).

Cuadro N°6.

Aporte hídrico de los glaciares a la cuenca del Río Colorado.

	Dic	Ene	Feb	Mar
m³/mes	33.518.961	37.397.028	19.675.450	11.042.310
Total m³ verano	101.633.749			
m³/s de aporte continuo en un año	3,22			
litros/s de aporte continuo en un año	3.221			

Fuente: Elaboración propia.

En base a lo anterior, con un valor de USD 111 para 1 litro/s para el DAA no consuntivo y USD 22.444 para el DAA consuntivo, se tiene que el valor del servicio ecosistémico del aporte hídrico de los glaciares de la cuenca del Río Colorado es de USD 4.358.378 anuales y un valor presente proyectado a 50 años de USD 68.696.147.

Cuenca Río Olivares más cuenca Río Colorado

La cuenca del Río Olivares, en conjunto con la cuenca del Río Colorado, incluye 370 glaciares con 208 km² de superficie de hielo. El agua almacenada es de 8,1 km³, lo que en términos comparativos equivale a 32,4 embalses El Yeso a su máxima capacidad de 0,25 km³ (Cuadro N°7).

Cuadro N°7.

Numero de glaciares, superficie y equivalente agua de la suma de las cuencas Olivares y Colorado.

	Cuenca Río Maipo	Cuenca Olivares- Colorado	% Cuenca Olivares- Colorado sobre Cuenca Río Maipo
N° glaciares	1.272	370	29,1
Área de glaciares (km²)	451,0	208,1	46,1
Eq. agua (km³)	14,0	8,1	57,7

Fuente: Elaboración propia.

En cuanto al equivalente en agua almacenada y aporte a la escorrentía de los glaciares de las cuencas Olivares-Colorado y valoración de servicios ecosistémicos, se tiene que la suma del agua almacenada de ambas cuencas es de 8,1 km³, por lo que el valor del servicio ecosistémico de al-

macenaje de agua total anual es de USD 895.611.234 (USD 896 M), y proyectado a 50 años es de USD 14.116.499.455 (USD 14.116 M).

En conjunto las cuencas Olivares-Colorado poseen un 15,6% de glaciación, por lo que su aporte hídrico equivale, según lo estimado en este estudio, a un 83% en los meses de verano (diciembre-marzo). En este sentido, se tiene que los glaciares de las cuencas Olivares-Colorado aportarían 5 m³/s continuos a la cuenca, con un aporte estival total de 160.366.952 m³, lo que corresponde a 5.082 litros/s de flujo continuo en un año (Cuadros N°8 y N°9 y Figura N°6).

Cuadro N°8.

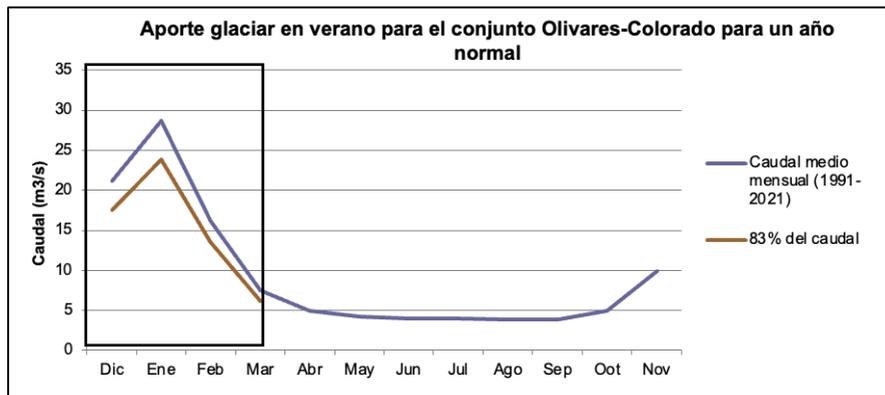
Aporte de los glaciares de las cuencas Olivares más Colorado al conjunto de las cuencas.

	Dic	Ene	Feb	Mar
Caudal medio mensual Olivares+Colorado (1991-2021) (m³/s)	21,18	28,66	16,25	7,49
83% del caudal (m³/s)	17,58	23,79	13,49	6,22

Fuente: Elaboración propia.

Figura N°6.

Aporte al caudal de glaciares en verano para un año normal de las cuencas Olivares-Colorado.



Fuente: Elaboración propia.

Cuadro N°9.

Aporte hídrico de los glaciares de las cuencas Olivares-Colorado a la cuenca del Maipo.

	Dic	Ene	Feb	Mar
m³/mes	47.079.700	63.718.200	32.924.601	16.644.451
Total m³ verano	160.366.952			
m³/s de aporte continuo en un año	5,08			
litros/s de aporte continuo en un año	5.082			

Fuente: Elaboración propia.

En base a lo anterior, se tiene que el valor del servicio ecosistémico del aporte hídrico de los glaciares de las cuencas Olivares-Colorado es de USD 6.877.044 anuales (USD 6,8 M) y un valor presente proyectado a 50 años de USD 108.395.009 (USD 108,3 M).

En consecuencia, el valor anual de la suma de ambas cuencas para ambos servicios ecosistémicos valorados en este estudio asciende a USD 902.488.278 (USD 902,4 M) y proyectado a 50 años a USD 14.224.894.464 (USD 14.224 M) (Cuadro N°10). Para poner estos valores en contexto, tenemos que el año 2022 el presupuesto para todo el SNASPE⁶ fue de CLP 24.096.878 MM (miles de millones, DIPRES, 2021), equivalente a USD 28.035.326 (USD 28 M), por lo que el valor anual de la suma de los dos servicios ecosistémicos estimados en este estudio para las cuencas Olivares-Colorado supera aproximadamente 32 veces el presupuesto anual asignado para todo el Sistema Nacional de Áreas Silvestres protegidas del Estado. Haciendo otras comparaciones, supera en más 7 veces el presupuesto total de CONAF, más de 12 veces al presupuesto del Ministerio de Medio Ambiente y más de 24 veces el de la DGA, siendo solo casi equivalente al presupuesto total del Ministerio de Agricultura para el año 2022 (Cuadro N°11).

Cuadro N°10.

Resumen valores anuales y valores presentes.

		Olivares (USD)	Colorado (USD)	Total (USD)
Valor agua almacenada (USD)	Anual	452.143.151	443.468.083	895.611.234
	VPN	7.126.617.334	6.989.882.121	14.116.499.455
Valor aporte hídrico (USD)	Anual	2.518.666	4.358.378	6.877.044
	VPN	39.698.862	68.696.147	108.395.009

		Olivares-Colorado (USD)
Valor agua almacenada más aporte hídrico (USD)	Anual	902.488.278
	VPN	14.224.894.464

Fuente: Elaboración propia.

⁶ Para hacer más conservadora la comparación se utilizó el presupuesto del año 2022, puesto que para el año 2023 el presupuesto para el SNASPE se redujo en 26,3%.

Cuadro N°11.

Comparación del valor anual de los servicios ecosistémicos (SSEE) valorados con los presupuestos anuales para distintas instituciones públicas.

Institución	Presupuesto asignado año 2022 (Miles de CLP)	Presupuesto asignado año 2022 (USD)	Valor anual de la suma de los servicios ecosistémicos valorados (USD)	Cantidad de veces superior de los SSEE al presupuesto por institución
SNASPE	24.096.878	28.035.926	902.488.278	32,2
CONAF	105.848.012	123.150.683		7,3
Ministerio de Agricultura	793.556.359	923.276.741		0,98
Ministerio de Medio Ambiente	63.066.888	73.376.251		12,3
Dirección General de Aguas	31.738.189	36.326.340		24,8

Fuente: Elaboración propia.

Discusión

En base a los resultados obtenidos, se debe plantear que la valoración económica de servicios ecosistémicos aquí realizada, en base a valores obtenidos desde los mercados, es siempre un primer paso para luego seguir indagando en valores mas intangibles que resultan ya sea del valor de opción, de legado e inclusive de existencia de los atributos naturales, y para lo cual se deben utilizar otras técnicas, las cuales usualmente necesitan conocer la percepción de las personas en base a encuestas y entrevistas.

Por ser esta una investigación que relaciona el valor del capital natural, en este caso los glaciares, con sus características de volumen de hielo y entrega de agua a las cuencas. Para la estimación del volumen y equivalente en agua del hielo glaciar, se optó por la utilización de la fórmula de relación área-volumen que mejor se ajustaba con mediciones de radar realizadas por la DGA en glaciares de la zona central de Chile con dimensiones similares a los tamaños de glaciares de las cuencas Olivares-Colorado, obteniendo una desviación estándar para el 99,5% de los glaciares de las cuencas Olivares-Colorado de 0,029 y el error cuadrático medio a 0,039. No obstante, para estudios específicos de estimación de volumen de hielo glaciar, las técnicas geofísicas de mediciones puntuales son las que entregan los resultados más precisos.

Para la estimación de los aportes a la escorrentía de los glaciares a las cuencas, se estimó en base a la relación entre tipo de año (desde muy seco a muy húmedo), con el porcentaje de glaciación de la cuenca. En este caso se utilizó como referencia un año normal, lo que para el análisis y los resultados resulta conservador, puesto que la zona central de Chile ha permanecido hace más de una década en un estado de sequía. De todas formas las estimaciones acerca del aporte hídrico se pueden mejorar con estudios de balances de masa específicos de glaciares de las cuencas en estudio.

Para proyectar los cálculos de valores económicos, se utilizó, a modo conservador, una tasa de descuento de 6%, basada en la “tasa social de descuento” de la Subsecretaría de Evaluación Social. Aunque economistas ambientales difieren sobre el número de descuento que debe utilizarse, puesto que en el caso de los glaciares, podría no utilizarse tasa de descuento, o inclusive utilizar una tasa de interés, dado que se supone que el recurso ambiental valorado será más escaso en el futuro y por ende aumentaría su valor. No obstante, para realizar un análisis conservador y ajustado a los parámetros más usuales, se decidió utilizar la tasa de descuento del 6% antes descrita. Todos los valores finales fueron expresados en USD para simplificar la lectura y hacer que los resultados del estudio sean atemporales.

Hasta ahora, la valoración económica de servicios ecosistémicos ha soslayado el estudio de los glaciares, centrándose usualmente en áreas boscosas, humedales y áreas protegidas, entre otras. Este es un estudio que busca poner en relevancia la importancia del funcionamiento de la dinámica de los glaciares, para que se pueda comprender en términos económicos por la ciudadanía y tomadores de decisiones. Sin duda que se pueden afinar las estimaciones tanto del punto de vista glaciológico como ahondar en más metodologías de valoración, así como abordar más servicios ecosistémicos de glaciares. Lo relevante aquí es saber que estas técnicas y metodologías planteadas pueden ser replicados a otras áreas glaciarias o adaptarlas para ser aplicadas a otros atributos naturales.

Conclusión

Los glaciares de Chile central tienen una función estratégica en la mantención del ciclo hidrológico, especialmente en el almacenamiento, la generación y preservación del escurrimiento en los cursos de agua. La cuenca del Río Maipo, concentra el 40,5% de la población total de Chile, y las actividades que aquí se desarrollan requieren una reserva y flujo continuo de agua.

En términos de protección específica de ecosistemas de ambientes glaciares, la cuenca del Río Maipo hasta antes del primer semestre de 2023 no poseía ningún Parque Nacional, por lo tanto, tampoco había glaciares dentro de esta categoría de protección que cumplieran con la representación ambiental de estos ecosistemas. Asimismo, a nivel nacional existía en el norte-centro del país una faja que comprendía 6 regiones, desde la Región de Atacama hasta la Región del Maule inclusive, con ausencia de glaciares dentro de la categoría de Parque Nacional.

Posibles datos para justificar la creación del parque nacional “Glaciares de Santiago” se pueden mencionar en la relevancia glaciológica de ambas cuencas en conjunto, como también en la estimación del valor económico de algunos de los servicios ecosistémicos que proveen los glaciares a modo de establecer un lenguaje común acerca de los beneficios para la sociedad que entregan ambas cuencas. En este sentido, se puede mencionar que ambas cuencas (Olivares y Colorado), poseen los glaciares más grandes de la cuenca del Río Maipo, y en conjunto concentran el 29,1% de los glaciares, el 46,1% del área glaciaria y el 57,7% del agua almacenada. Es así como se estableció que las cuencas Olivares-Colorado almacenan un 8,1 km³ de agua en estado sólido, equivalente a 32,4 embalses El Yeso a su máxima capacidad.

El valor anual del servicio ecosistémico de agua almacenada resultó en USD 895,6 millones y el valor presente proyectado a 50 años en USD 14,1 miles de millones. Por su parte, el valor anual del servicio ecosistémico de aporte hídrico continuo a las cuencas Olivares-Colorado fue de USD 6,8 millones (M), y el valor presente proyectado a 50 años en USD 108,3 millones. En consecuencia, ambos valores de servicios ecosistémicos sumados para ambas cuencas ascienden a un valor anual de 902,4 M, y a un valor presente proyectado a 50 años de USD 14,2 miles de millones. En este caso, comparando los resultados con el presupuesto para todo el SNASPE, se llegó a la conclusión que el valor anual de los dos servicios ecosistémicos que brindan los glaciares estimados en este estudio para las cuencas Olivares-Colorado supera en 32 veces el presupuesto anual asignado para todo el Sistema Nacional de Áreas Silvestres Protegidas del Estado para el año 2022, lo que claramente justifica en buena medida la conservación de este territorio, puesto que la valoración realizada corresponde solo a una estimación base obtenida con metodologías directas e indirectas en relación a mercados, por lo que se podría aún indagar mucho más profundo con metodologías que busquen estimar valores de regulación y culturales con otras técnicas derivadas de la economía ambiental. En suma, la relevancia, comprendida en términos económicos, de los glaciares, denota y es un llamado al cuidado de estos cuerpos de hielo en las evaluaciones ambientales y sus monitoreos, puesto que el desequilibrio ya causado por el cambio climático se puede agravar aun mas por acciones que pongan en riesgo la fuente de agua en época estival y periodos de sequía.

Referencias bibliográficas

- Arenson, L. U., Hoelzle, M., y Springman, S. M. (2002). Borehole deformation measurements and internal structure of some rock glaciers in Switzerland. *Permafrost and Periglacial Processes*, 13(2), 117–135. <https://doi.org/10.1002/ppp.414>
- Ayala, Á., Farías-Barahona, D., Huss, M., Pellicciotti, F., McPhee, J., y Farinotti, D. (2020). Glacier runoff variations since 1955 in the Maipo River basin, in the semiarid Andes of central Chile. *The Cryosphere*, 14, 2005–2020. <https://doi.org/10.5194/tc-14-2005-2020>
- Bahr, D., Meier, M., y Peckham, S. (1997). The physical basis of glacier volume-area scaling. *Journal of Geophysical Research*, 102(B9), 20,355–20,362. <https://doi.org/10.1029/97JB01696>
- Balvanera, P., y Cotler, H. (2007). Acercamiento al estudio de los servicios ecosistémicos. *Gaceta Ecológica*, Número Especial, 84–85, 8–15. <https://www.redalyc.org/pdf/539/53908502.pdf>
- Barbier, E., Acreman, M., y Knowler, D. (1997). *Valoración económica de los humedales: Guía para decisores y planificadores*. Oficina de la Convención de Ramsar. <https://portals.iucn.org/library/node/7342>
- Caro, A., Gimeno, F., Rabatel, A., Condoma, T., y Ruiz, J. (2020). Glacier clusters identification across Chilean Andes using topo-climatic variables. *Investigaciones Geográficas*, (60), 119–133. <https://doi.org/10.5354/0719-5370.2020.59009>

Caro, A., Condón, T., y Rabatel, A. (2021). Climatic and morphometric explanatory variables of glacier changes in the Andes (8–55°S): New insights from machine learning approaches. *Frontiers in Earth Science*, 9, Article 713011. <https://doi.org/10.3389/feart.2021.713011>

Casassa, G., Apey, A., Bustamante, M., Marangunic, C., Salazar, C., y Soza, D. (2015, octubre 4-8). Contribución hídrica de glaciares en el estero Yerba Loca y su extrapolación a la cuenca del río Maipo. *XIV Congreso Geológico Chileno: Área Temática 3 - Geología del Cuaternario y Cambio Climático*. La Serena, Chile. <https://repositorio.sernageomin.cl/items/4109c8ba-280a-46b4-9fa9-fe-d816b7ac55>

Casassa, G., Segovia, A., Buglio, F., González, D., y Huenante, J. (2019). Los glaciares en las áreas silvestres protegidas del Estado. En M. Turrel (Ed.), *Glaciares y cuencas andinas. Olivares-Maipo-Mapocho. Hielos en peligro* (pp. 30–35). Aguas Andinas. <https://bibliotecaacademica.minrel.gov.cl/cgi-bin/koha/opac-detail.pl?biblionumber=77353>

Castillo, Y. (2015). *Caracterización de la hidrología glaciar de la cuenca del río Maipo mediante la implementación de un modelo glacioclimatológico semi-distribuido físicamente basado* [Tesis de Magíster, Universidad de Chile]. <https://repositorio.uchile.cl/bitstream/handle/2250/132835/Caracterizacion-de-la-hidrologia-glaciar-de-la-cuenca-del-rio-maipo-mediante....pdf>

Cicoira, A., Marcer, M., Gärtner-Roer, I., Bodin, X., Arenson, L. U., y Vieli, A. (2021). A general theory of rock glacier creep based on in-situ and remote sensing observations. *Permafrost and Periglacial Processes*, 32(1), 139–153. <https://doi.org/10.1002/ppp.2090>

CNR-AyCDL. (2013). *Análisis estimación del precio privado de los derechos de aprovechamiento de aguas*. Comisión Nacional de Riego, Gobierno de Chile. https://www.researchgate.net/publication/320068177_Analisis_Estimacion_Del_Precio_Privado_De_Los_Derechos_De_Aprovechamiento_De_Aguas_de_Chile

Chen, J., y Ohmura, A. (1990). Estimation of Alpine glacier water resources and their change since the 1870s. En H. Lang y A. Musy (Eds.), *Hydrology in Mountainous Regions I – Hydrological Measurements; the Water Cycle* (pp. 127-135). IAHS Publication. <https://www.researchgate.net/publication/241663882>

Cristeche, E., y Penna, J. (2008). *Métodos de valoración de servicios ambientales*. Estudios Socioeconómicos de la sustentabilidad de los sistemas de producción y recursos naturales, (3), 1-58. https://gc.scalahed.com/recursos/files/r161r/w25399w/metodos_de_valoracion_economica.pdf

Cuffey, K., y Paterson, W. (2010). *The physics of glaciers* (4ª ed.). Elsevier. <https://shop.elsevier.com/books/the-physics-of-glaciers/cuffey/978-0-12-369461-4>

DGA. (2004). *Diagnóstico y clasificación de los cursos y cuerpos de agua según objetivos de calidad: Cuenca del río Maipo*. Dirección General de Aguas. <https://bibliotecadigital.ciren.cl/items/e025b9e8-3baf-4f2f-a0ae-02d05c50daa4>

DGA-CECs. (2012). *Estimación de volúmenes de hielo mediante radio eco sondaje en Chile central* (S.I.T. N°288). <https://bibliotecadigital.ciren.cl/items/4bc6d42c-2a96-4b2d-9d9f-bf869b892143>

Diario Oficial. (2023). Crea el “Parque Nacional Glaciares de Santiago”, en la comuna de San José de Maipo, provincia de Cordillera, Región Metropolitana. *Diario Oficial de Chile*, Num. 43.628, 16 de agosto de 2023. <https://www.diariooficial.interior.gob.cl/publicaciones/2023/08/16/43628/01/2358264.pdf>

DIPRES. (2021). *Ley de presupuestos para el sector público 2022* (Ley N.º 21.395). Diario Oficial, 15 de diciembre de 2021. <https://www.bcn.cl/leychile/navegar?idNorma=1169723&tipoVersion=0>

EIA Andina 244. (2013). *Estudio de impacto ambiental: Expansión Andina 244*. Corporación Nacional del Cobre. <https://infofirma.sea.gob.cl/DocumentosSEA/MostrarDocumento?docId=35/00/63beOdd739b2f94e69e6caaa9c3164412899>

Estado de Chile. (1981). *Decreto con Fuerza de Ley N° 1.122. Fija texto del Código de Aguas* (Actualización 2022). <https://www.bcn.cl/leychile/navegar?idNorma=5605>

Estado de Chile. (2022). *Ley N.º 19.300: Aprueba ley sobre bases generales del medio ambiente*. Biblioteca del Congreso Nacional de Chile. <https://www.bcn.cl/leychile/navegar?idNorma=30667>

Farías-Barahona, D., Ayala, A., Bravo, C., Vivero, S., Seehaus, T., Vijay, S., Schafer, M., Buglio, F., Casassa, G., y Braun, M. (2020). 60 years of glacier elevation and mass changes in the Maipo River Basin, central Andes of Chile. *Remote Sensing*, 12(10), Article 1658. <https://doi.org/10.3390/rs12101658>

Farinotti, D., Huss, M., Fürst, J., Landmann, J., Machguth, H., Maussion, F., y Pandit, A. (2019). A consensus estimate for the ice thickness distribution of all glaciers on Earth. *Nature Geoscience*, 12(3), 168–173. <https://doi.org/10.1038/s41561-019-0300-3>

Farinotti, D., Brinkerhoff, D., Fürst, J., Gantayat, P., Gillet-Chaulet, F., Huss, M., Leclercq, P., Maurer, H., Morlinghem, M., Pandit, A., Rabatel, A., Ramsankaran, R., Reerink, T., Robo, E., Rouges, E., Tamre, E., Van Pelt, W., Werder, M., Azam, M., y Andreassen, L. (2021). Results from the ice thickness models intercomparison experiment phase 2 (ITMIX2). *Frontiers in Earth Science*, 8, Article 571923. <https://doi.org/10.3389/feart.2020.571923>

Haeberli, W., Arenson, L. U., Wee, J., Hauck, C., y Mölg, N. (2024). Discriminating viscous-creep features (rock glaciers) in mountain permafrost from debris-covered glaciers: A commented test at the Gruben and Yerba Loca sites, Swiss Alps and Chilean Andes. *The Cryosphere*, 18(4), 1669–1683. <https://doi.org/10.5194/tc-18-1669-2024>

Huss, M. (2013). Density assumptions for converting geodetic glacier volume change to mass change. *The Cryosphere*, 7(3), 877–887. <https://doi.org/10.5194/tc-7-877-2013>

INE. (2018). *Síntesis de resultados Censo 2017*. Instituto Nacional de Estadísticas. https://www.ine.cl/docs/default-source/censo-de-poblacion-y-vivienda/publicaciones-y-anuarios/2017/publicaci%C3%B3n-de-resultados/sintesis-de-resultados-censo2017.pdf?sfvrsn=1b2dfb06_6

Labandeira, X., León, C., y Vázquez, M. (2007). *Economía ambiental*. Pearson Prentice Hall. https://www.academia.edu/36183336/Economia_Ambiental_Labandeira

MIDESO. (2013). *Metodología para la formulación y evaluación socioeconómica de embalses y obras hidráulicas anexas con fines múltiples* (1.ª ed.). Subsecretaría de Evaluación Social. Recuperado de <https://sni.gob.cl/storage/docs/Metodologia-Embalses-Multiproposito-2014.pdf>

Millennium Ecosystem Assessment. (2005). *Evaluación de los Ecosistemas del Milenio. Informe de Síntesis* (p. 43). Recuperado de www.millenniumassessment.org

Peña, H., y Nazarala, B. (1987). Snowmelt runoff simulation model of a central Chile Andean basin with relevant orographic effects. *Large Scale Effects of Seasonal Snow Cover*, 166, 161–172. Recuperado de https://glaciologia.cl/wp-content/uploads/2020/08/pena_nazarala.pdf

República de Chile. (2022). Propone a S.E. el Presidente de la República la creación del Parque Nacional Glaciares de Santiago. *Consejo de Ministros para la sustentabilidad, Ministerio de Medio Ambiente* (p. 4). Recuperado de <https://mma.gob.cl/wp-content/uploads/2022/03/Acuerdo-6-2022.pdf>

RGI. (2017). *Randolph Glacier Inventory - A Dataset of Global Glacier Outlines, Version 7.0*. Boulder, Colorado, USA: NSIDC: National Snow and Ice Data Center. <https://nsidc.org/data/nsidc-0770/versions/6>

Schaffer, N., MacDonell, S., Réveillet, M., Yáñez, E., y Valois, R. (2019). Rock glaciers as a water resource in a changing climate in the semiarid Chilean Andes. *Regional Environmental Change*, 2(1–17). <https://doi.org/10.1007/s10113-018-01459-3>

Segovia, A. (2014). *Caracterización glaciológica de Chile y valoración de servicios ecosistémicos de glaciares en base a mercados reales (estudio de caso del Monumento Natural El Morado)* (Tesis de Magíster, Universidad de Chile). Recuperado de <https://mascn.forestaluchile.cl/wp-content/uploads/2015/01/Tesis-Alexis-Segovia.pdf>

Segovia, A. (2015). Glaciares en el Sistema Nacional de Áreas Silvestres Protegidas por el Estado (SNASPE). *Revista Investigaciones Geográficas Chile*, 49, 51–68. <https://doi.org/10.5354/0719-5370.2015.37513>

Subsecretaría de Evaluación Social (SES). (2021). *Precios Sociales 2021* (p. 22). Departamento de Metodologías, División de Evaluación Social de Inversiones. <https://es.readkong.com/page/precios-sociales-2021-sistema-nacional-de-inversiones-6455318>

Vergara, W., Deeb, A., Valencia, A., Bradley, R., Francou, B., Zarzar, A., Grunwaldt, A., y Haeussling, S. (2007). Economic impacts of rapid glacier retreat in the Andes. *EOS*, 88(25), 261–268. <https://doi.org/10.1029/2007EO250001>

Wagner, T., Brodacz, A., Krainer, K., y Winkler, G. (2020). Active rock glaciers as shallow groundwater reservoirs, Austrian Alps. *Grundwasser*, 25(3), 215–230. <https://doi.org/10.1007/s00767-020-00455-x>

Wagner, T., Kainz, S., Krainer, K., y Winkler, G. (2021). Storage-discharge characteristics of an active rock glacier catchment in the Innere Ölgrube, Austrian Alps. *Hydrological Processes*, 35(5), 1–16. <https://doi.org/10.1002/hyp.14210>

