

# Monitoreo de los humedales altoandinos en la cuenca del río Maipo

Estudio base sobre la importancia de la conservación de la infraestructura verde para la seguridad hídrica

## INFORME FINAL

Subcuenca alta del río Yeso,  
Comuna San José de Maipo  
Región Metropolitana, Chile

### Autores:

#### **The Nature Conservancy**

Paulo Petry, PhD  
Mercedes Ibáñez  
Llara Kritzner, M.Sc.  
Francisca Bardi, M.Sc.

#### **Cetaqua Chile**

Domenico Sciolla, M.Sc.  
Eduardo Bustos, M.Sc.  
José Rivas



## Agradecimientos

Este estudio fue posible gracias al generoso apoyo de muchas personas, organizaciones y profesionales entre los cuales se encuentran:

Gabriela y Verónica Cardone, dueñas del predio, quienes se mostraron interesadas y preocupadas por este tema y por lo mismo nos dieron la facilidad para entrar y hacer las tareas pertinentes.

The Nature Conservancy: Francisca Tondreau, Juan José Donoso, Maryann Ramírez, Tania Correa, Claudia Escobar, Juan Pablo Rubilar, Stephan Halloy, Sebastián Bonelli, Jorge León, David Mesutto, Daniela Cabezas.

Corporación Chilena de Investigación del Agua, Cetaqua Chile: Carmen Lacomá, Francisco Rossier.

Centro de Cambio Global UC: Sebastián Vicuña, Andrés Pica, Eduardo Bustos, Juan Pablo Herane, Javier Rivera, Luca Mao y Ricardo Carrillo.

Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Agronómicas: Alejandro León, Jorge Soto, Daniela Osses, Javier Pérez.

Otros: Craig Saunders, Saunders Associates.

Así mismo, se agradece el apoyo de las siguientes instituciones: Banco HSBC, Bonneville Environmental Foundation, Google, Fondo de Agua Santiago-Maipo.

Además, este producto es cofinanciado por el Banco Interamericano de Desarrollo, bajo la Alianza Latinoamericana de Fondos de Agua, una iniciativa conjunta de TNC, Fundación FEMSA, el Banco Interamericano de Desarrollo, el Fondo para el Medio Ambiente Mundial y la Iniciativa Internacional de Protección del Clima (IKI). Las opiniones expresadas en este producto son las de los autores y no reflejan necesariamente los puntos de vista de IKI, BMU, FMAM o BID, su Junta Directiva o los países que representan.

---

Cartografía: Mercedes Ibáñez, TNC.

Fotografías: The Nature Conservancy

Diseño y diagramación: Antonia Sabatini, Gaspar Garros.









# Índice

<b>1. INTRODUCCIÓN</b>	7
1.1. Ubicación General	10
1.2. Descripción de sitios de monitoreo subcuenca del río Yeso	11
Humedal Casa Piedra	11
Arroyo del Aparejo	12
Humedal Campamento Minero	12
Humedal Parque Valle del Yeso	14
1.3. Descripción de las Cuencas pareadas en estudio	15
Subcuenca Casa Piedra	16
Subcuenca Aparejo	17
<b>2. METODOLOGÍA</b>	18
2.1. Monitoreo hidrológico	19
2.2. Caracterización climática	20
2.2.1. Tendencias observadas a escala anual y estacional	21
Precipitaciones	23
Cobertura nival	24
Temperatura	24
2.3. Caracterización de suelos	25
2.4. Estimación de almacenamiento de agua	25
<b>3. RESULTADOS</b>	26
3.1. Precipitaciones en la zona de estudio	27
3.2. Cobertura Nival	28
3.3. Curvas de caudal contra altura	30
3.4. Dinámica de congelamiento y derretimiento de nieve	31
3.5. Series de caudales	34
3.6. Monitoreo de Agua Subterránea en Humedal Casa Piedra	37
3.7. Análisis de Temperatura del Suelo	42
<b>4. CONCLUSIONES</b>	44
<b>5. BIBLIOGRAFÍA</b>	50
<b>6. ANEXOS</b>	51
6.1. Calicatas	51

# Índice de Figuras y Tablas

## FIGURAS

1. Cuenca del río Maipo, subcuenca del río El Yeso y áreas protegidas	10
2. Subcuenca del río El Yeso con sitios de monitoreo	11
3. Abanico aluvial y humedal Casa Piedra	12
4. Abanico aluvial en humedal Arroyo del Aparejo	12
5. Humedal Campamento Minero	14
6. Red de monitoreo en humedal Parque Valle del Yeso	14
7. Subcuenca del río Yeso (Fuente: DGA), y microcuencas Casa Piedra (izquierda) y Aparejo (derecha) aguas arriba del Embalse El Yeso.	15
8. Zona de estudio asociada al monitoreo hidrológico y monitoreo de vegetación en la subcuenca del río Yeso	15
9. Ecosistemas relevantes presentes en la zona de estudio	16
10. Pendientes y glaciares en los sitios Casa Piedra y Aparejo	16
11. Red de monitoreo en humedal Casa Piedra (izq) y Aparejo (der)	19
12. Transecto de medición de aforo en arroyo del Aparejo	20
13. Promedio histórico de precipitaciones, caudal y temperatura, 1990-2020. Fuente: Elaboración propia a partir de datos DGA	21
14. Evolución precipitación total anual para la estación el Yeso Embalse (DGA) para el período 1990-2020	23
15. Evolución de la temperaturas medias y extremas promedio anual en la estación el Yeso Embalse (DGA) para el período 1990-2020	24
16. Series de precipitaciones anuales modeladas en las cuencas en estudio para el período 1980/81 a 2021/2022	28
17. Series de cobertura nival regional para el período 2000/2001 a 2021/2022	29
18. Series de cobertura nival y precipitación diaria en las cuencas en estudio para el período 2016 a 2022	29
19. Series de cobertura nival y precipitaciones diarias durante el año 2022	29
20. Curvas de caudal contra altura en Aparejo	30
21. Curvas de caudal contra altura en sección 2 de Casa Piedra	30
22. Curvas de caudal contra altura en sección 1 de Casa Piedra	30
23. Cambio en aportes provenientes desde la parte alta de la cuenca	31
24. Paso de un aluvión durante febrero de 2017, captado por las cámaras trampa en el la parte superior del abanico aluvial de Aparejo	32

25. Dinámica de congelamiento parcial y derretimiento del cauce del sector de Aparejo	33
26. Caudales específicos de las cuencas de Aparejo y Casa Piedra (l/s por km <sup>2</sup> )	34
27. Caudales específicos de las cuencas de Aparejo y Casa Piedra (l/s por km <sup>2</sup> ), año hidrológico 2019/2020	35
28. Caudales específicos medios durante el período de deshie en Aparejo (l/s por km <sup>2</sup> ) contra la precipitación del año hidrológico (mm)	36
29. Serie temporal del nivel de la Napa freática a lo largo del transecto longitudinal Humedal Casa Piedra 2016-2022	38
30. Series temporales de niveles de la napa freática A y B	40
31. Comportamiento térmico azonal del perfil vertical de suelo en Casa Piedra	43

## **TABLAS**

1. Estaciones meteorológicas analizadas	21
2. Tendencias anuales precipitación para el período 1990-2020	23
3. Comparación de estadígrafos de productos grillados con la estación El Yeso Embalse (período 1980/1981 a 2021/2022)	27
4. Comparación de precipitación, caudal medio de deshielo y altura máxima del nivel freático	36



# 1. INTRODUCCIÓN





La alta montaña juega un rol fundamental para las áreas más bajas en las cuencas en las que se encuentran, particularmente en relación con la provisión de agua, tanto para la mantención de ecosistemas, el abastecimiento a las personas y el desarrollo de actividades productivas. En la alta montaña es donde se generan los procesos hidrológicos que determinan la disponibilidad de agua, su temporalidad, calidad, caudales máximos y mínimos, determinando en parte importante las características y las actividades que pueden desarrollarse en la cuenca.

La cuenca del río Maipo, ubicada en Chile Central, aloja a la ciudad de Santiago de Chile, siendo el hogar de más de 7 millones de personas, incluyendo múltiples actividades económicas y un alto valor ecológico. El río Maipo nace en las faldas del volcán Maipo a 5.523 m.s.n.m. y recorre una longitud de 250 kilómetros hasta desembocar en el Océano Pacífico. Cubre una superficie levemente superior a los 15.200 km<sup>2</sup> y presenta un clima mediterráneo semiárido de estación seca prolongada, con precipitaciones y bajas temperaturas concentradas en los meses de invierno (junio, julio, agosto), presentando temperaturas máximas y ausencia de precipitaciones en los meses de verano (diciembre, enero, febrero). La precipitación en la cuenca es altamente variable, con años lluviosos, eventos de lluvia de alta intensidad e importante presencia de sequías en los registros históricos. Esta condición de sequía se ha intensificado desde hace más de una década en todo

Chile Central, siendo coherente con manifestaciones tempranas de escenarios de cambio climático.

Proyecciones de cambio climático indican una fuerte tendencia a la disminución en las precipitaciones y un alza en las temperaturas, lo que generará importantes desafíos en materia de disponibilidad de agua y cambio en la temporalidad de los caudales (DGA, 2021). Esta condición se ha manifestado de manera muy intensa a partir de un período de sequía por más de 10 años (Garreaud et al., 2019), donde, por ejemplo, el año 2019 terminó con un 76% de déficit respecto al promedio histórico para el período 1980-2010 (82 mm/año vs 340 mm/año en la estación Quinta Normal, DMC). Si bien el año 2022 ha recibido mayor precipitación respecto al año anterior, al mes de septiembre se observa un déficit de 68% respecto a un año normal (período 1991-2020), manteniendo una condición de sequía severa persistente por al menos los últimos 48 meses<sup>1</sup> (DMC, 2022).

La cuenca del río Maipo conjuga importantes desafíos vinculados al agua, entre los que se cuentan una alta variabilidad natural asociada a un ecosistema semi-árido y los efectos del cambio climático en el balance hídrico de la cuenca. Por otro lado, se observa un aumento en la presión en el uso del recurso por distintos usuarios del agua debido a la

1 Servicios Climáticos (meteochile.gob.cl).





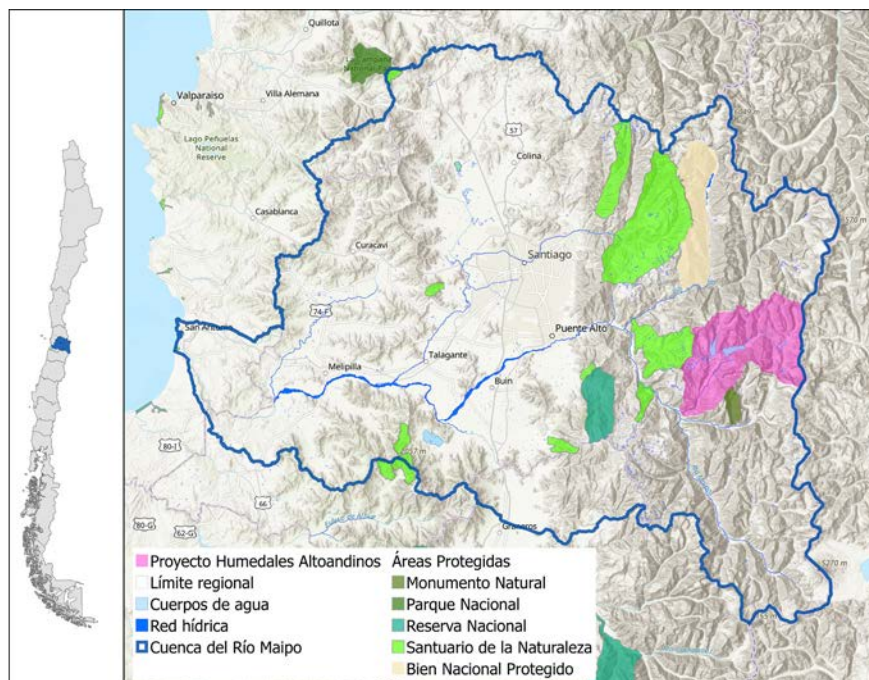
disminución de los caudales superficiales y la disminución de los niveles de las aguas subterráneas. Este déficit hídrico ha provocado, entre otros efectos, la degradación de sistemas naturales de alto valor de conservación, así como la pérdida de la calidad del agua, tanto por causas naturales o intensificación de las antrópicas.

A partir de este contexto complejo, se hace necesario mejorar el conocimiento respecto a los servicios que proveen los ecosistemas en el entorno andino de la cuenca, en particular los vinculados al ciclo del agua. En esa línea, la identificación y caracterización de estos ecosistemas es prioritario, destacando entre los presentes en el área cordillerana, las formaciones de vegas y/o humedales altoandinos.

Los humedales figuran entre los ecosistemas más productivos del mundo, son sitios relevantes para la biodiversidad biológica y juegan un rol crítico como regulador del sistema hídrico. Entre los múltiples servicios ecosistémicos que estos sistemas proveen están la captación de carbono, la protección de la calidad de las aguas, protección ante inundaciones, tanto costera como fluvial, regulación de los niveles de agua en los acuíferos y del agua en el suelo, regulación de caudales máximos y soporte de la biodiversidad. A pesar de este gran potencial, se ha observado un continuo y rápido descenso de las áreas de humedales a nivel global (Thorslund et al., 2017).

Los humedales que forman parte de los ecosistemas de páramo, jalca y puna se conocen como humedales andinos y alto andinos (Convención de Ramsar, 2005) y contienen una diversidad biológica con niveles altos de endemismo en especies de animales y plantas terrestres y acuáticas (MMA, 2011). Los humedales son considerados ecosistemas frágiles y pueden ser afectados por causas naturales como sequías extremas, fuertes vientos, alta radiación y amplitudes térmicas grandes (Mirande y Tracanna, 2009) y/o a factores antrópicos, como el sobrepastoreo, la extracción de agua para uso agrícola, minero o de consumo humano, así como modificaciones a los cursos de agua (MMA, 2011). La capacidad de los humedales de responder a fluctuaciones ambientales y tasas de cambio cada vez más aceleradas será crucial para los servicios que estos ecosistemas prestan a las comunidades

**Figura 1**  
Cuenca del río Maipo,  
subcuenca del río Yeso y  
áreas protegidas.



humanas y para el mantenimiento de la biodiversidad de especies que los habitan.

Desde octubre de 2014, TNC ha implementado una red de monitoreo de humedales en la subcuenca del río Yeso, afluente del río Maipo en el área de cordillera, aguas arriba del embalse de El Yeso, a más de 2.500 msnm de altura. Este es un esfuerzo pionero en Chile, de gran valor para la investigación y el desarrollo de herramientas de modelación, debido a las dificultades que se deben resolver para poder realizar monitoreos sistemáticos en ecosistemas expuestos a climas extremos y ubicados en zonas de difícil acceso como lo son los humedales y vegas altoandinas en cordillera. El monitoreo ha permitido que actualmente se tengan resultados en relación con el rol que cumplen los humedales como infraestructura verde, basados en ocho años de medición en sitios de estudio específicos, el cual complementa el levantamiento de un catastro geográfico de humedales altoandinos y un análisis de su estado actual de degradación.

Este informe compila y analiza los resultados de las campañas de monitoreo entre octubre de 2014 y abril de 2022 realizado en los 4 sitios de estudio

considerados en la cuenca alta del río Yeso, y busca ser un aporte en mejorar la comprensión y valoración de los humedales altoandinos como solución natural o “Infraestructura Verde” para mantener la calidad y regulación de los flujos de agua, tanto para el abastecimiento de la ciudad como para otros usos.

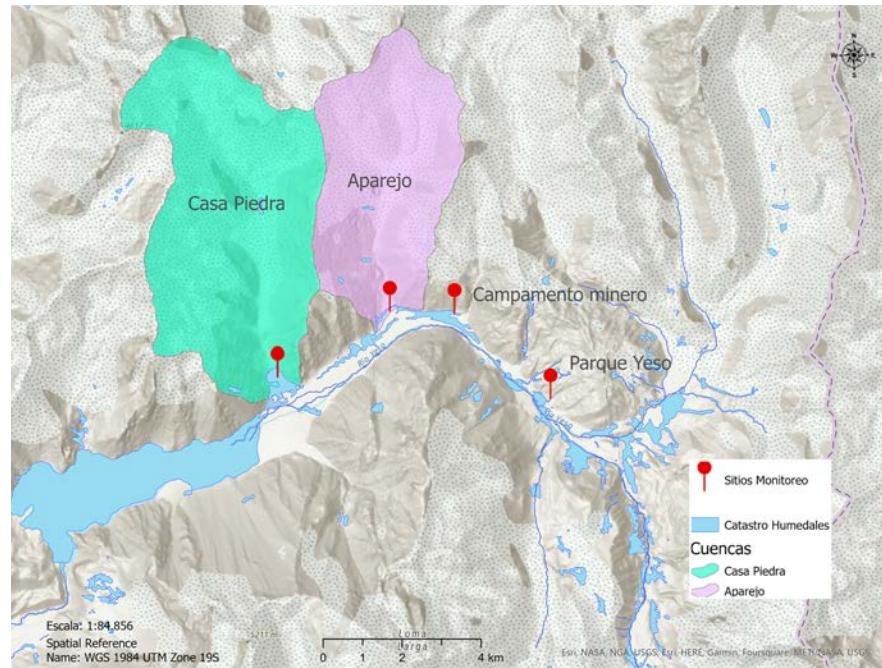
### 1.1. Ubicación General

La cuenca del río Maipo (Figura 1) se ubica en la zona central de Chile, entre 32° 55' - 34° 15' de latitud Sur y 69° 46' - 71° 43' de longitud Oeste, coincidiendo mayormente con los límites administrativos de la Región Metropolitana de Santiago. El río Maipo se extiende a lo largo de 250 kilómetros, originándose en las laderas del volcán Maipo a aproximadamente 5.500 m.s.n.m. y desembocando en el Océano Pacífico.

La superficie total de la cuenca es cercana a los 15.200 km<sup>2</sup>. El área de estudio de este proyecto se asocia a la parte alta de la cuenca, específicamente a la subcuenca del río Yeso, afluente del río Maipo, ubicada entre 2.500 y 2.523 msnm con una superficie de 627 km<sup>2</sup>.



**Figura 2**  
Subcuenca del río  
Yeso con sitios  
de monitoreo<sup>2</sup>.



## 1.2. Descripción de sitios de monitoreo subcuenca del río Yeso

La red de monitoreo hidrológico se compone de una serie de puntos de monitoreo distribuidos en cuatro sitios de la cuenca alta del río Yeso: Sitio humedal Casa Piedra, Sitio humedal Campamento Minero, Sitio humedal Parque Valle del Yeso y Sitio Arroyo Aparejo (Figura 2).

### Humedal Casa Piedra

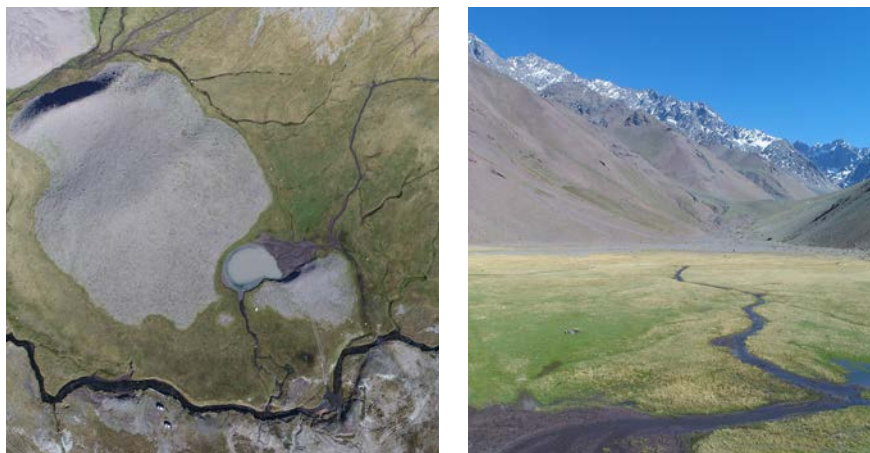
El humedal Casa Piedra se encuentra sobre un abanico aluvial en forma triangular de aproximadamente 40 hectáreas, que se extiende de norte a sur y está ubicado entre dos formaciones montañosas (Figura 3). Los depósitos aluviales se componen de una mezcla de roca, canto rodado, grava y suelo fino derivado de las laderas de las montañas cercanas. El terreno tiene una pendiente longitudinal media de 2% para una distancia cercana a los 800 metros a lo largo de la línea central y pendientes transversales laterales que varían entre 0,2 y 0,7%, encontrándose en la

zona una morrena de origen glaciar que determina la geografía de la parte baja del cono aluvial.

El humedal ocupa la mitad inferior del abanico aluvial cubriendo cerca de 18 hectáreas con la vegetación característica de este tipo de humedales, compuesta principalmente de juncias como ciperáceas, asteráceas y poáceas (o gramíneas) y otras especies presentes en suelos saturados con el desarrollo de depósitos de turba. La vegetación aguas arriba de la morrena está compuesta de manera mayoritaria por *Carex gayana*. Se trata del pasto duro y resistente presente en el humedal, alcanzando coberturas cercanas al 90%. El 10% restante estaría representado por una serie de poáceas como *Hordeum comosum*, fabáceas como *Trifolium repens* y asteráceas como *Taraxacum officinale*. Aguas abajo de la morrena, en las zonas vadosas saturadas, es posible encontrar coberturas del 100% que se componen de dos especies en particular: *Werneria pygmaea* y *Veronica anagallis-aquatica*. En la zona vadosa, con saturación intermitente es posible encontrar *Werneria pygmaea*, *Lobelia oligophylla* (ambas representan una cobertura cercana al 90%) y *Hordeum comosum* (cobertura aproximada de 10%), alcanzando el 100%. Finalmente, en la zona seca, *Lobelia oligophylla* (70%),

2 Fuente: Elaboración propia, Catastro Humedales (2022).

**Figura 3**  
Abanico aluvial y  
humedal Casa Piedra.



**Figura 4**  
Abanico aluvial en  
Arroyo del Aparejo.



*Trifolium repens* y *Hordeum comosum* (20%), y el 10% restante con *Taraxacum officinale*, *Carex gayana* y *Mimulus luteus*. La mitad superior del abanico tiene vegetación escasa compuesta principalmente de arbustos xerófitos.

Históricamente este humedal ha tenido una alta presión antrópica por parte de actividades ganaderas, turismo no regulado, compactación de suelo por automóviles y tránsito vehicular. Situaciones que se evidencian en la vegetación y la compactación del suelo.

### **Arroyo del Aparejo**

El Arroyo del Aparejo fluye a través de un abanico aluvial similar al de Casa Piedra, pero no tiene un humedal asociado a éste, limitándose la vegetación a los márgenes del curso principal a la salida de la cuenca (Figura 4). El terreno está dominado por grava y canto rodado, a través de los cuales fluye un río trezado. Toda la superficie está desprovista

de vegetación. El abanico aluvial tiene un área de 10,5 ha con un eje longitudinal de 580 m de arriba a abajo y una pendiente media del 3,4%. Éste no presenta afloramientos de aguas subterráneas, por lo que la única fuente de agua es el flujo superficial originado por la nieve de las montañas y el derretimiento de hielo.

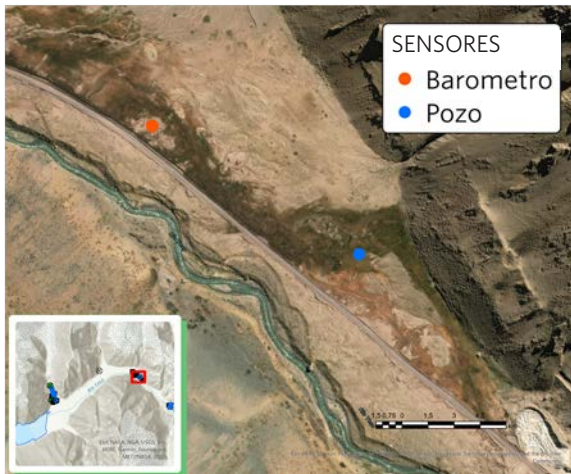
### **Humedal Campamento Minero**

El humedal del Campamento Minero está ubicado en una terraza aluvial elevada de perfil plano con una pendiente suave de menos del 0,5% que se extiende entre el lado de la montaña hacia el norte y el cañón del río Yeso hacia el sur, con una longitud de 850 metros y un ancho máximo de 190 metros cubriendo 12,8 hectáreas (Figura 5). El humedal recibe toda su agua de manantiales de aguas subterráneas que fluyen desde un costado de la montaña en el borde norte.

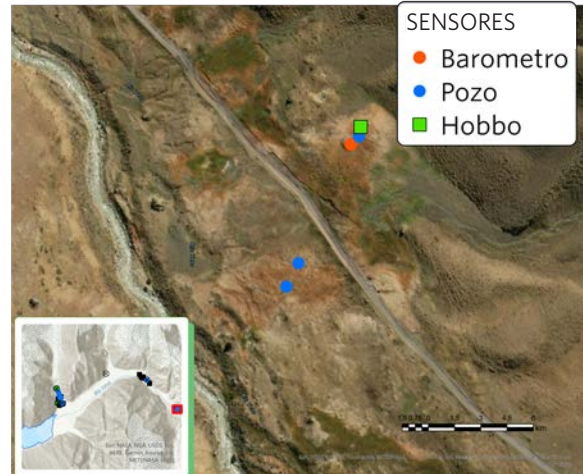








**Figura 5**  
Humedal Campamento Minero.



**Figura 6**  
Red de monitoreo en humedal Parque Valle del Yeso.

Los suelos están en su mayoría saturados durante todo el año y se componen de precipitados de yeso y depósitos de turba, en algunas áreas en condiciones anaeróbicas, en partes del humedal durante los meses de verano que producen gases (H<sub>2</sub>S).

La vegetación está dominada por juncias y hierbas que crecen en un suelo alcalino. Prácticamente el 100% de la vegetación presente en el humedal corresponde a *Carex gayana*, mientras que al norte del camino es posible encontrar importantes coberturas de *Lobelia oligophylla* (80%) y *Trifolium repens*, *Hordeum comosum* y *Taraxacum officinale* (20%). Al sur del camino las especies presentes son *Lobelia oligophylla* (40%), *Trifolium repens* (30%), *Hordeum comosum* (10%) y el 20% restante algunas poaceas y *Taraxacum officinale*.

Este complejo de humedales tiene una pequeña corriente que lo atraviesa y una serie de pequeñas lagunas intermitentes que contienen alta salinidad y aguas duras.

### Humedal Parque Valle del Yeso

El Parque Valle del Yeso se caracteriza por la presencia de un humedal que se alza al costado del valle y está compuesto por una serie de micro terrazas en una disposición de escalera (peldaños o andenes), que corresponden a antiguas morrenas laterales (Figura 6). Recibe aportes de agua mediante la esco-

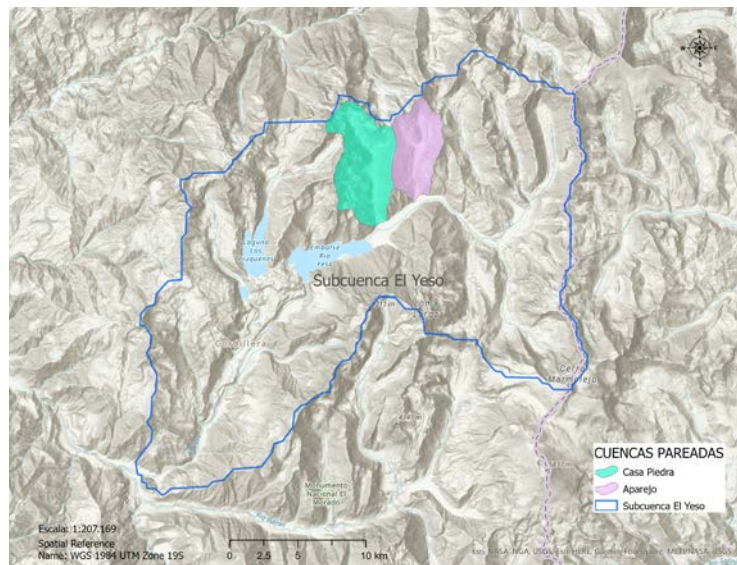
orrentía superficial originada en el derretimiento de nieve a principios de la primavera. El resto del año los aportes de caudal se dan solo por fuentes de agua subterránea. Excepto en el caso de la primavera, no hay salida superficial de este humedal y todo el flujo de agua es subterráneo, descargando directamente al río Yeso. El terreno de la superficie está cubierto por una vegetación espesa que retiene los sedimentos finos que llegan de las laderas cercanas y produce un suelo fino y compacto que retiene el agua. De los tres sistemas que están siendo monitoreados, Parque Valle del Yeso tiene las pendientes de terreno más empinadas, que varían del 2 al 12%.

En el sitio del Parque Valle del Yeso fueron instalados 3 pozos de nivel con el mismo método de Casa Piedra, para monitorear la fluctuación del nivel de la napa freática. La decisión de establecer solo tres pozos de prueba fue en función de haber verificado la ausencia de escorrentía superficial durante la mayor parte del año. Los pozos se ubicaron según la estructura del terreno para capturar los distintos comportamientos hidrológicos del humedal.

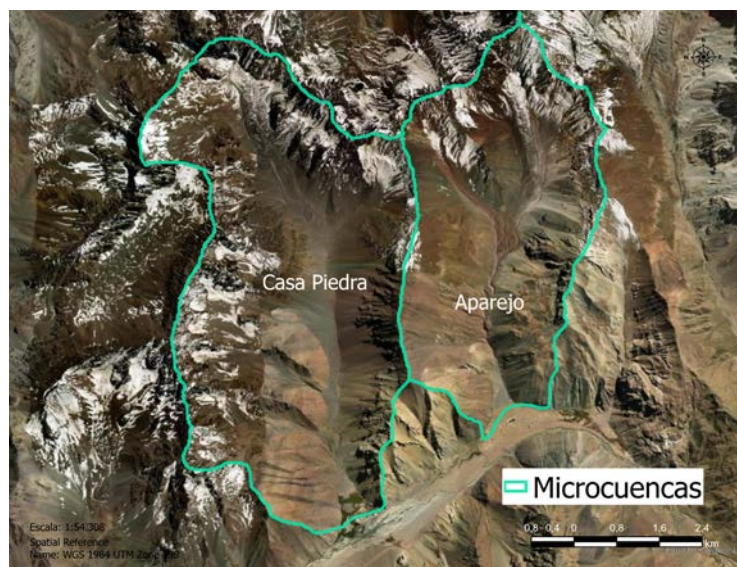
A partir del monitoreo desarrollado en estos cuatro sitios, el presente documento analiza los datos de dos sitios de monitoreo, definidos en las dos microcuencas pareadas de los sitios Casa Piedra, la que cuenta con un área de humedal en su parte baja, y el sitio Arrollo del Aparejo, el cual no presenta una formación de humedal.



**Figura 7**  
Subcuenca del río Yeso (Fuente: DGA), y subcuencas Casa Piedra (izquierda) y Aparejo (derecha) aguas arriba del Embalse El Yeso.



**Figura 8**  
Zona de estudio asociada al monitoreo hidrológico y monitoreo de vegetación en la subcuenca del río Yeso.

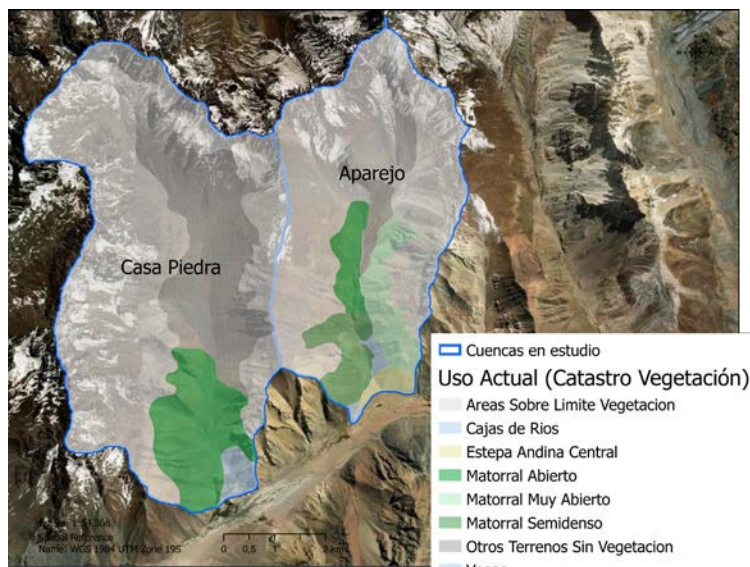


### 1.3. Descripción de las cuencas pareadas en estudio

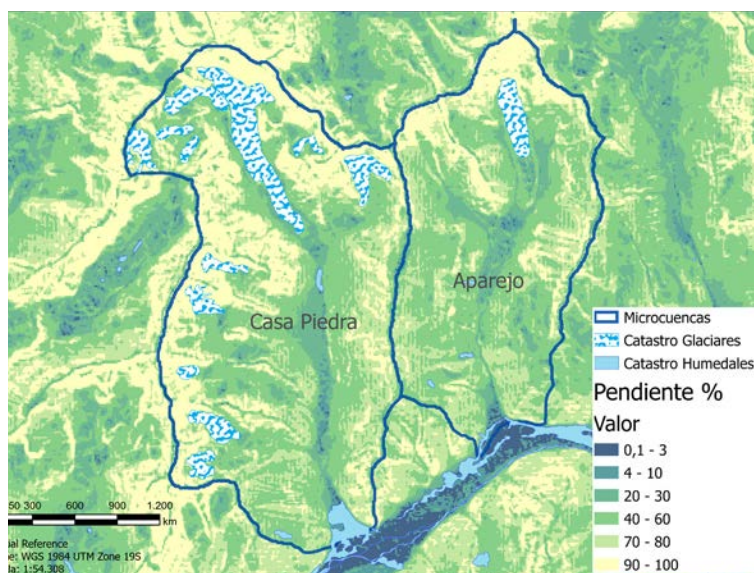
Con el fin de cuantificar la influencia de la vegetación de humedales en el régimen hidrológico, se seleccionaron dos cuencas con grandes similitudes en la mayoría de sus condiciones físicas, difiriendo fundamentalmente en la presencia de vegetación de vega en uno y no en el otro. Las similitudes incluyen que se encuentran geográficamente contiguas, en cuencas de tamaño semejante que desaguan en forma paralela hacia el sur, con

geología y pendientes parecidas. Además de la vegetación, las cuencas difieren en la masa glaciar. Casa Piedra cuenta con un humedal establecido en el lugar de una superficie aproximada de 18 ha en un cono aluvial de 40 ha. En tanto, Aparejo cuenta con una pequeña superficie de humedal cercana las 0,1 ha.

Casa Piedra y Aparejo se consideraron cuencas pareadas para este estudio y se busca relevar sus similitudes y diferencias relacionadas con variables hidrológicas.



**Figura 9**  
Ecosistemas relevantes presentes en la zona de estudio<sup>3</sup>.



**Figura 10**  
Pendientes y glaciares en los sitios Casa Piedra y Aparejo  
Fuente: Elaboración propia, Catastro Humedales 2022<sup>4</sup>, Catastro Glaciares.

Ambas cuencas presentan los mismos ecosistemas terrestres de relevancia<sup>5</sup>, siendo estos el herbazal mediterráneo andino de *Nastanthus spathulatus* - *Menonvillea spathulata*, matorral bajo mediterráneo andino de *Chuquiraga oppositifolia* - *Nardophyllum lanatum* y matorral bajo mediterráneo andino

de *Laretia acaulis* - *Berberis empetrifolia*. Además de ecosistemas glaciares y periglaciares.

### Subcuenca Casa Piedra

La subcuenca cuenta con una superficie de 3.193,3 ha. Las elevaciones varían entre los 2.631 y 4.614 m.s.n.m. y la cuenca tiene una orientación sur principalmente. De su superficie, 40 ha aproximadamente corresponde a la zona de abanico aluvial con aproximadamente 18 ha de humedal. Es una zona con alta presencia de movimientos gravitacionales y movimientos en masa, debido al efecto de las

3 Luebert, F., & Pliscoff, P. (2020). *Sinopsis bioclimática y vegetacional de Chile. 2da edición. Editorial Universitaria.*

4 Ministerio del Medio Ambiente (2022) Catastro de Humedales.

5 Min del Medio Ambiente 2022.





precipitaciones y la pendiente sumados a la constitución del suelo no compactado.

En la parte alta de la subcuenca se registran 340 ha de glaciares, de las cuales 33,5 ha corresponden a glaciares de montaña, siendo el resto glaciares rocosos, estimándose su volumen en 85.820.888,8 m<sup>3</sup> (Catastro glaciares, 2022<sup>6</sup>).

### **Subcuenca Aparejo**

La subcuenca Aparejo cuenta con una superficie de 2.041,3 ha. Sus elevaciones van desde los 2.576 hasta los 4.632 msnm. La orientación es sur al igual que la cuenca de Casa Piedra y en su parte alta cuenta con la presencia de un glaciar rocosos de 48 ha de acuerdo con el catastro publicado en el año 2022, y un volumen de 10.765.279,7 m<sup>3</sup>.

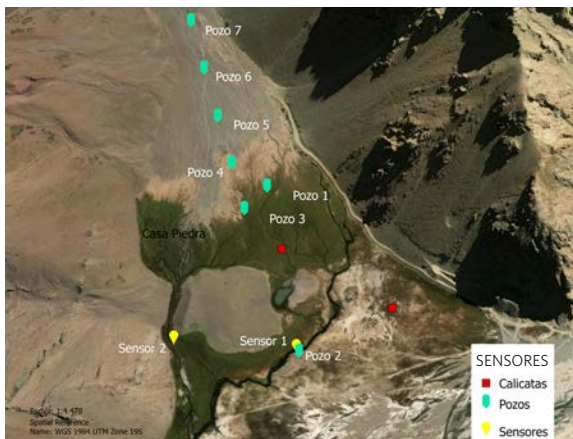
**6** Segovia, A., G. Casassa, J. Huenante, A. Espinoza y F. Bug (2022). Actualización Inventario Público de Glaciares 2022: metodología, dificultades y resultados. IV Congreso de la Sociedad Chilena de la Criósfera SOCHICRI. Villarrica-Pucón, Chile.



## 2. METODOLOGÍA







**Figura 11**  
Red de monitoreo en humedal Casa Piedra (arriba) y Aparejo (abajo).

## 2.1. Monitoreo hidrológico

El monitoreo más exhaustivo fue realizado sobre el humedal Casa Piedra, donde se midieron caudales superficiales además de los niveles de la napa subterránea somera. Los flujos superficiales se midieron en dos sitios, en el punto de entrada en la parte superior del abanico aluvial y dos puntos de flujo de salida en los flancos inferiores. El agua subterránea fue monitoreada por una serie de siete pozos de prueba, cinco distribuidos en intervalos de 100 metros de distancia a lo largo de un perfil longitudinal y dos pozos auxiliares, uno en cada lado del canal de salida principal (Figura 11).

En el sistema Aparejo sólo se llevó a cabo un monitoreo del flujo de escorrentía superficial de salida, debido a la ausencia de humedales establecidos en la parte inferior del abanico aluvial (Figura 12).

Para la medición de los niveles de agua superficial y subterránea se utilizaron sensores de presión Solinst<sup>7</sup> (Solinst 3001 Levellogger Edge), registrando mediciones cada 15 minutos en los sensores de caudal superficial y cada 3 horas en los pozos. Para la descarga de datos se realizaron campañas de terreno entre dos a cuatro veces al año, momento en que también se realizó la mantención y limpieza de los pozos. De manera paralela se realizaron mediciones de presión atmosférica con barómetros Solinst

7 <https://www.solinst.com/products/general-brochure/>



**Figura 12**  
Transecto de medición de aforo en arroyo del Aparejo.

(3001 Barologger Edge), con intervalos de tiempo de 15 minutos, con el fin de realizar la compensación barométrica necesaria para el análisis de los datos de nivel. En cada campaña de terreno se realizaron aforos de los caudales en los cauces de salida, mediante el uso de correntómetro y la determinación topográfica de las secciones transversales de los cauces. Se realizaron dos puntos de aforo en el humedal Casa Piedra y un punto en el arroyo del Aparejo, específicamente donde se encuentran instalados los sensores de nivel de escorrentía superficial. La medición de la sección transversal, junto a los aforos realizados en cada sitio durante las campañas en terreno y el registro de nivel de agua en el cauce, permitió contar con datos de caudal cada 15 minutos durante todo el periodo de monitoreo en cada punto de medición, generando información de alto valor respecto a la variabilidad y respuesta de la hidrología superficial en subcuencas de sistemas montañosos.

En Casa Piedra se instaló un perfil vertical para medición de temperatura del suelo, donde se midieron las temperaturas en siete intervalos de profundidad del suelo (+2 cm, 10 cm, 20 cm, 50 cm, 75 cm, 1 m y 1,5 m) y en la superficie del terreno cada 12 horas.

En paralelo se instalaron tres cámaras trampa sincronizadas con la red de sensores de flujos super-

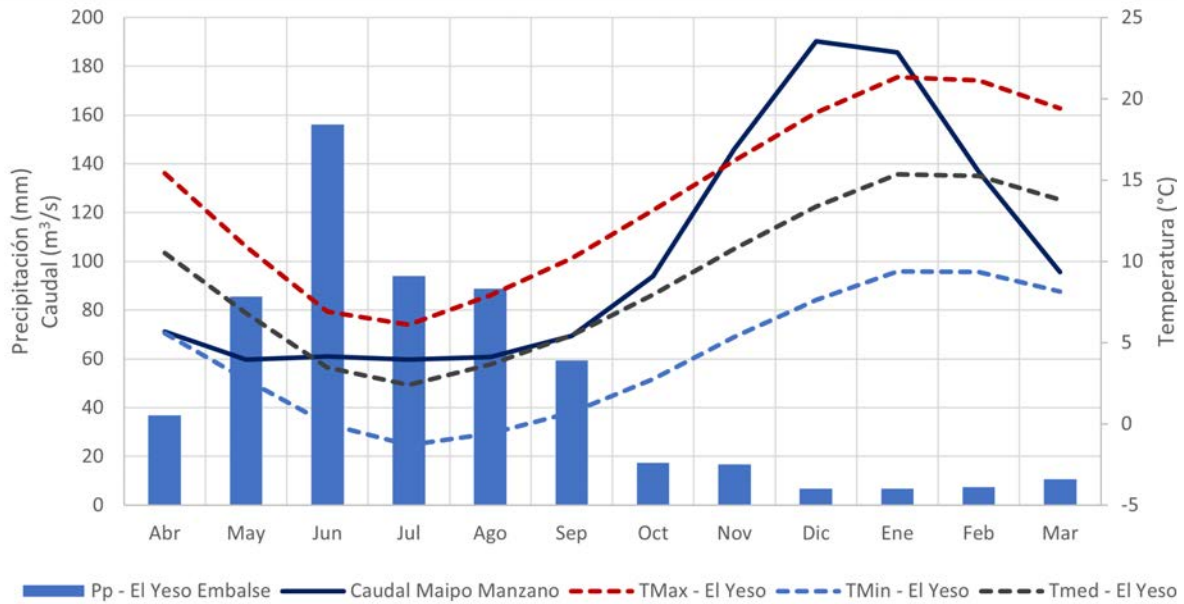
ficiales en el humedal Casa Piedra y una cámara en el abanico del Aparejo. Las cámaras permiten corroborar anomalías observadas en los datos, de forma a proveer un mecanismo de verificación, así como también para documentar las dinámicas con una serie temporal de imágenes de las condiciones ambientales y su variación temporal. Lamentablemente este monitoreo solo duró unos meses ya que algunos de los equipos fueron sustraídos por desconocidos.

Los sensores se encuentran realizando mediciones desde noviembre de 2014 hasta la fecha.

## 2.2. Caracterización climática

La subcuenca alta del río Maipo, donde se ubican las cuencas analizadas, posee un régimen nivo-pluvial, siendo esta alimentada por las precipitaciones acumuladas en los meses de invierno en forma de nieve y hielo, y su derretimiento en los meses de primavera y verano producto del aumento en la temperatura. En la Figura 13 se presenta el hidrograma promedio mensual para el período 1990-2020 con la precipitación y temperatura registrada en la estación meteorológica Embalse El Yeso, y los registros de caudales de la estación de referencia Río Maipo en El Manzano, ambas estaciones dependientes de





**Figura 13**

Promedio histórico de precipitaciones, caudal y temperatura, 1990-2020. Fuente: Elaboración propia a partir de datos DGA.

la Dirección General de Aguas. Destaca la temporalidad de caudales de origen marcadamente nival, desacoplándose de la acumulación de precipitación de los meses de invierno. Este proceso se ve influido principalmente por el aumento de la temperatura a partir del mes de septiembre.

Como parte del análisis de la información hidroclimática en el área de estudio, se recopiló información proveniente de la red oficial de monitoreo de la Dirección General de Aguas existente en la cuenca

alta del río Maipo. Se puede destacar que no existe ninguna estación meteorológica en las subcuencas en estudio. Las estaciones relevantes para el área de estudio analizadas se presentan en la Tabla 1.

### 2.2.1. Tendencias observadas a escala anual y estacional

Como primer elemento de análisis, se calcularon las tasas de cambio para cada variable y estación, considerando su comportamiento anual y estacional

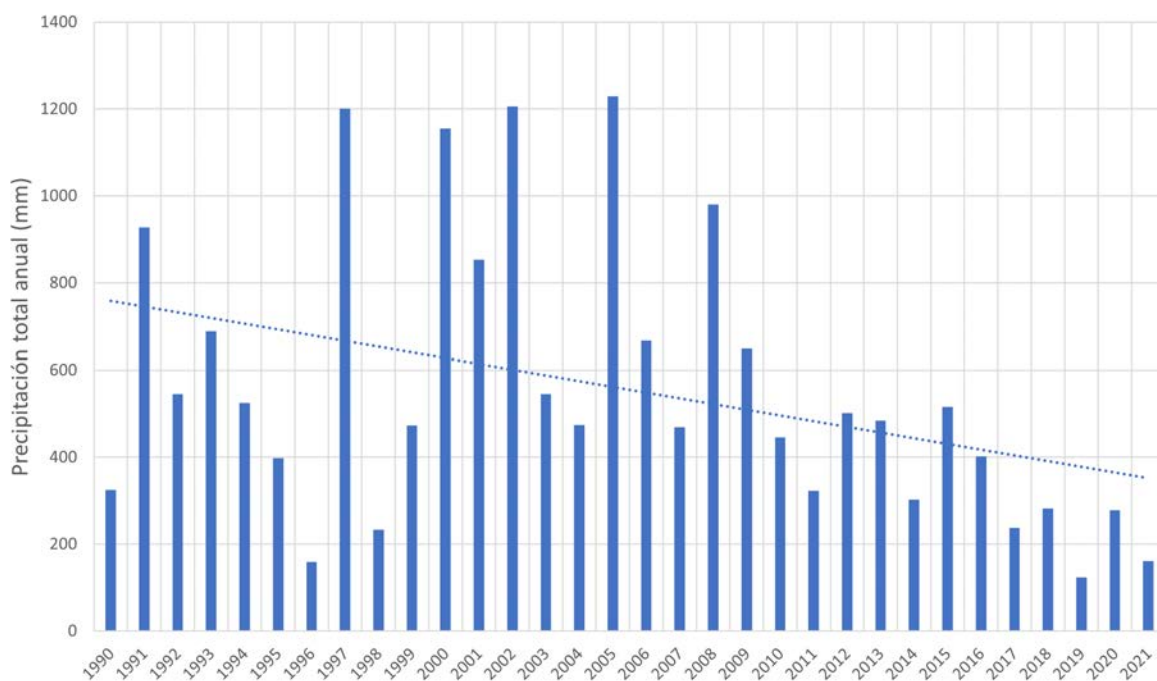
**Tabla 1.** Estaciones meteorológicas analizadas.

Estación	Código BNA	Variable	Fecha inicio	Fecha término	UTM-N	UTM-E
El Yeso Embalse	05703008-9	Precipitación	01/07/1963	Vigente	627325	39908
		Temperatura				
San Gabriel	05704004-1	Precipitación	01/12/1977	Vigente	626126	38524
San José de Maipo Retén	05704006-8	Precipitación	01/08/1971	Vigente	627733	37415









**Figura 14**

Evolución precipitación total anual para la estación el Yeso Embalse (DGA) para el período 1990-2020.

(otoño, invierno, primavera y verano) y de estación húmeda/seca. Cada una de estas tasas de cambio fue evaluada mediante el test de Mann-Kendall (Mann, 1945; Kendall, 1975), el cual permitió identificar aquellas tendencias de cambio estadísticamente significativas. Esto se realiza mediante la evaluación de los *p-values* de cada serie. Para que una serie presente una tendencia determinada de manera estadísticamente significativa, se requiere de un *p-value* igual o inferior a 0,05, rechazándose así la hipótesis nula (no existe tendencia significativa). En cada caso que se cumpla la condición señalada para los *p-value*, se presenta la tendencia asociada a la serie.

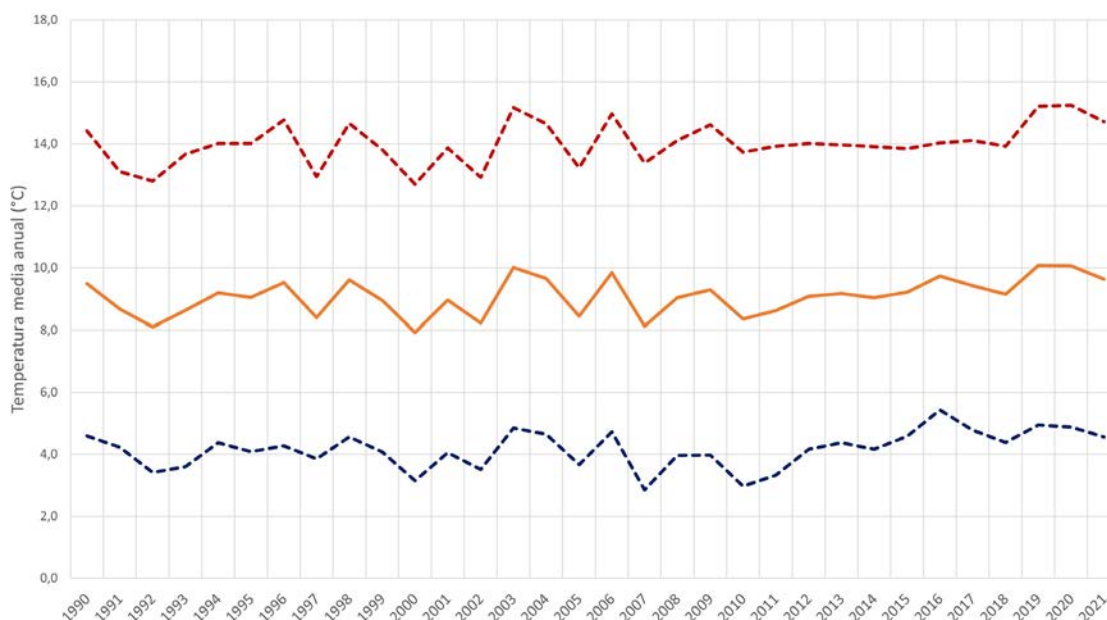
### Precipitaciones

Para el caso de las precipitaciones, se aprecia que en todas las estaciones la tendencia decreciente es estadísticamente significativa y representa una reducción importante de las precipitaciones al considerar el período completo 1990-2020, con tasas de reducción promedio cercanas a los 10 mm/año. La Figura 14 muestra la marcada reducción en los años recientes, asociadas a un extenso período de sequía que afecta a Chile central a partir del inicio de la década del 2010.

También se realizó una estimación de las precipitaciones en la zona de estudio a partir de los productos de precipitación de datos grillados disponibles en la plataforma

**Tabla 2.** Tendencias anuales precipitación para el período 1990-2020.

Estación	p-value	Tendencia (mm/año)
San Gabriel	0,030	-11,27
San José de Maipo Retén	0,025	-12,65
El Yeso Embalse	0,048	-6,62



**Figura 15**

Evolución de la temperaturas medias y extremas promedio anual en la estación el Yeso Embalse (DGA) para el período 1990-2020.

Mawün del centro de Clima y Resiliencia (CR2)<sup>8</sup>. Los datos grillados (o a nivel de píxeles) corresponden a información de precipitaciones distribuida espacialmente en todo el territorio nacional, por lo que es posible conocer la precipitación local en las cuencas en estudio.

La plataforma Mawün cuenta con un conjunto de ocho productos de datos grillados. Se realizó una comparación de los estadígrafos de las series obtenidas de los datos grillados con las mediciones en la estación meteorológica El Yeso Embalse, a fin de elegir el producto que mejor representa las precipitaciones del área de estudio. Se utilizó la estación meteorológica El Yeso Embalse ya que es la estación con un registro extenso más cercana al área de estudio.

### Cobertura nival

Para definir la cobertura nival en la zona de estudio se utilizaron dos fuentes. La primera corresponde a los datos de la plataforma del Observatorio de Nieve Andes del CR2<sup>9</sup>. Esta plataforma entrega la cobertura de

nieve en la cuenca alta del río Maipo. Según lo anterior, estos datos permiten realizar un análisis a escala regional de la variación en la cobertura nival. Por otro lado, se obtuvieron las coberturas de nieve en las cuencas en estudio estimadas a partir del *Normalized Difference Snow Index* (NDSI). Este índice contrasta la reflectancia del espectro visible (verde) con el infrarrojo de onda corta (SWIR) y permite identificar sectores con cobertura nival, ya que la nieve es altamente reflectante del espectro visible mientras que absorbe la mayor parte de los infrarrojos de onda corta y cercanos.

Los cálculos de NDSI las cuencas en estudio se realizaron mediante la plataforma Google Earth Engine. Se utilizaron imágenes satelitales Sentinel 2 con 20 metros de tamaño de píxel. Se definió un filtro que permitió eliminar las imágenes con una cobertura de nubes mayor a 10%. Este filtro permite descartar imágenes satelitales en que las nubes tapan la vista de la zona de estudio. Como criterio de corte para definir una celda cubierta por nieve se utilizó un valor de NDSI umbral igual a 0,1.

### Temperatura

Para el caso de la temperatura, la evolución reciente de esta variable muestra en general tendencias

<sup>8</sup> <https://www.cr2.cl/mawun-explorador-de-precipitaciones/>

<sup>9</sup> <https://www.cr2.cl/tag/observatorio-andino/>





al alza pero que, para el período evaluado, no es estadísticamente significativas en la estación El Yeso Embalse. La tendencia de cambio para el período 1990 – 2020 presenta un *p-value* de 0,163, por lo que no es posible declararla como significativa para un 95% de confianza estadística.

### 2.3. Caracterización de suelos

Como parte de los estudios de caracterización, con la colaboración del equipo de la Facultad de Ciencias Agronómicas de la Universidad de Chile, se realizaron dos calicatas en una zona con alto grado de acumulación de materia orgánica con un importante grado de descomposición, una condición común de esta sección de la vega Casa Piedra. Los resultados de estas actividades están detallados en el Anexo 1.

La primera calicata se estableció en el punto medio de un avanico aluvial con influencia coluvial lateral en un plano de inclinación con pendiente inferior al 2% y pequeñas ondulaciones, producto de las micro redes de drenaje natural. La segunda calicata se establece en una zona que comparte las características de la calicata 1, sin embargo, presenta un suelo más saturado y con un mayor grado de descomposición de la materia orgánica (Figura 11).

### 2.4. Estimación de almacenamiento de agua

Se realizó una estimación del agua subterránea almacenada en el abanico aluvial a partir de los registros de altura de los suelos saturados de agua derivada de los niveles de los pozos. Se consideró la variación entre el nivel de agua más bajo y el más alto observados. Adicionalmente, el acuífero saturado fue discretizado por los intervalos entre pozos, se calculó el área de los depósitos para cada estrato y se multiplicó por la profundidad del suelo saturado de agua utilizando la pendiente del nivel de agua como referencia.

Se estimó el rango de capacidad de almacenamiento asumiendo una porosidad media del suelo del 40%, que es típica de los depósitos aluviales, y una porosidad derivada de las muestras de suelo a lo largo del transecto.



# 3. RESULTADOS





A continuación, se exponen los principales resultados obtenidos a partir de las campañas de monitoreo implementadas en la zona de estudio para el período 2014-2022 para las cuencas pareadas de Casa Piedra y Aparejo, así como del análisis de datos desde fuentes complementarias.

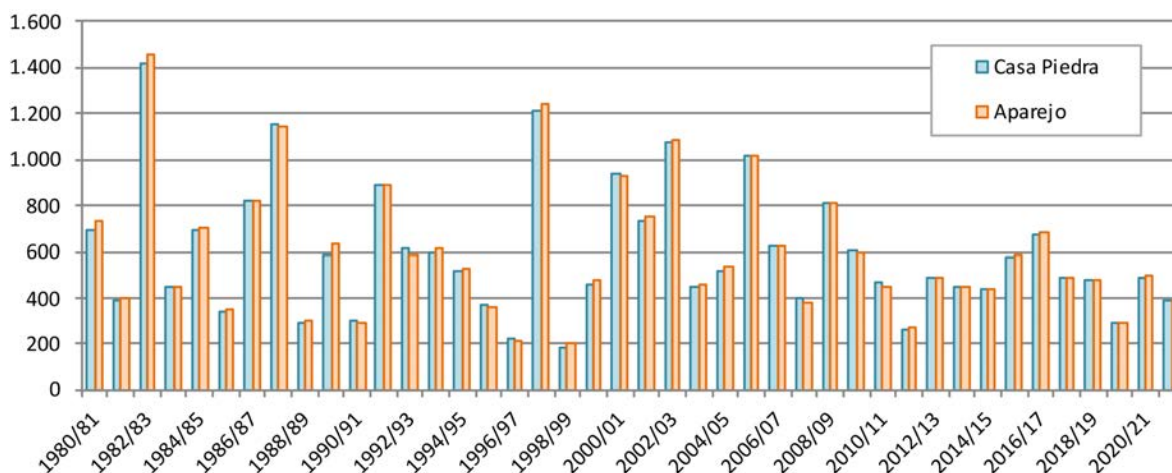
### 3.1. Precipitaciones en la zona de estudio

Como se mencionó en la metodología, se realizó una estimación de las precipitaciones en la zona de estudio a partir de los productos de precipitación de datos grillados disponibles en la plataforma Mawün del centro de Clima y Resiliencia (CR2)<sup>10</sup>. Los estadígrafos de las series de precipitación se presentan en la Tabla 3.

**Tabla 3.** Comparación de estadígrafos de productos grillados con la estación El Yeso Embalse (período 1980/81 a 2021/22).

Estadígrafo	Estación El Yeso Embalse	CR2MET_v2	CR2MET_v2.5	ERA5	ERA5_Land	CHIRPS_v2	MSWEP_v2.8	MSWX_v1	MSWX_v1
Años con información	41	41	41	42	41	41	<b>42</b>	42	24
Promedio (mm/año)	597	852	1029	1231	1330	553	<b>570</b>	564	991
Mín. (mm/año)	116	338	403	596	647	326	<b>197</b>	265	199
Máx. (mm/año)	1514	1992	2218	2533	2699	884	<b>1405</b>	1124	1883
Desviación est. (mm/año)	364	385	428	437	503	185	<b>287</b>	199	596
Tendencia (mm/año)	-9	-12	-13	-14	-15	-4	<b>-6</b>	-7	-19
R2 serie mensual (-)	1,00	0,85	0,85	0,82	0,81	0,67	<b>94</b>	0,79	0,01

<sup>10</sup> <https://www.cr2.cl/mawun-explorador-de-precipitaciones/>



**Figura 16**

Series de precipitaciones anuales modeladas en las cuencas en estudio para el período 1980/81 a 2021/22.

El mejor ajuste del promedio, precipitación mínima anual, máxima anual y coeficiente de correlación ( $R^2$ ) de los datos de la estación se obtiene con el producto MSWEPv2.8. Por otro lado, la tendencia y la desviación estándar del producto MSWEPv2.8 son similares a los obtenidos en la estación. Considerando lo anterior, se escogieron los datos del producto MSWEPv2.8 para obtener las series de precipitaciones locales en las cuencas en estudio (definidas en el centroide de las cuencas). Estas series fueron corregidas por un aumento de aproximadamente 5 %, que permite corregir el sesgo entre el promedio de la serie en la estación (597 mm/año) y el promedio de la serie del producto grillado (570 mm/año).

La Figura 16 muestra las series de precipitación anual estimadas en las cuencas de estudio. Los datos son consistentes con las series de precipitación en la estación El Yeso Embalse, que muestran una disminución marcada en las precipitaciones a partir del inicio de la década del 2010. Adicionalmente, se puede destacar que las menores precipitaciones de la actual sequía ocurrieron durante los años hidrológicos 2011/12 y 2019/20, mientras que las mayores precipitaciones ocurrieron durante los años hidrológicos 2015/16 y 2016/17. Finalmente, se puede señalar que las precipitaciones estimadas en Casa

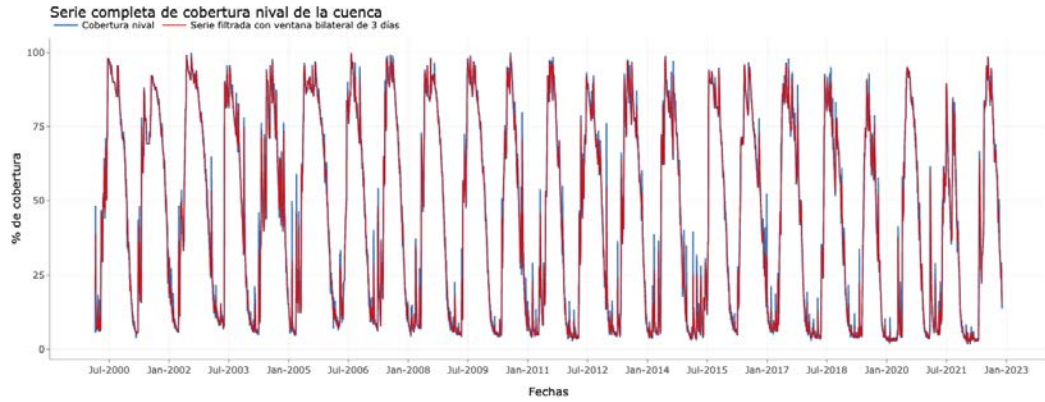
Piedra son prácticamente idénticas a las del sistema Aparejo, lo cual es esperable al usar datos grillados de este tipo.

### 3.2. Cobertura Nival

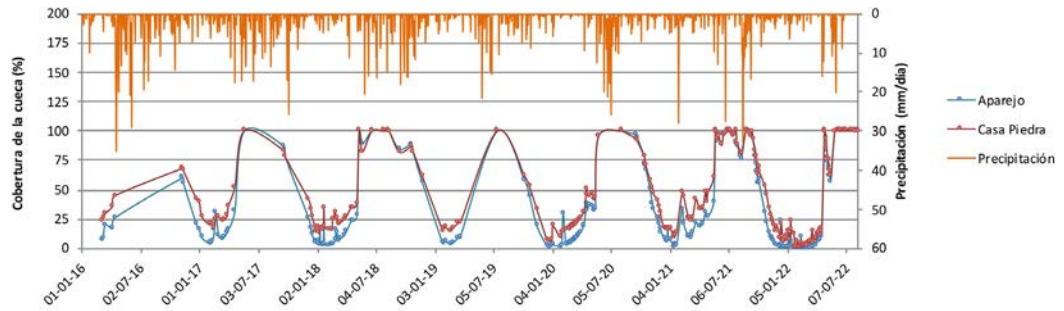
Al analizar la cobertura nival regional (ver Figura 17) de la cuenca alta del río Maipo, se aprecia un comportamiento que oscila entre una cobertura importante (mayor a 85 %) durante el invierno, llegando a valores bajos durante el verano. Así, ocurre un ciclo de cobertura durante el invierno seguido de un derretimiento registrado a partir de septiembre y diciembre, para dar paso a valores mínimos de cobertura durante el verano. Las coberturas de nieve en el área de estudio muestran un comportamiento similar al regional (ver Figura 18), con ciclos de cobertura prácticamente total durante el invierno seguidos de derretimientos. La cobertura mínima en el verano para la cuenca de Casa Piedra suele ser mayor que la de Aparejo. Esto es consistente con la mayor presencia de glaciares en la cuenca de Casa Piedra (ver Figura 10).

Finalmente, la Figura 19 muestra la cobertura nival y las precipitaciones en el área de estudio durante el año 2022. Se puede destacar que la precipitación

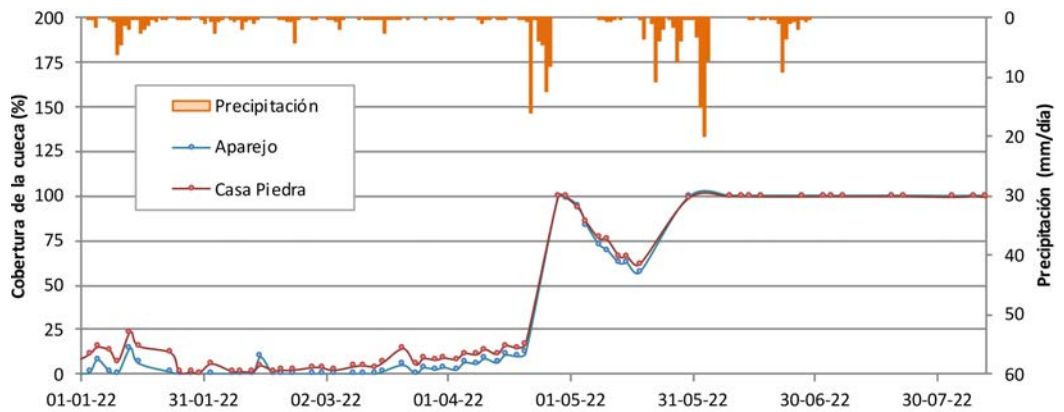




**Figura 17**  
Series de cobertura nival regional para el período 2000/2001 a 2021/22<sup>11</sup>.



**Figura 18**  
Series de cobertura nival y precipitación diaria en las cuencas en estudio para el período 2016 a 2022.

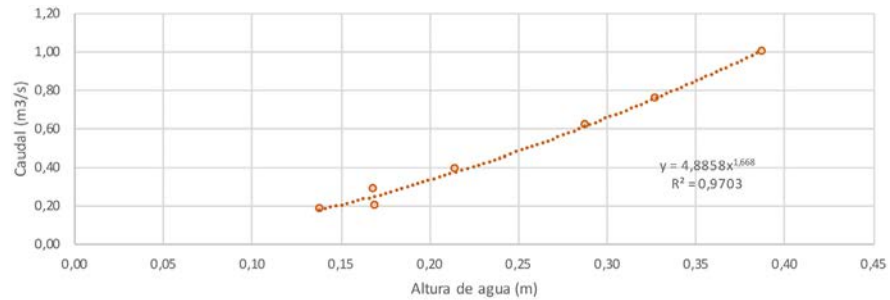


**Figura 19**  
Series de cobertura nival y precipitaciones diarias durante el año 2022<sup>12</sup>.

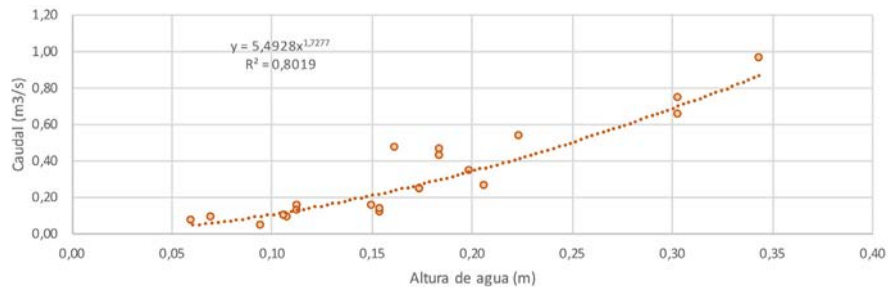
11 Fuente: *plataforma del Observatorio de Nieve Andes del CR2*.

12 Fuente: *plataforma del Observatorio de Nieve Andes del CR2*.  
<https://observatorioandino.com/nieve/>

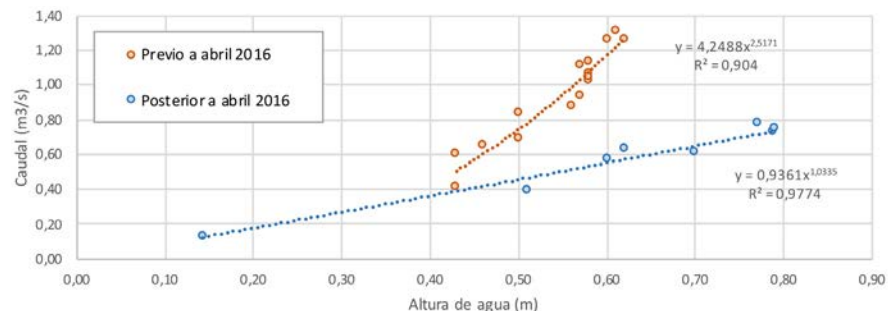
**Figura 20**  
Curvas de caudal contra altura en Aparejo.



**Figura 21**  
Curvas de caudal contra altura en sección 2 de Casa Piedra.



**Figura 22**  
Curvas de caudal contra altura en sección 1 de Casa Piedra.



caída en abril genera un aumento de la cobertura y un posterior derretimiento, el cual dura hasta mediados de mayo. Posteriormente, ocurrieron nuevos eventos de precipitación que cubren la cuenca hasta agosto de 2022.

### 3.3. Curvas de caudal contra altura

Las curvas de caudal contra altura permiten relacionar el nivel o altura de agua desde el cauce de un río, con su caudal. Esta relación se obtiene mediante

aforos de caudal y la sección transversal en un punto de medición en el cauce. Con esta relación es posible obtener datos de caudal a partir de los registros de altura de agua obtenidos por un sensor.

Se definieron las curvas de caudales contra altura en los tres puntos de aforo considerados (curva de gastos). Las curvas se presentan en la Figura 19 a la Figura 21 y se obtuvieron a partir de los aforos realizados en terreno a contar del año 2014. La curva del arroyo de Aparejo muestra un buen ajuste entre las dos variables (Figura 20), ya que la sección cumple con las condiciones





**Figura 23**

Cambio en aportes provenientes desde la parte alta de la cuenca.

ideales para poder realizar los aforos (cauce bien definido, con suficiente profundidad y recto).

El ajuste en la sección 2 de Casa Piedra (Figura 21) muestra una curva de gastos con una mayor dispersión en los datos. Lo anterior puede explicarse ya que la sección de aforo presenta un caudal con baja altura y que fluye a escasa velocidad. Así, los aforos de esta sección se ven dificultados por la presencia de turbulencia en los bajos flujos de caudal.

Finalmente, el ajuste de la sección 1 de Casa Piedra (ver Figura 22) muestra una situación particular, en la cual habría dos comportamientos distintos. La primera curva es representativa del período previo a abril de 2016, mientras que la segunda curva es válida para el período posterior a esta fecha. Durante el mes de abril de 2016 ocurrieron precipitaciones de 190 mm, sobrepasando el valor medio de las precipitaciones de abril (38 mm). Debido a que abril es un mes más cálido, las altas precipitaciones ocurridas durante ese mes produjeron episodios de avalanchas y movimientos de suelo que embancaron la sección 1, produciendo un cambio de forma que se ve reflejado en su curva de gastos.

Adicionalmente, se produjo un cambio en los aportes superficiales que provienen desde la parte

alta de la cuenca durante los meses de deshielo. El aporte desde aguas arriba presenta una dinámica cambiante. Luego de las precipitaciones de abril de 2016 el cauce superficial de la parte alta dejó de aportar hacia la sección 1 (ver Figura 23).

A partir de las fotografías captadas con las cámaras trampa fue posible capturar parte de la dinámica aluvional en la parte alta del cono aluvional de Casa Piedra, según se muestra en la Figura 24. Se observa que este cauce sufre transformaciones importantes, pudiendo llegar a modificarse completamente durante una crecida.

### 3.4. Dinámica de congelamiento y derretimiento de nieve

Los registros en las cámaras trampa permitieron constatar la ocurrencia de ciclos de congelamiento parcial y derretimiento del cauce en el sector de Aparejo (ver Figura 25). Se observa en los registros obtenidos que el cauce de Aparejo se mantiene parcialmente congelados durante semanas.

El congelamiento parcial del cauce produce una disminución en la sección de paso de las aguas. Considerando que para estimar las series de caudales se

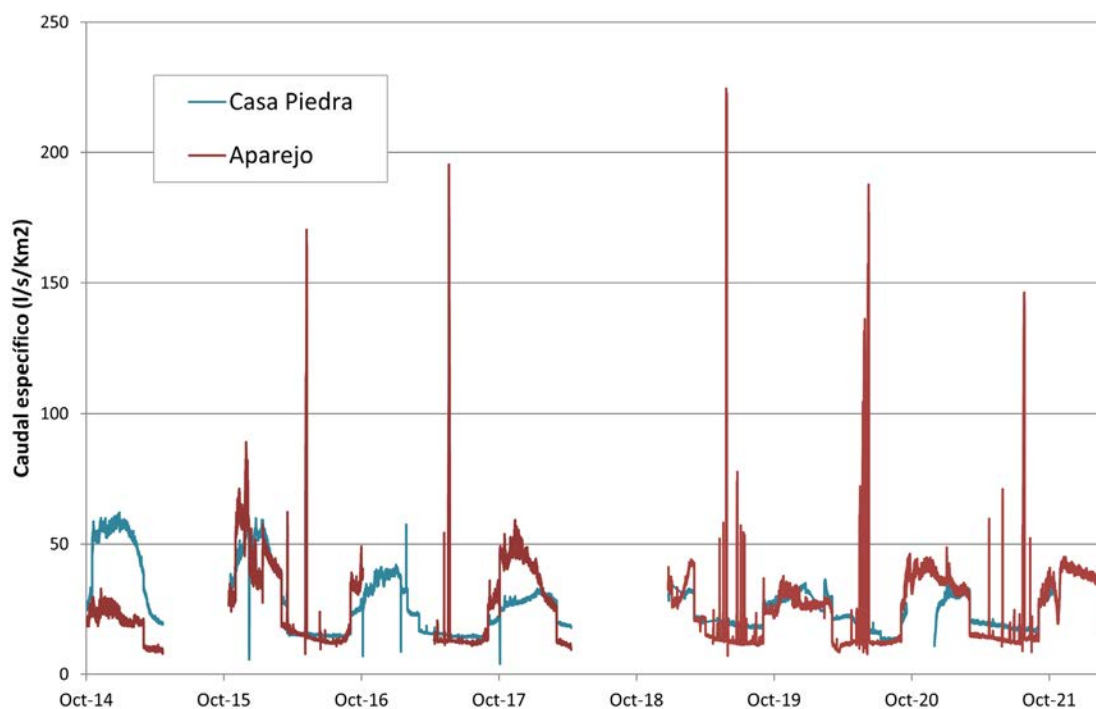


**Figura 24**  
Paso de un aluvión durante febrero de 2017, captado por las cámaras trampa en el la parte superior del abanico aluvial de Casa Piedra.





**Figura 25**  
Dinámica de  
congelamiento parcial y  
derretimiento del cauce del  
sector de Aparejo.



**Figura 26**

Caudales específicos de las cuencas de Aparejo y Casa Piedra (l/s por km<sup>2</sup>).

tiene que asumir la forma de la sección de paso (ya que la medición disponible es la altura de agua en la sección), es necesario corregir los datos de caudales durante los meses fríos (mayo a septiembre). Para realizar esta corrección se ha considerado que la formación de hielo produce una reducción de 25 a 50% en el área disponible para el escurrimiento del flujo base (este valor fue calibrado en cada cauce con los aforos disponibles). En este reporte se ha optado por la utilización de un criterio simple para representar un fenómeno complejo y dinámico, sin embargo, es posible investigar de forma más detallada el impacto real del congelamiento parcial de los cauces sobre los caudales en los cauces alto andinos.

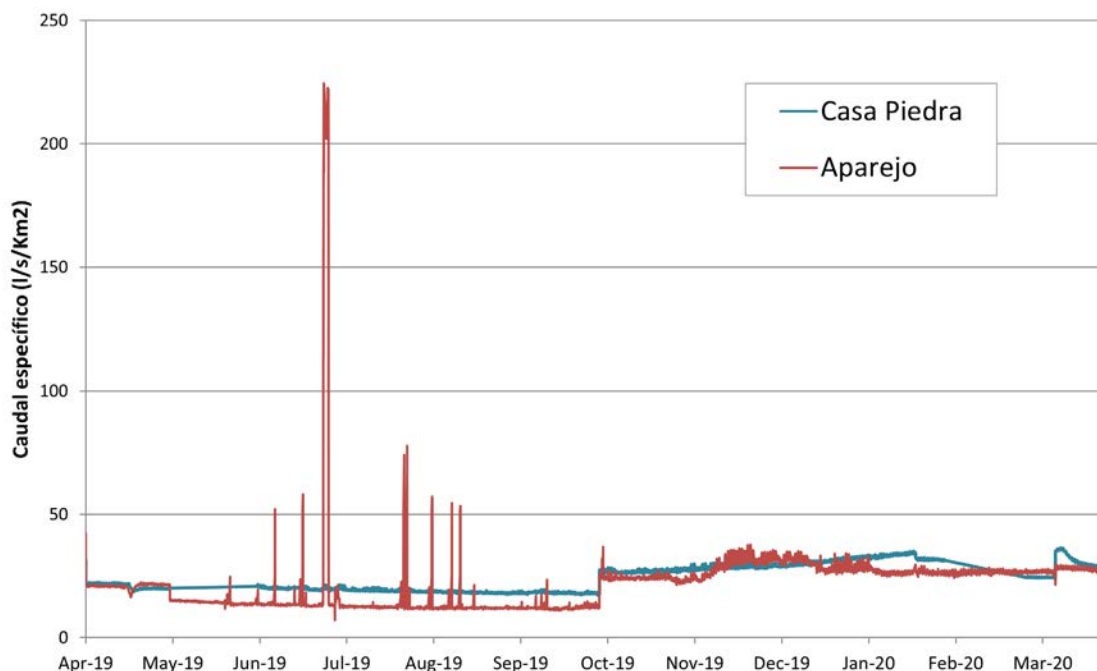
### 3.5. Series de caudales

A continuación, se presenta un análisis de las series de caudales específicos para las cuencas de Casa Piedra (sección 1 más sección 2) y de Aparejo. Los

caudales se estimaron a partir de las curvas de caudal contra altura presentadas en el capítulo 3.3, los registros de altura de agua recopilados en terreno mediante los sensores de presión, las correcciones del sensor y las mediciones de la forma de los cauces obtenidas durante las campañas de aforo. Adicionalmente, se consideró una corrección simplificada para considerar el congelamiento parcial de los cauces, según se explicó anteriormente.

La Figura 26 muestra los caudales específicos (l/s por km<sup>2</sup>) para las dos cuencas en estudio. Los caudales específicos medios en ambas cuencas son similares entre sí (promedio de 26,2 contra 25,9 l/s/km<sup>2</sup>). Sin embargo, los registros del sector de Aparejo muestran la ocurrencia de numerosos eventos de crecidas, llegando incluso a superar los 200 l/s/km<sup>2</sup>. Así, el humedal presente en Casa Piedra, junto con el sistema acuífero que lo soporta, es capaz de reducir de forma considerable los caudales máximos generados, produciendo escorrentías que





**Figura 27**  
Caudales específicos de las cuencas de Aparejo y Casa Piedra (l/s por km<sup>2</sup>), año hidrológico 2019/20.

son más constantes. Adicionalmente, se observa una coincidencia en los flujos base, junto con la ocurrencia del deshielo en el verano, que caracteriza los caudales de la parte alta de la cuenca del Maipo.

En la Figura 27 se muestra un detalle de los caudales específicos (l/s por km<sup>2</sup>) para el año hidrológico 2019/20. Este detalle permite mostrar de forma más clara el efecto del sistema acuífero-humedal en los caudales específicos máximos. Se realizó una cuantificación del número eventos puntuales de crecidas ocurridos en Aparejo, que no se ven asociados a una crecida en Casa Piedra. El sistema acuífero humedal de Casa Piedra evitó en promedio, 1,4 crecidas puntuales mayores a 100 l/s/km<sup>2</sup> por año. De esta forma el sistema acuífero-humedal de Casa Piedra provee un servicio ecosistémico de regulación hídrica y control de crecidas, reduciendo adicionalmente el arrastre de sedimentos debido al control de los caudales máximos.

La Tabla 4 hace una comparación de la precipitación, con el caudal medio durante el período de des-

hielo de cada año (período de noviembre a marzo) y la altura máxima del nivel freático en el acuífero de Casa Piedra (Pozo P7). Se puede observar que existe una coincidencia entre los años con mayores precipitaciones con los niveles freáticos (ver año 2016/17). Esta consistencia también se observa en los caudales medios de la cuenca de Aparejo, en la cual se registran mayores caudales de deshielo durante los años con mayores precipitaciones y menores caudales durante los años menores precipitaciones (ver Figura 28).

Los caudales en Casa Piedra muestran un comportamiento atípico. Los mayores caudales de deshielo se registraron previos al fenómeno aluvional ocurrido durante abril de 2016, el cual modificó el perfil del cauce y los aportes provenientes desde el deshielo de la parte alta de la cuenca en la sección I del sector de Casa Piedra (ver capítulo 3.3). Luego del evento aluvional (a partir del año hidrológico 2016/17 en adelante), los caudales de deshielo

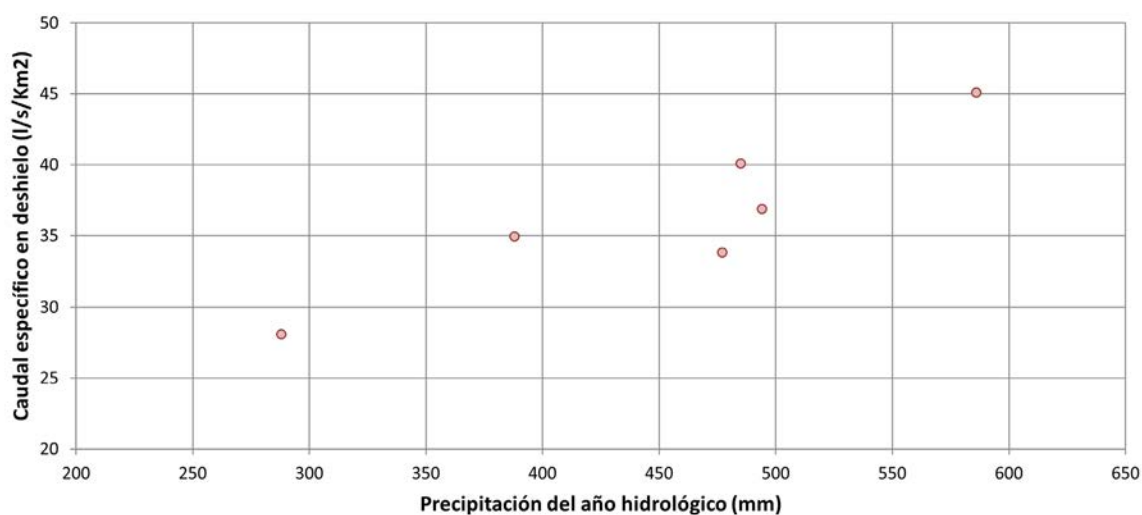
**Tabla 4.** Comparación de precipitación, caudal medio de deshielo y altura máxima del nivel freático.

Año hidrológico	Precipitación (mm)	Nivel máximo Acuífero en P7 (msnm)	Caudal medio de deshielo Casa Piedra (l/s/km <sup>2</sup> )	Caudal medio de deshielo Aparejo (l/s/km <sup>2</sup> )
2015/16	583	-	47	45
2016/17	677	2585,3	33	-
2017/18	485	2583,5	29	40
2018/19	477	2583,3	32	34
2019/20	288	2581,1	30	28
2020/21	494	2583,0	-	37
2021/22	388	2581,6	32	35

muestran una marcada estabilidad (ver Tabla 4), con valores en torno a 29 y 33 l/s/km<sup>2</sup>. Los caudales aforados en Casa Piedra a partir del año hidrológico 2016/17, tendrían una mayor componente de flujo base debido al efecto del aluvión. La componente de flujo base es mucho más estable, ya que los caudales

afloran desde las aguas subterráneas presentes en el acuífero de Casa Piedra.

Se puede comentar que el sector de Aparejo carece de un sistema acuífero-humedal importante en el punto de salida de la cuenca. Según lo anterior, los caudales en Aparejo muestran una mayor



**Figura 28**  
Caudales específicos medios durante el período de deshielo en Aparejo (l/s por km<sup>2</sup>) contra la precipitación del año hidrológico (mm).





correlación con las precipitaciones y un menor efecto de regulación.

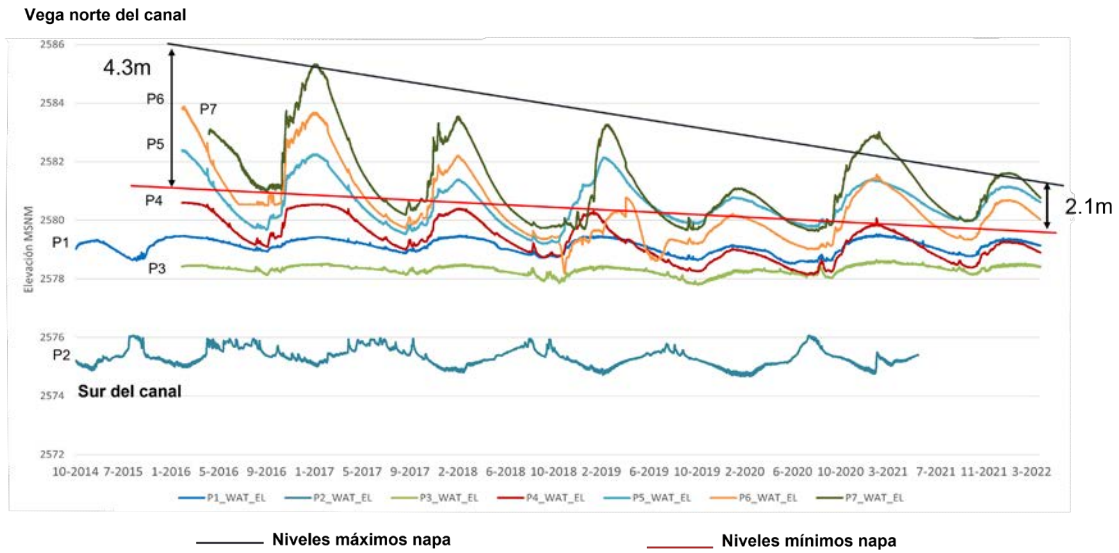
Finalmente, es posible destacar que el efecto de regulación en Casa Piedra se refleja en un caudal base invernal superior al de Aparejo durante los años de menores precipitaciones. Al revisar los caudales específicos en ambas cuencas (ver Figura 26) se observa que, durante los años hidrológicos 2016/17 y 2017/18, los flujos base invernales son prácticamente idénticos en ambas cuencas. Por otro lado, durante los años hidrológicos 2019/20 y 2021/22 en que se registraron menores precipitaciones, se observa que el flujo base de Casa Piedra es mayor que el de Aparejo. En otras palabras, debido al efecto regulador del sistema acuífero-humedal de Casa Piedra, los caudales invernales durante los años con menores precipitaciones son mayores que los registrados en Aparejo. Este efecto puede ser importante para el abastecimiento de los usuarios y los ecosistemas ubicados hacia aguas abajo (Halloy, 1984; Meses *et al.* 2019).

### 3.6. Monitoreo de Agua Subterránea en Humedal Casa Piedra

A continuación, se presentan los resultados del análisis de la dinámica de almacenamiento de agua subterránea en el humedal de Casa Piedra. La dificultad de instalación en terreno, entre otras condiciones, impidieron replicar el seguimiento de las aguas subterráneas en el sector de Aparejo.

La topografía del terreno a lo largo del transecto longitudinal en Casa Piedra tiene un gradiente constante del 2%, con presencia de depósitos no compactados típicos de los abanicos aluviales, los cuales presentan alta porosidad. En los sectores de menor elevación se observan suelos orgánicos de grano fino saturados, cubiertos con vegetación del humedal, cambiando a depósitos más gruesos y mineralizados cubiertos con arbustos o sin vegetación en las elevaciones más altas a lo largo del abanico aluvial.

Los niveles del agua subterránea en el abanico aluvial de Casa Piedra (desde la superficie hasta los 8 m de profundidad) siguen un patrón monotónico estacional, que se acopla con los patrones climáticos



**Figura 29**  
 Serie temporal del nivel de la Napa freática a lo largo del transecto longitudinal Humedal Casa Piedra 2016-2022.

de precipitación. Los menores niveles se observan desde finales de agosto hasta mediados de septiembre, mientras que los niveles máximos de agua subterránea ocurren desde finales de enero hasta mediados de febrero, en todos los pozos de prueba instalados a lo largo del transecto longitudinal. El período medio de recarga observado es de 121 días (59-159), mientras que el período medio de descarga es de 242 días (202-330), siendo la excepción el año 2019, que tuvo un invierno extremadamente seco junto con una recarga retrasada, que sólo duró 59 días (Figura 29).

La recarga se compensa con los patrones de precipitación de la región en un par de meses, la Tabla 3 muestra una clara relación entre el ascenso del nivel freático y las precipitaciones anuales. A pesar de que la temporada de lluvias comienza en mayo y dura hasta septiembre, todos los pozos de prueba a lo largo del transecto longitudinal muestran el mismo patrón temporal, con los niveles de agua más bajos observados a finales del invierno (finales de agosto-principios de septiembre) y el nivel más

alto durante los meses de verano (finales de enero a principios de febrero) con tasas de cambio de nivel de agua (almacenamiento y agotamiento) siendo más pronunciadas en los pozos de mayor elevación en la parte superior del transecto. Este comportamiento evidencia la naturaleza nivo-glaciar de la respuesta hidrológica de estos sistemas, así como el efecto regulador del componente subterráneo sobre los caudales superficiales observados a la salida de la subcuenca.

Las tasas de recarga son más altas desde finales de octubre hasta mediados de diciembre tras el deshielo invernal, y las tasas de descarga son más altas desde finales de enero hasta mediados de abril. La recarga del abanico aluvial comienza en las elevaciones más bajas a mediados-finales de septiembre, mientras que la parte superior del abanico aluvial sólo comienza a recargarse a mediados de octubre, mostrando un retraso de dos a tres semanas en la respuesta de recarga. El pozo más alto tiene el mayor retraso que varía de tres a cuatro semanas en comparación con los pozos más bajos, siendo la excepción



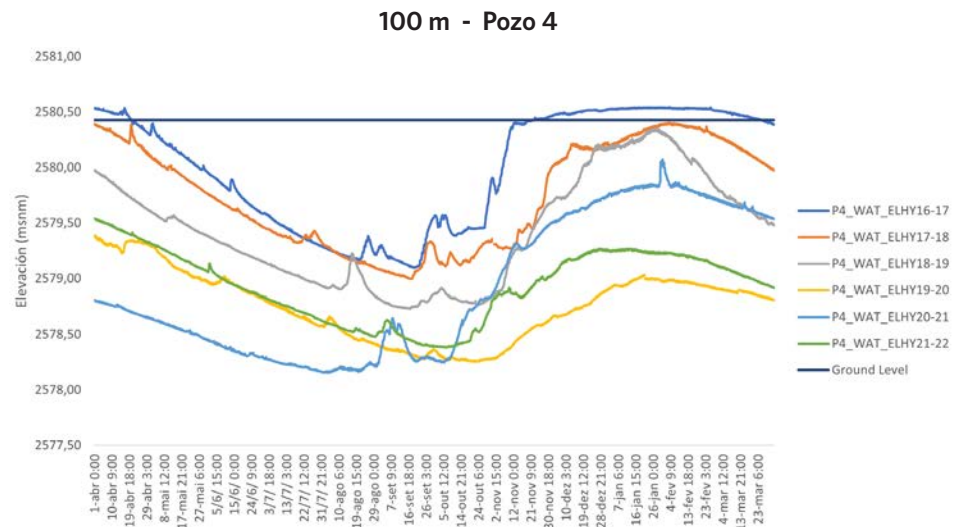
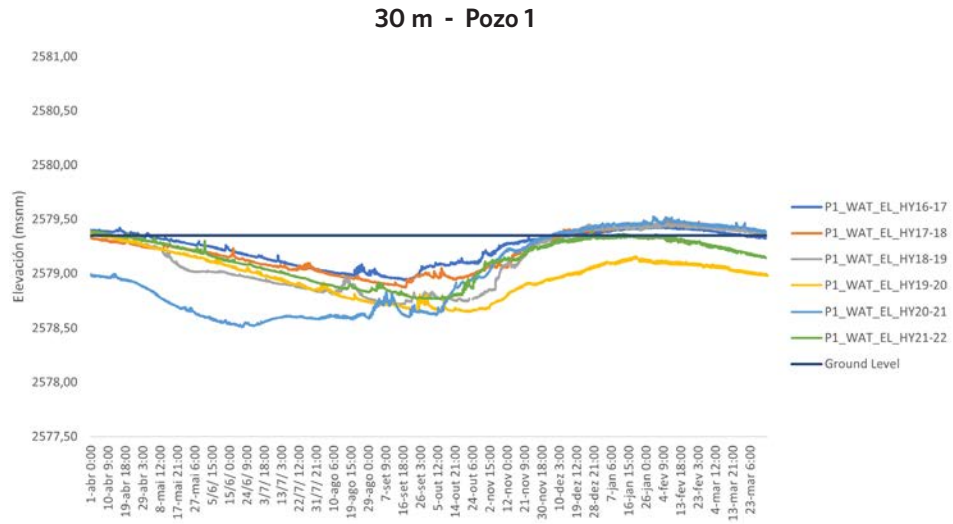
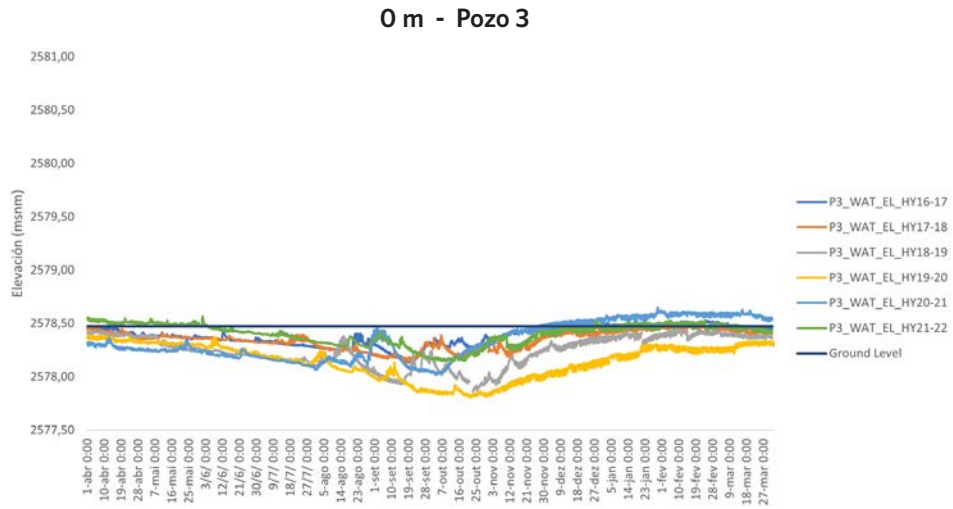


el año hidrológico 2016/17 que tuvo un invierno muy húmedo y la recarga comenzó antes. Ese fenómeno está posiblemente asociado a la presencia de suelos de la vega con depósito de textura muy fina con mucha materia orgánica que produce la retención del agua nueva aportante del deshielo en zonas bajas del abanico. Ese efecto produce una acumulación del agua que rellena el abanico aluvial de zonas bajas hacia la parte alta del abanico aluvial.

El nivel de agua en el pozo de menor elevación (CPP3) en el transecto varió de 0,36 a 0,63 m por debajo del nivel del suelo entre los años hidrológicos de 2016/17 a 2021/22, mientras que el nivel más bajo en el pozo en la parte superior del transecto (CPP7) varió de 2,13 a 4,34 m durante el mismo período. La amplitud máxima de los cambios de nivel de agua varió de 0,84 a 1,01 m para los pozos de la parte inferior del humedal, de 2,4-2,45 m para los pozos intermedios y de 5,7 m para los pozos más altos. El nivel mínimo observado en el CPP3 fue de 2577,81 msnm, mientras que el CPP7 tuvo un nivel mínimo de 2579,64 msnm.

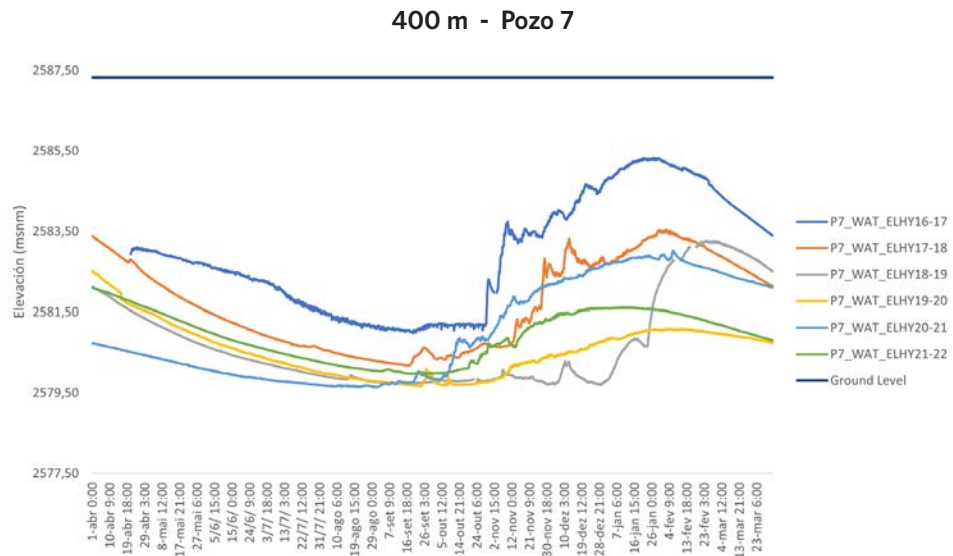
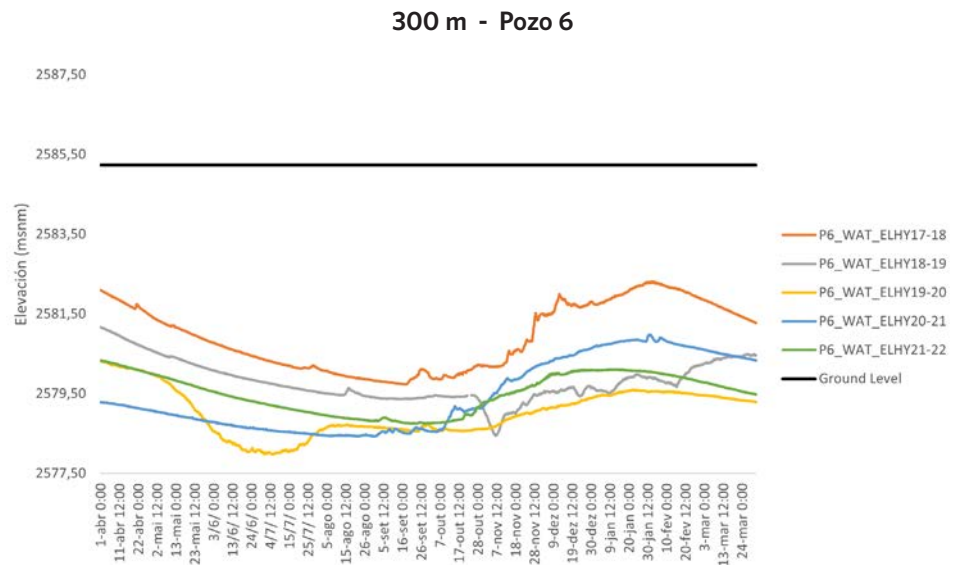
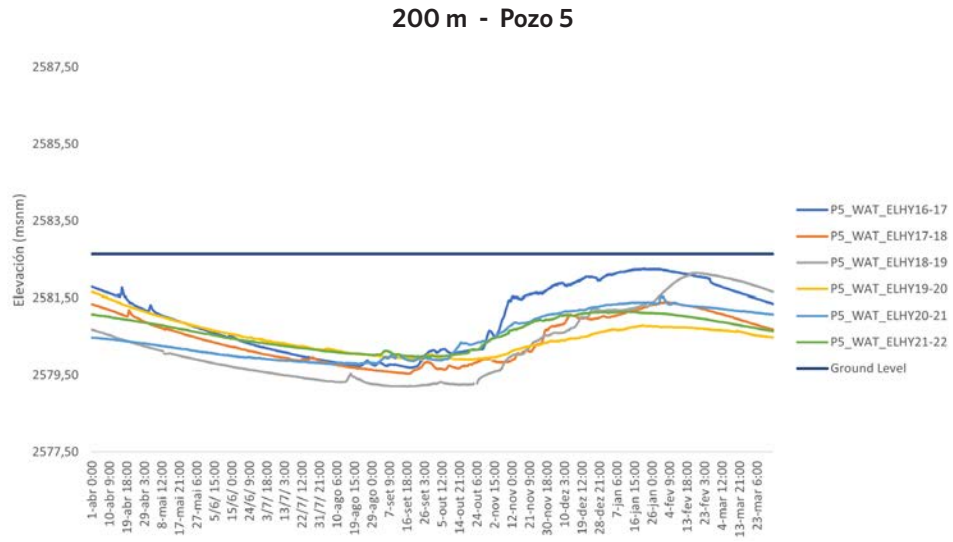
La pendiente media del nivel del agua a través del transecto durante el período de nivel bajo (agosto-septiembre) fue del 0,46% (rango de 0,38 a 0,51%) y del 1,09% (rango de 0,86 a 1,25%) para el período de nivel alto (enero-febrero). Los niveles bajos de agua interanuales para la mayoría de los pozos de prueba se mantuvieron relativamente estables entre 2016 y 2022 a pesar de la prolongada sequía, sin embargo, los niveles máximos variaron sustancialmente, especialmente en el CPP7 (parte superior del abanico aluvial) cambiando de 2585,33 msnm en 2016/17 a 2582,10 msnm en 2021/22, una disminución de 3,22 m en la altura del nivel freático máximo entre los años más húmedos y los más secos.

El comportamiento de los niveles exhibido por el pozo CPP4 resulta ser particular. El ascenso observado para el año hidrológico 2016/17 se encuentra limitado o amortiguado por un *buffer* a una altura aproximada de 2580,5 msnm. Este comportamiento puede explicarse debido a que en sector del pozo 4 ocurren los afloramientos principales del agua subterránea y por tanto, el caudal sale del acuífero para alimentar los numerosos cauces presentes en



**Figura 30**  
Series temporales de niveles de la napa freática A y B.





**Figura 30**  
Series temporales de niveles de la napa freática A y B.

el humedal en vez de almacenarse en el acuífero y generar un ascenso en los niveles de las aguas subterráneas (ver Figura 30 A y B).

Como se señaló en la metodología, las estimaciones de almacenamiento de agua subterránea en el abanico aluvial entre el nivel de agua más bajo y el más alto observados se calcularon utilizando la altura de los suelos saturados de agua derivada de los niveles de los pozos. Para estimar el volumen de suelo saturado se discretizaron los intervalos entre pozos, se calculó el área de los depósitos para cada estrato y se multiplicó por la profundidad del suelo saturado de agua utilizando la pendiente del nivel de agua como referencia.

Se estimó el rango de capacidad de almacenamiento asumiendo una porosidad media del suelo del 40%, que es típica de los depósitos aluviales, y una porosidad derivada de las muestras de suelo a lo largo del transecto, siendo una estimación más conservadora que lo obtenido de las calicatas realizadas (Anexo 1). La variación del almacenamiento anual de aguas subterráneas calculado para el período entre 2016/2017 y 2021/2022 fue de 114.000 m<sup>3</sup>, lo que representa 4.900 m<sup>3</sup>/ha por año hidrológico con el supuesto de una porosidad del 40%. El volumen de almacenamiento suponiendo el agotamiento completo de las aguas subterráneas almacenadas hasta el nivel de la corriente de salida, representa 534.000 m<sup>3</sup> por sobre las fluctuaciones anuales observadas, lo que suma un almacenamiento potencial total de 648.000 m<sup>3</sup> (28.000 m<sup>3</sup>/ha).

Para estimar la capacidad de almacenamiento de las aguas subterráneas con mayor precisión se necesitarían datos adicionales sobre las características de los depósitos de sedimentos o emplear métodos geofísicos que cuantifiquen los depósitos de aguas subterráneas del subsuelo.

El almacenamiento máximo se produjo a principios del verano, entre finales de diciembre y mediados de enero, lo que se reflejó en los caudales superficiales más elevados del mismo período, mostrando una sincronía entre las variaciones en el almacenamiento de aguas subterráneas y los caudales superficiales observados en la zona de descarga de la subcuenca.

Los niveles de las aguas subterráneas presentan una variabilidad importante en la fecha en que comienzan los ascensos, que se encuentra vinculado principalmente con el comienzo del derretimiento de la nieve en la cuenca que alimenta al humedal. En la Figura 30 es posible destacar que para el año hidrológico 2016/17 el ascenso ocurre antes que para el año 2017/18. Por otro lado, el año hidrológico 2020/21 presenta el ascenso significativo que ocurre en la fecha más temprana para los datos disponibles.

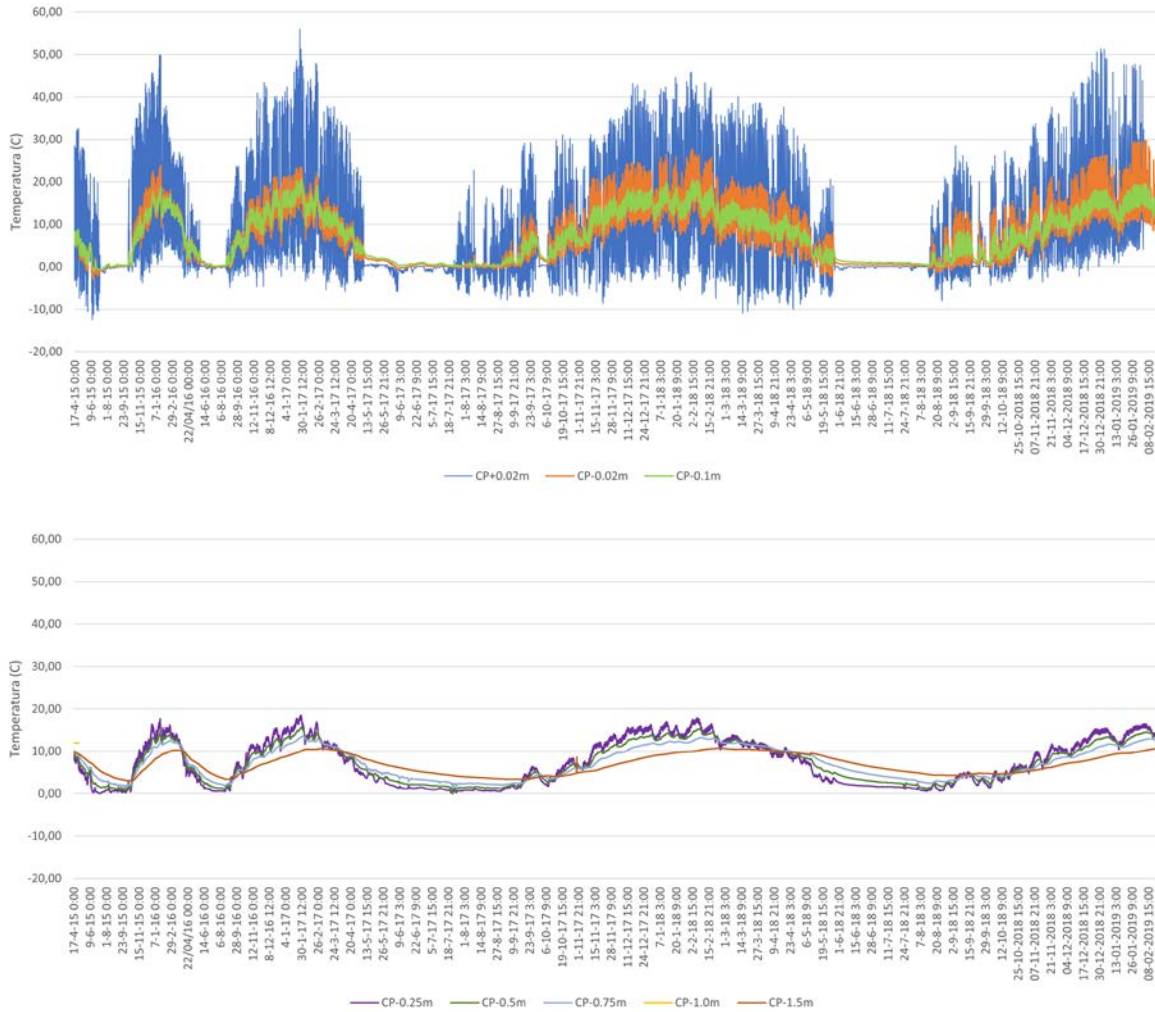
Finalmente, y en relación al rol de la cobertura nival en la temporalidad de la temporada de deshielo, se determinó la nubosidad promedio en la estación de Quinta Normal, ubicada en la ciudad de Santiago. Se estimaron valores de 2,4, 2,9 y 1,6 octa durante el período de septiembre a diciembre para los años hidrológicos 2016/2017, 2017/2018 y 2020/2021, respectivamente. Según lo anterior, una medida aproximada de la nubosidad en el área de estudio muestra una consistencia con la fecha en que comienzan los ascensos. En otras palabras, la mayor nubosidad media durante el período de deshielo, retarda el comienzo del derretimiento y el posterior ascenso en los niveles de las aguas subterráneas.

### 3.7. Análisis de Temperatura del Suelo

La temperatura del suelo se registró en un perfil vertical en el sitio Casa Piedra utilizando sensores de temperatura (Hobo) a siete profundidades del suelo más una por encima del suelo cerca de la superficie. Se consideraron las profundidades de +2 cm (2 cm sobre la superficie), -2 cm, -10 cm, -25 cm, -50 cm, -75 cm, -1 m y -1,5 m, en intervalos de 3 horas, considerando el periodo desde abril de 2015 hasta febrero de 2019. Las temperaturas por encima de la superficie fueron las que más variaron siguiendo un patrón estacional monótono, con mínimas de invierno que variaron entre -8 y -13 grados centígrados, y máximas de verano que variaron entre 50 y 56 grados centígrados, como se muestra en la Figura 31

Las temperaturas por debajo de la superficie varían estacionalmente siendo los estratos de suelo poco profundos (-2 cm a -10 cm) son los que más varían





**Figura 31**  
Comportamiento térmico azonal del perfil vertical de suelo en Casa Piedra.

siguiendo las variaciones diarias de la superficie. La temperatura máxima en verano para el estrato de -2 cm fue de 30 grados y de 25 grados para el estrato de -10 cm. Los estratos más profundos mostraron muy poca variación diaria y sólo reflejaron el patrón estacional con amplitudes de variación más bajas, que oscilaron entre 1 y 18 grados, siendo el de -25 cm el que tuvo las mayores variaciones estacionales.

El suelo sólo se congeló por debajo de la superficie durante breves períodos, con un claro cambio temporal durante el período de registro. En 2015 las temperaturas estuvieron por debajo de la congelación a -2 cm de profundidad durante 79 días, 18

días en 2016, 10 días en 2017 y ninguno en 2018, y solo se produjo entre junio y agosto. Ninguno de los estratos más profundos del suelo se congeló nunca entre 2015 y 2018, lo que indica que no se produce una congelación dura del suelo y que este no pierde su capacidad de infiltración debido a la congelación. Este es un aspecto importante del patrón térmico del suelo y muestra que cuando se produce el derretimiento de la nieve el agua de deshielo se infiltrará en el suelo e iniciará el proceso de recarga de las aguas subterráneas.



## 4. CONCLUSIONES





El presente informe tuvo como objetivo reportar los hallazgos y primeros aprendizajes sobre la hidrología superficial y subterráneas de subcuencas de alta montaña ubicadas en la subcuenca del río Yeso, en la cuenca alta del río Maipo, en Chile central.

TNC Chile, junto a destacados equipos de investigación nacional, desarrolló una serie de campañas en terreno e implementó el monitoreo de distintas variables hidroclimáticas y ambientales en sistemas con presencia y ausencia de humedales altoandinos entre las temporadas de 2014/2015 y 2021/2022. Estas campañas, junto al registro continuo de sensores instalados en terreno, han permitido generar información valiosa para la mejor comprensión del funcionamiento y rol hidrológico de humedales alto-andinos y su aporte a la seguridad hídrica de sistemas dependientes de cuencas andinas.

Se cuantifica el efecto regulador de un humedal de altura, donde se demuestra que una cuenca con vegetación de humedal reduce los caudales máximos de crecidas y aumenta el flujo base mínimo durante las sequías, como también se reporta por primera vez en los Andes centrales un estudio hidrológico rigurosamente apareado para comparar cuencas con y sin vegetación. A continuación, se presentan los principales hallazgos y conclusiones de este estudio:

### **General / Área de estudio**

- > La acción glacial habría sido determinante en la existencia del humedal en el sector de Casa Piedra. Este presenta una formación geológica (morrena) en la salida de la cuenca, que se aprecia como una loma baja. Esta loma está compuesta por una combinación de morrena glacial con depósitos de avalanchas y es posible atribuirle un rol fundamental en la formación paulatina de humedal. Se puede teorizar que durante el desarrollo geológico de la parte baja de la cuenca de Casa Piedra, la presencia de la morrena dio paso a la formación de una turbera. Esta turbera a su vez fue generando el acuífero de Casa Piedra debido a la acumulación de material sedimentario.

### **Clima**

- > Para el caso de las precipitaciones en el área de estudio, se aprecia que en todas las estaciones ubicadas en la cuenca alta del río Maipo, la tendencia es estadísticamente significativa y representa una reducción importante de las precipitaciones al considerar el período completo 1990 y 2020, con tasas de reducción promedio cercanas a los 10 mm/año.



- > Desde el año 2010 la zona de estudio se encuentra bajo los efectos de una sequía extrema. Para la estación El Yeso Embalse (DGA), las menores precipitaciones del periodo ocurrieron durante los inviernos de los años 2019, y 2021, con déficit del 83% y 78% respectivamente respecto al promedio del periodo 1990-2020. Los años con mayor precipitación en la última década corresponden a 2012 y 2015, en donde igualmente se observó un 13% y un 11% de déficit respecto al promedio del mismo periodo.
- > A partir del análisis de productos grillados de precipitación, se estima que las precipitaciones en el sitio Casa Piedra son prácticamente idénticas a las del sector de Aparejo, por lo que, sumado a su similitud en área y orientación, sustenta que las diferencias en la respuesta de caudales se concentran en el sistema subterráneo y el tipo de cobertura en áreas bajas de cada sistema.
- > Se pudo corroborar la existencia de una relación entre la nubosidad media durante el período de deshielo con el comienzo de los deshielos y el subsecuente ascenso en los niveles de las aguas subterráneas del acuífero de Casa Piedra.

### **Aguas subterráneas**

- > A partir del análisis de registros de pozos del sector Casa Piedra, se calculó el almacenamiento de aguas subterráneas en el acuífero, estimándose que la mayor proporción de las aguas almacenadas corresponde a un volumen retenido, el cual es independiente de los ascensos y descenso anuales que se registran durante el período de deshielo. Este volumen sería la fuente del flujo base que se registra durante los meses invernales.
- > El volumen total de agua almacenada en el humedal Casa Piedra (40 ha) tendría una capacidad de almacenamiento potencial de 648.000 m<sup>3</sup>, considerando un valor de porosidad del suelo de



40%. Considerando un consumo por persona de 200 lts/día<sup>13</sup>, el agua almacenada en el humedal permitiría abastecer 8.877 personas abastecidas por un año, lo que equivale a un abastecimiento de 222 personas por hectárea.

- > Respecto de los niveles subterráneos, los ascensos observados en los pozos de medición son mayores en los pozos ubicados en la parte alta del relleno sedimentario, y son menores en los pozos ubicados hacia aguas abajo. Por otro lado, los ascensos máximos anuales se encuentran correlacionados con las precipitaciones ocurridas durante el invierno. Finalmente, se puede resaltar que los ascensos del pozo CPP4 se encuentran limitados por un buffer. Este comportamiento puede explicarse debido a que en sector del pozo CPP4 ocurren los afloramientos principales del agua subterránea y, por tanto, el caudal sale del acuífero para alimentar los numerosos cauces presentes en el humedal.

### Caudales

- > Los caudales de salida del Humedal Casa Piedra poseen variaciones estacionales relevantes entre invierno y verano. En la época invernal el flujo de salida es de 43.200 m<sup>3</sup>/día, equivalente a 216.000 personas por día en volumen constante. En verano (diciembre a marzo) el caudal puede abastecer a 500.000 personas por día, siendo el caudal de salida 103.680 m<sup>3</sup>/día en volumen constante.
- > El análisis de caudales muestra que la producción específica media de las cuencas es similar. Lo anterior podría indicar que los procesos hidrológicos de evaporación son similares en ambas cuencas. Pese a lo anterior, la cuenca de Aparejo presenta numerosos episodios de cre-

cidas puntuales, los cuales no se observan en la dinámica de los caudales de Casa Piedra.

- > Debido al efecto regulador que realiza el sistema del humedal en Casa Piedra, los caudales máximos resultan ser un orden de magnitud menores que los registrados en Aparejo. Así, las crecidas máximas instantáneas se ven atenuadas por la presencia del humedal. El sistema acuífero-humedal en Casa Piedra reduce las crecidas por sobre 100 l/s/km<sup>2</sup> a una tasa media de 1,4 veces por año. Lo anterior es beneficioso, ya que una moderación en los caudales máximos permite preservar las riberas y las obras hidráulicas ubicadas hacia aguas abajo, y disminuir de manera importante el arrastre de sedimentos.
- > Además del efecto de modulación de los caudales, durante los años hidrológicos en que se registraron las menores precipitaciones, el flujo base de Casa Piedra es mayor que el de Aparejo. Lo anterior se puede explicar debido al efecto regulador del sistema del humedal de Casa Piedra. Este servicio ecosistémico de regulación hídrica provisto por el humedal puede ser beneficioso, ya que permite contar con caudales mínimos mayores durante el periodo invernal y de verano de los años secos.
- > Las elevadas precipitaciones ocurridas durante abril del año 2016 provocaron aluviones y avalanchas que modificaron las condiciones de descarga de la sección 1 en el sitio Casa Piedra. Lo anterior produjo una redirección de los flujos, quedando solo un flujo base por la sección 1 (sin presentar los caudales estacionales de deshielo), mientras que la sección 2 vio un aumento progresivo de los caudales aportantes, tanto en su flujo base como en sus caudales estacionales.
- > Los escurrimientos en las cuencas en estudio sufren del congelamiento parcial que afecta a los cauces. Este proceso es complejo y dinámico. Se recomienda realizar futuras investigaciones a fin de detallar el impacto real del congelamiento parcial de los cauces sobre los caudales en los

<sup>13</sup> Superintendencia de Servicios Sanitarios: 170 lts/día por persona en Chile.



cauces alto andinos. Se constata que en el caso del subsuelo, este no se congela por lo que el humedal sigue almacenando e infiltrando agua durante los meses de invierno, lo que fortalece su naturaleza de embalse subterráneo.

Los datos y el análisis aquí presentado dan cuenta del rol relevante de los humedales alto-andinos, especialmente los relacionados con el suministro y regulación del agua, así como para la investigación y desarrollo de soluciones de infraestructura verde que permitan enfrentar los desafíos de la seguridad hídrica en sistemas andinos.

Las acciones de conservación y restauración que se generen en estos sectores tienen retornos concretos, no sólo en la flora y fauna del sector, sino también en el bienestar de las poblaciones asociadas, siendo la seguridad hídrica la que presenta un mayor aumento. El desafío futuro es amplificar este tipo de iniciativas a otras cuencas de Chile central y fomentar la conservación/restauración de humedales, para así tener una mayor resiliencia del abastecimiento de agua y permitir una mejor adaptación al cambio climático.







# 5. BIBLIOGRAFÍA

- Anderson, T. G., D. A. Christie, R. O. Chávez, M. Olea, and K. J. Anchukaitis (2021)** Spatiotemporal Peatland Productivity and Climate Relationships Across the Western South American Altiplano. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences* **126**:e2020JG005994.
- Convención de Ramsar. (2005)** Estrategia Regional de Conservación y Uso sostenible de los Humedales Altoandinos. Uganda. Ramsar COP9 DOC. 26
- Cooper, D. J., K. Kaczynski, D. Slayback, and K. Yager. (2015)** Growth and Organic Carbon Production in Peatlands Dominated by *Distichia muscoides*, Bolivia, South America. *Arctic, Antarctic, and Alpine Research* **in press**.
- Fredericksen N., N., B. Astorga L., and F. Morales C. (2010)** Santiago Andino - La mayor reserva natural de agua de la Región Metropolitana. Fondo de Protección Ambiental (FPA), Santiago, Chile.
- Garreaud, R., Boisier, J., Rondanelli, R., Montecinos, A., Sepúlveda, H. and Veloso-Aguila, D. (2019)** The Central Chile Mega Drought (2010-2018): A climate dynamics perspective. *International Journal of Climatology* **40**(1).[https://www.researchgate.net/publication/334175678\\_The\\_Central\\_Chile\\_Mega\\_Drought\\_2010-2018\\_A\\_Climate\\_dynamics\\_perspective](https://www.researchgate.net/publication/334175678_The_Central_Chile_Mega_Drought_2010-2018_A_Climate_dynamics_perspective)
- Halloy, S. R. P. (1984)** La importancia del régimen hidrológico y la estabilidad de ecosistemas de altura para la regulación del agua en los Valles Calchaquíes. Pages 143-154 *in* IV Jornadas Culturales del Valle Calchaquí, Tucumán.
- Kendall, M.G. (1975)** Rank Correlation Methods. 4th Edition, Charles Griffin, London.
- León, A., Soto, J., Osses, D., Pérez, J. (2016)** “Los humedales como solución natural para mejorar la seguridad hídrica en la cuenca del Maipo-Región Metropolitana de Chile”, Universidad de Chile – TNC.
- Luebert, F., & Plischoff, P. (2020).** Sinopsis bioclimática y vegetacional de Chile. 2da edición. Editorial Universitaria
- Mann, H.B. (1945)** Mann-Kendall. Non-Parametric Test against Trend. *The Econometric Society*, **13**, 245-259.
- Mirande, V., y Tracanna, B. C. (2009).** Estructura y controles abióticos del fitoplancton en humedales de altura. *Ecología Austral*, **19**; 2; 8-2009; 119-128. <https://ri.conicet.gov.ar/handle/11336/78172>
- Meneses, R. I., A. I. Domic, S. G. Beck, and K. Yager. (2019).** Bofedales Altoandinos: Un oasis en la Puna. Herbario Nacional de Bolivia, UMSA, La Paz, Bolivia.
- Ministerios Medio Ambiente (2022)** GUÍA METODOLÓGICA PARA LA COMPENSACIÓN DE BIODIVERSIDAD EN ECOSISTEMAS TERRESTRES Y ACUÁTICOS CONTINENTALES. Editor: Servicio de Evaluación Ambiental.
- Ruthsatz, B. (2000)** Die Hartpolster-Moore der Hochanden und ihre Artendiversitaet. *Berichte der R. Tuexen-Gesellschaft (RTG)* **12**:351-371.
- Segovia, A., G. Casassa, J. Huenante, A. Espinoza y F. Bug (2022).** Actualización Inventario Público de Glaciares 2022: metodología, dificultades y resultados. IV Congreso de la Sociedad Chilena de la Criósfera SOCHICRI. Villarrica-Pucón, Chile
- Thorslund, J., Jarsjo, J., Jaramillo, F., Jawitz, J. W., Manzoni, S., Basu, N. B., ... & Destouni, G. (2017).** Wetlands as large-scale nature-based solutions: Status and challenges for research, engineering and management. *Ecological Engineering*, **108**, 489-497. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0925857417304093>



# 6. ANEXOS

## 6.1. Calicatas

Prof (cm)	Calicata 1 404823 E, 6279275 S (UTM 19h)	Prof (cm)	Calicata 2 404850 E, 6279176 S (UTM 19h)
0-5	Franco arcillo limosa; plástico y ligeramente adhesivo; estructura granular fina, fuerte. Raíces finas abundantes, raíces medias abundantes, raíces gruesas pocas; poros finos abundantes, poros medios abundantes, poros gruesos pocos. Alto contenido de materia orgánica descompuesta. Límite lineal, abrupto.	0-4	Franco arcillo arenosa; plástico y no adhesivo; estructura granular fina, fuerte. Raíces finas abundantes, raíces medias abundantes, raíces gruesas pocas; poros finos abundantes, poros medios pocos, poros gruesos pocos. Grava fina en un 10%. Reacción fuerte al HCl. Límite lineal, abrupto.
5-10	5-10 Franco arenosa; no plástico y no adhesivo; estructura. Raíces finas abundantes, raíces medias abundantes, gruesas pocas; poros finos abundantes, poros medios abundantes, poros gruesos pocos. Presencia de grava fina en un 20%. Límite lineal, abrupto.	4-23	No plástico y no adhesivo; estructura granular fina, fuerte. Raíces finas pocas, raíces medias abundantes, raíces gruesas pocas; poros finos abundantes, poros medios abundantes, poros gruesos comunes. Concentraciones redox de color pardo fuerte (7,5 YR 5/8), en un 20% del horizonte. Presencia de grava en un 40% del horizonte. Límite lineal, abrupto.
10-26	10-26 Franco arcillo limosa; plástico y adhesivo; estructura granular fina, fuerte. Poros finos abundantes. Alto contenido de materia orgánica moderadamente descompuesta. Límite lineal, abrupto.		
26-30 y más	26-30 y más No plástico y no adhesivo; grano simple. Poros finos abundantes, poros medios comunes, poros gruesos pocos. Presencia de grava y guijarros en un 50% del horizonte.	23-50 y más	No plástico y no adhesivo; estructura granular fina, fuerte. Raíces finas comunes, raíces medias pocas; poros finos abundantes, poros medios comunes, poros gruesos pocos. Fragmentos gruesos ocupan un 70% del horizonte, correspondiendo un 50% a grava y un 20% a piedras.





<https://www.nature.org/chile>