

# Los humedales como solución natural para mejorar la seguridad hídrica en la Cuenca del Maipo Región Metropolitana de Chile



## INFORME FINAL





Queda prohibida la reproducción total o parcial de este documento, sin la autorización previa de The Nature Conservancy

Marchant Pereira 367, oficina 801, Providencia, Santiago de Chile. 7500557.

+562 23417017

[chile@tnc.org](mailto:chile@tnc.org)

Este documento debe ser citado como:

The Nature Conservancy, Los humedales como solución natural para mejorar la seguridad hídrica en la Cuenca del Maipo Región Metropolitana de Chile, 2017.

## Tabla de Contenidos

INTRODUCCIÓN .....	4
I. EQUIPO DE TRABAJO .....	6
EQUIPO TNC.....	6
EQUIPO UNIVERSIDAD DE CHILE .....	8
II. SITIO DE ESTUDIO .....	10
III. LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN.....	12
1. MONITOREO HIDROLÓGICO Y MONITOREO DE VEGETACIÓN EN HUMEDALES ALTO ANDINOS .....	12
1.1 Sitios de estudio.....	13
1.2 Monitoreo hidrológico.....	16
1.2.1 Metodología .....	16
1.2.2 Resultados .....	20
1.2.3 Desafíos y siguientes pasos .....	26
1.3 Monitoreo de la vegetación.....	27
1.3.1 Metodología .....	27
1.3.2 Resultados .....	35
2. MODELAMIENTO .....	56
2.1 Metodología .....	56
2.2 Resultados .....	58
3. DIFUSIÓN Y EDUCACIÓN AMBIENTAL.....	72
3.1 DIFUSIÓN .....	72
3.2 EDUCACIÓN AMBIENTAL .....	74
Agradecimientos .....	77

## INTRODUCCIÓN

La Convención sobre los Humedales, o Convención de Ramsar, define a los humedales como zonas de la superficie terrestre temporal o permanentemente inundadas, reguladas por factores climáticos y en constante interrelación con los seres vivos que la habitan (Ramsar, 2016).

En ellos surge vegetación especializada (Fernández *et al.*, s/a) que cumple un rol fundamental en el reciclaje de nutrientes, en la mantención de las redes tróficas, la estabilización de sedimentos y la calidad de las aguas superficiales y subterráneas. Los humedales figuran entre los medios más productivos del mundo, son cunas de diversidad biológica y fuentes de agua. Los humedales y los servicios que nos prestan, como la acumulación de agua, están empezando a ser valorados como “Infraestructura Verde”. La capacidad de los humedales de adaptarse a condiciones dinámicas e índices de cambio cada vez más rápidos será crucial para las comunidades humanas y las especies silvestres en todas partes, conforme se vayan percibiendo los impactos asociados al cambio climático como a otros factores (e.g. cambio de uso de suelo, aumentos en la demanda de recursos hídricos). Los humedales que forman parte de los ecosistemas de páramo, jalca y puna se conocen como humedales andinos y altoandinos (Convención de Ramsar *et al.*, 2008) y contienen una diversidad biológica con alto nivel de endemismo, tanto en la flora y fauna terrestre como acuática (MMA, 2011). Los humedales son considerados ecosistemas frágiles, condición que podría deberse a causas naturales como sequías extremas, fuertes vientos, alta radiación y grandes amplitudes térmicas (Mirande y Tracanna, 2009) y/o a factores antrópicos, como el sobrepastoreo, la agricultura, la minería, y las consecuentes modificaciones en los cursos de agua y la extracción para el consumo humano (MMA, 2011).

En Chile, las proyecciones indican que para el año 2025 habrá un déficit hídrico desde la Región Metropolitana al norte de aproximadamente 6.000 millones de metros cúbicos al año, cifra que corresponde a una disminución de la disponibilidad hídrica total cercana a un 4%. Esto equivale a la actual capacidad de todos los embalses a nivel nacional (Comisión Nacional de Riego, 2011). Por otro lado, Chile cuenta con el 76% de la superficie glaciar del continente americano, que se distribuyen a lo largo de la Cordillera de Los Andes (DGA/CECS, 2009) y que juegan un rol relevante en la oferta de agua disponible. Sin embargo, la gran mayoría de los glaciares de Chile están retrocediendo, forzados por el cambio climático y se deben explorar soluciones que permitan regular los flujos de agua. Una de las alternativas de acumulación de agua en forma natural, son los humedales.

El año 2010, The Nature Conservancy (TNC) se propuso el objetivo de promover la conservación de la infraestructura verde para ayudar a asegurar agua limpia para 25 ciudades de América Latina **en situación de riesgo hídrico potencial**. Santiago fue identificada como una de las ciudades con mayor riesgo, y consecuentemente es una de las ciudades donde la infraestructura natural puede cumplir un rol relevante. La cuenca del río Maipo es la principal fuente de abastecimiento de agua para la ciudad y se caracteriza por la presencia de diversas actividades humanas que ejercen una fuerte presión en el uso de recursos hídricos. En Santiago habitan más de 7 millones de personas, se genera cerca del 40% del PIB nacional y prácticamente todas las actividades económicas dependen del abastecimiento de agua en buena cantidad y calidad. Un 80% del consumo urbano de aguas en Santiago proviene del río Maipo.

Este proyecto busca demostrar el valor 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. En este contexto, el presente estudio enfocó esfuerzos científicos para evaluar la dinámica y potenciales beneficios asociados a la infraestructura verde presente en la parte alta de la cuenca del río Maipo. Estos esfuerzos se canalizaron a través de dos líneas de trabajo principales, siendo la primera de ellas el diseño y establecimiento de una red de monitoreo hidrológico para sitios específicos en humedales alto andinos seleccionados y el posterior análisis de datos para identificar y cuantificar el impacto de la presencia y actividad de los humedales sobre la calidad de las aguas y la velocidad de los flujos. Esta línea de trabajo fue complementada por un monitoreo de la vegetación presente en los sitios de estudio. La segunda línea de trabajo contempló el uso de herramientas de modelación para analizar la capacidad de producción de sedimentos de las cuencas altas de la cuenca del Río Maipo, donde a través del uso de la herramienta de modelaje InVEST y del modelo SDR (Sediment Delivery Ratio Model) se ha estimado la potencialidad de producción y retención de sedimentos de las cuencas. Esto permitirá en fases posteriores identificar las áreas donde el retorno de la inversión sea más alto al realizar actividades de conservación en la cuenca. Este análisis hace uso de nuevas imágenes disponibles y de las últimas versiones de los módulos de sedimentos los softwares InVEST y RIOS desarrollados por TNC y Natural Capital Project (<http://www.naturalcapitalproject.org/invest/>).

Adicionalmente, este proyecto involucra esfuerzos de difusión, transferencia de conocimiento y la creación de mecanismos de sustentabilidad financiera para la continuidad del estudio. Este proyecto se levanta como estudio piloto en el contexto de la iniciativa de TNC para la creación de un Fondo de Agua para la ciudad de Santiago, institucionalidad que se busca diseñar e implementar mediante el esfuerzo en conjunto con otros actores de los sectores público y privado presentes en la cuenca, que tienen alta incidencia sobre el uso y manejo de los recursos hídricos. Este proyecto es desarrollado por el trabajo conjunto entre TNC y un equipo de expertos de la Facultad de Ciencias Agronómicas de la Universidad de Chile.

## I. EQUIPO DE TRABAJO

### EQUIPO TNC

#### **Maryann Ramírez**

Gerente de Conservación para Chile, The Nature Conservancy.

Rol en proyecto: Gerente.



Maryann Ramírez se unió a TNC en 2012 y desde ese entonces dirige los proyectos de conservación que la organización está llevando a cabo en Chile, tanto en la Región Metropolitana como en el sur del país, específicamente en la Reserva Costera Valdiviana. Ha trabajado durante 15 años gestionando iniciativas ambientales y de conservación en el sector público y no-gubernamental en los ámbitos técnico y de medioambiente, especializándose en temas de agua, innovación y gerencia de proyectos. Anteriormente, trabajó en el Ministerio de Economía chileno, específicamente en el Consejo de Producción Limpia (CPL) y la Corporación de Fomento de la Producción (CORFO), además de trabajar en la Fundación Chile. Es ingeniero en bioquímica titulada en la Pontificia Universidad Católica de Valparaíso e Ingeniero Ambiental titulada en la Universidad de Santiago de Compostela, España, con un MBA de la Universidad Adolfo Ibáñez, Chile.

#### **Sebastián Bonelli**

Especialista en Fondos de Agua para Andes del Sur, The Nature Conservancy.

Rol en proyecto: Jefe de Proyecto.



Sebastián Bonelli está a cargo de apoyar y gestionar los proyectos de conservación de agua dulce para el programa de conservación de Chile y proporcionar liderazgo técnico en general. Actualmente está enfocado en apoyar el desarrollo del Fondo de Agua de Santiago y otros programas de gestión integral y financiamiento de la conservación de la cuenca en hábitats mediterráneos y humedales altoandinos de Chile central. Antes de unirse a TNC en 2015, Sebastián se desempeñaba como investigador y docente asistente en el Centro de Cambio Global de la Pontificia Universidad Católica de Chile. También ha trabajado con diversas instituciones internacionales como la Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL) y el ICLEI-USA (gobiernos locales por la sostenibilidad), desarrollando proyectos asociados con la mitigación y adaptación al cambio climático, recursos hídricos, planificación, análisis de políticas públicas. Es agrónomo y obtuvo un MSc. en Recursos Naturales de la Pontificia Universidad Católica de Chile y un MA. en Clima y Sociedad de la Universidad de Columbia.

### **Paulo Petry, PhD**

Científico Agua Dulce para América Latina, The Nature Conservancy.

Rol en proyecto: Científico principal, diseño e implementación de monitoreo hidrológico.



Paulo Petry es el encargado del trabajo de conservación de Agua Dulce de The Nature Conservancy en América Latina desde 2007. Dirigió la iniciativa que identificó las amenazas y el estado de los sistemas de agua dulce en el continente, análisis que TNC utilizó para establecer sus prioridades de conservación de aguas en América Latina. Actualmente apoya el trabajo del Fondo de Agua en Chile y su desarrollo desde un comienzo. Paulo tiene un Ph.D. en Ciencia de Pesquerías de Oregon State University, un B.S. en Oceanografía y un M.S. en Biología de Agua Dulce. Ha trabajado en la Amazonía como científico principal en el Instituto Nacional de Pesquisas da Amazonia (1984-1999), investigador en Field Museum of Natural History, Chicago, EEUU, (2001-2004) en el proyecto AQUARAP y experto en peces de América Latina en el departamento de peces del Museum of Comparative Zoology de Harvard University (2005-2017). Ha sido coeditor de dos libros y ha publicado 37 artículos. Sus experticias incluyen la ictiología, ecología de agua dulce, hidrología y monitoreo ambiental.

### **Jorge León**

Especialista en Fondos de Agua para América Latina, The Nature Conservancy.

Rol en proyecto: Encargado de modelaje espacial de cuencas.



Jorge León trabaja en TNC desde 2008 y en 2011 fue nombrado Especialista en Fondos de Agua para América Latina. Está a cargo de monitorear el progreso de los Fondos de Agua y de diseñar los indicadores para esta tarea, procesar los datos de sensores remotos para el monitoreo de cambio de uso de suelo, el modelamiento de los procesos biofísicos de las cuencas y entrenamiento de personal. En el marco del trabajo con HSBC, sus intereses de investigación incluyen el uso de datos de sensores remotos activos y pasivos para la caracterización de las dinámicas de cobertura de la tierra y ecosistemas, modelamiento de procesos hidrológicos para recuperar información de la cuenca y la detección de cambio en la cobertura de suelo inducida por el ser humano en ambientes automatizados. Es científico especializado en ecología con estudios en la Universidad Javierana, Bogotá, Colombia.

### **Mercedes Ibáñez**

Especialista en Sistemas de Información Geográfica para Andes del Sur, The Nature Conservancy.

Rol en proyecto: Encargada de modelaje espacial de cuencas.



Mercedes Ibáñez ingresó al área de ciencias de TNC en 2009 con el cargo de Especialista en Sistemas de Información Geográfica, apoyando proyectos de conservación en Chile y Argentina. Es geógrafa de la Pontificia Universidad Católica de Chile, con un diplomado en Desarrollo Sustentable. Ha trabajado en análisis espaciales relacionados con la conservación, en la determinación de áreas prioritarias, análisis de amenazas, evaluación de servicios ecosistémicos, análisis de cambio climático, generación de cartografía, análisis de riesgo geomorfológico, entre otros.

### **Daniela Cabezas**

Coordinadora de Conservación para Chile, The Nature Conservancy.

Rol en proyecto: Encargada de coordinación general de proyecto.



Daniela Cabezas ingresó a TNC el año 2011 y se desempeña en el área de Conservación desde el 2013 coordinando y ejecutando los proyectos de conservación de TNC en Chile. Su experiencia se relaciona con manejo administrativo de contratos, relación con socios, coordinación de trabajos en terreno, generación de información técnica de apoyo para proyectos de conservación, entre otros. Es Ingeniera Ambiental titulada en la Universidad de Valparaíso y cuenta con un Diplomado en Sistemas de Información

Geográfica de la Universidad de Chile.

### **David Messutto**

Especialista de terreno, The Nature Conservancy.

Rol en proyecto: Encargado de coordinación de trabajos y estudios de campo.



Licenciado en Ciencias de los Recursos Naturales Renovables de la Universidad de Chile, ad portas de obtener la Ingeniería en Recursos Naturales Renovables en la misma Universidad. Cuenta con un Diplomado en Comunicación, Clima y Sostenibilidad del Kolleg für Management und Gestaltung nachhaltiger Entwicklung de Berlín y es técnico en telecomunicaciones con experiencia en dispositivos móviles y desarrollo web. Ha trabajado en investigaciones relacionadas con la evaluación económica del agua en la cuenca del Huasco,

además del vínculo de las personas y el medio que la rodea. Su trabajo en el proyecto se relaciona con la coordinación logística de trabajo en campo; compra, instalación y mantención de equipos en terreno, y medición y recolección de información en terreno.

## **EQUIPO UNIVERSIDAD DE CHILE**

### **Alejandro León**

Profesor Asociado, Departamento de Ciencias Ambientales y Recursos Naturales Renovables, Facultad de Ciencias Agronómicas, Universidad de Chile.

Rol en proyecto: Director de equipo Universidad de Chile.



Alejandro León Stewart es Ing. Agrónomo y Dr. En Ciencias de los Recursos de Zonas Áridas de la Universidad de Arizona. Dicta los cursos “Protección de Recursos Naturales Renovables” y “Economía Ambiental” para estudiantes de Ing. Agronómica e Ing. En Recursos Naturales Renovables. Ha sido consultor de las Convención de Naciones Unidas para el Combate a la Desertificación y miembro de numerosas agrupaciones tanto chilenas como internacionales de investigación. Ha liderado proyectos de investigación financiados por NASA,

NOAA, IAI, Fondef, CONAF, etc.

### **Jorge Soto**

Investigador y académico externo, Departamento de Ciencias Ambientales y Recursos Naturales Renovables, Facultad de Ciencias Agronómicas, Universidad de Chile.

Rol en proyecto: Jefe de proyecto equipo Universidad de Chile.



Jorge Soto Winckler es Ingeniero en Recursos Naturales Renovables, Magíster en Manejo de Suelos y Aguas (Universidad de Chile). Cuenta con competencias en gestión de ecosistemas y desastres naturales; así como conocimientos y habilidades transversales relacionadas a la protección de recursos naturales (físicos y de gestión), mecanismos de respuesta y adaptación al cambio climático. Jefe de proyecto encargado de coordinar y proponer la ejecución de pruebas en terreno, del diseño experimental y de la propuesta metodológica.

### **Equipo de apoyo**

El equipo de investigación de apoyo de la Universidad estuvo compuesto por Daniela Osses (Licenciada en Ciencias de los Recursos Naturales Renovables, Universidad de Chile), Javier Pérez Garrido (Licenciado en Ciencias Agronómicas, Universidad de Chile), Nicolás Leiva-Büchi (Ingeniero en Recursos Naturales Renovables de la Universidad de Chile y cursando actualmente un Magíster de Ingeniería en Geoinformática en el Politécnico de Milano).

Este equipo estuvo apoyando en estimar los niveles de cobertura vegetal y de realizar el levantamiento de especies vegetales, así como la estimación de producción de biomasa vegetal de las vegas altoandinas, realización de descripciones morfológicas y realización de pruebas para la caracterización edafológica de los suelos de vegas altoandinas.

## II. SITIO DE ESTUDIO

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 con los límites administrativos de la Región Metropolitana de Santiago. 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>.

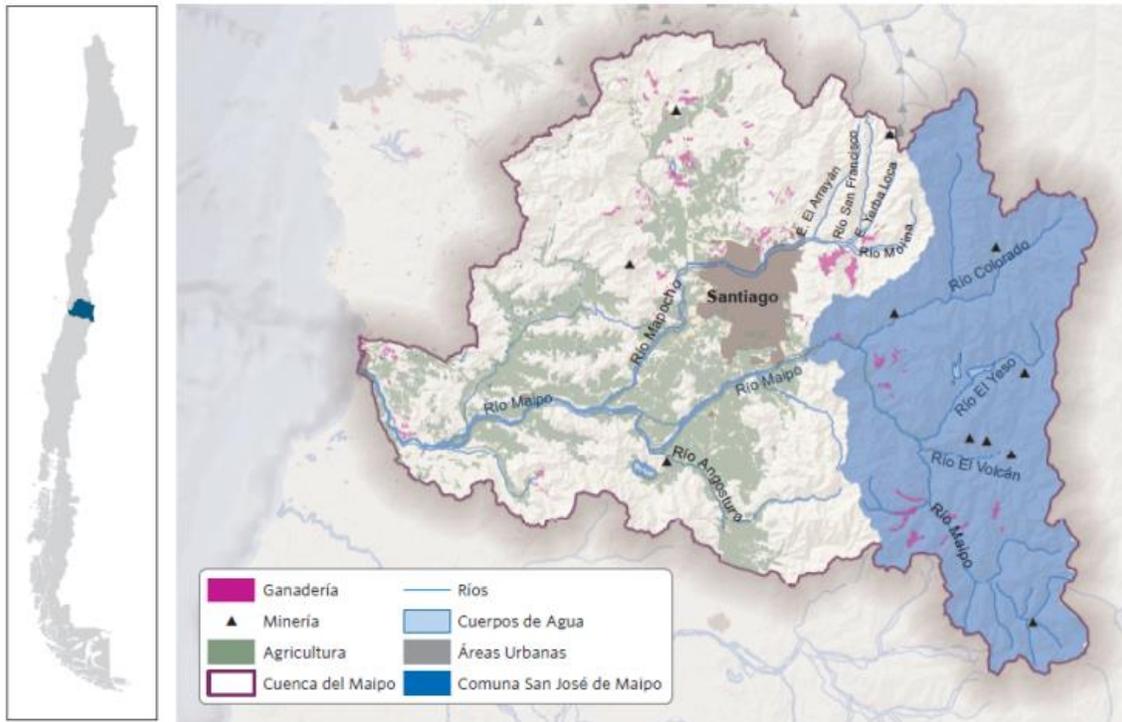


Figura 1. Cuenca del río Maipo.

La cuenca presenta un clima mediterráneo semiárido, con precipitaciones concentradas en los meses de invierno y temperaturas máximas en los meses de verano.

El río Maipo es un río de régimen nival, tiene un caudal promedio de 90 m<sup>3</sup>/s (DGA, 2003, estación El Manzano) y alcanza su caudal máximo hacia finales de la primavera (diciembre).

El sector agrícola es el principal usuario de agua en la cuenca, con cultivos bajo riego que cubren cerca de 246.447 hectáreas (Universidad de Chile, 2014). La eficiencia de riego en la cuenca alcanza un 50%, dado que existe una predominancia de prácticas de riego por inundación, que se asocia al uso de grandes volúmenes para cubrir la demanda de los cultivos.

El segundo mayor uso de aguas se asocia al consumo urbano. El consumo per cápita en la ciudad de Santiago es de 150 l/día, aunque este valor presenta una alta variabilidad territorial, alcanzando un promedio de 617 l/día si se consideran sectores de mayor nivel socioeconómico (SISS, 2009a). El 75% del abastecimiento de agua potable de la Región Metropolitana de Santiago tiene como fuente directa las aguas del río Maipo.

Otros usos de agua se asocian a actividades mineras (principalmente en su parte alta y norte, asociadas a extracciones de cobre y carbonatos de calcio), y para el caso de usos no consuntivos, se destaca la presencia de centrales hidroeléctricas de pasada (ubicadas en la zona cordillerana con más de 300 MW de capacidad instalada).

En términos ambientales, es importante mencionar que la cuenca se inserta en un ecosistema mediterráneo con uno de los mayores niveles de biodiversidad y endemismo de especies en Chile siendo utilizado el río también de manera directa o indirecta en diversas actividades recreativas y/o de esparcimiento (Proyecto MAPA, 2013). Es importante destacar que la zona de estudio recibe una gran cantidad de turistas durante las estaciones de primavera y verano.

El área de estudio de este proyecto se asocia a la parte alta de la cuenca y coincide con los límites administrativos de la comuna de San José de Maipo. Las herramientas de modelamiento para estimar la capacidad de producción de sedimentos (InVEST y modelo SDR-Sediment Delivery Ratio Model) fueron utilizadas para realizar estimaciones de este tipo de variables en toda la parte alta coincidente con estos límites, mientras que para implementar el monitoreo hidrológico y el monitoreo de la vegetación presente se seleccionaron sitios de estudio específicos en la subcuenca del río Yeso, afluente del río Maipo. Una descripción específica para estos sitios se presenta en la siguiente sección.

### III. LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN

#### 1. MONITOREO HIDROLÓGICO Y MONITOREO DE VEGETACIÓN EN HUMEDALES ALTO ANDINOS

El monitoreo hidrológico y el monitoreo de vegetación se llevó a cabo en la subcuenca del río Yeso, afluente del río Maipo, entre 2.500 y 2.800 m.s.n.m (Figura 2). La red de monitoreo hidrológico se compone de una serie de puntos de monitoreo distribuidos en 4 sitios: el humedal Casa Piedra, el humedal del Campamento Minero, el Humedal del Parque Valle del Yeso y el Arroyo del Aparejo. El monitoreo de vegetación contempló los mismos sitios de estudio a excepción del Arroyo del Aparejo (Figura 3).

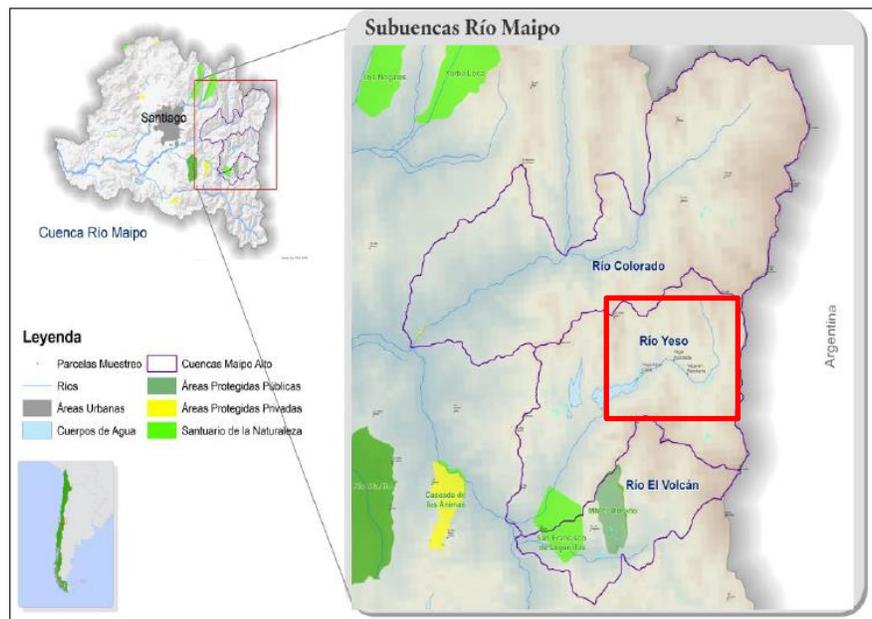


Figura 2. Zona de estudio asociada al monitoreo hidrológico y monitoreo de vegetación en la subcuenca del río Yeso.

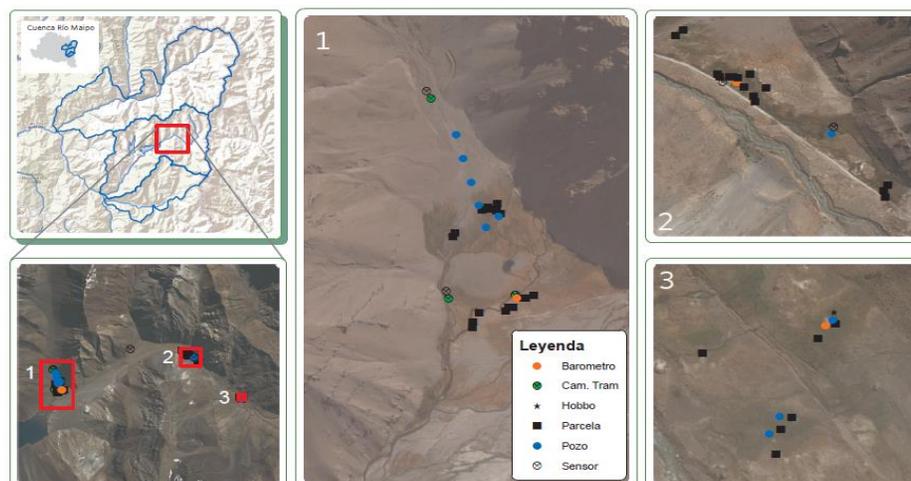


Figura 3. Sitios seleccionados para monitoreo hidrológico y monitoreo de vegetación en la subcuenca del río Yeso (1. Humedal Casa Piedra, 2. Humedal Campamento Minero y 3. Humedal Parque Valle del Yeso).

## 1.1 Sitios de estudio

### 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 4). 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%. 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 y otras especies presentes en suelos saturados con el desarrollo de depósitos de turba. La vegetación delante 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 poaceas como *Hordeum comosum*, fabaceae como *Trifolium repens* y asteraceae como *Taraxacum officinale*. En la parte posterior a la morrena, en las zonas vadosas saturadas es posible encontrar coberturas del 100% que se componen de 2 especies en particular: *Werneria pygmaea* y *Veronica anagallisaquatica*. 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%), *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.



Figura 4: Abanico aluvial y humedal Casa Piedra (Paulo Petry, TNC).

## 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.

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 ( $H_2S$ ).

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 pequeños estanques intermitentes que contienen alta salinidad y aguas duras.



Figura 5: humedal Campamento Minero (Paulo Petry, TNC).

## 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 (Figura 6). Recibe contribución de agua por escorrentía superficial sólo a principios de primavera, durante el derretimiento de la nieve. El resto del año la contribución se da 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 tiene lugar subterráneamente 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 compactado 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%.



Figura 6: Parque Valle del Yeso y microterrazas (Paulo Petry, TNC)

## 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 al abanico aluvial (Figura 7). 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%. Este abanico aluvial no presenta emergencia de aguas subterráneas, por lo que la única fuente de agua es el flujo superficial originado por la nieve de las montañas y el hielo derretido.



Figura 7: Abanico aluvial en humedal Arroyo del Aparejo (Paulo Petry, TNC)

## 1.2 Monitoreo hidrológico

### 1.2.1 Metodología

El monitoreo más exhaustivo fue realizado sobre el humedal Casa Piedra, donde se midieron caudales superficiales además de los niveles de agua subterránea. Los flujos superficiales se midieron en tres 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 8). Además del monitoreo volumétrico, establecimos cinco

puntos de medición de calidad de agua en Casa Piedra, para definir el perfil químico del agua que fluye a través del sistema y determinar si había más de una fuente de entrada de agua en el sistema. Los puntos de muestreo son los siguientes: uno en la parte superior del abanico aluvial donde fluye agua superficial hacia el sistema, uno en el flanco inferior oriental y otro en el caudal occidental donde el agua subterránea emerge a ambos lados del humedal, uno en la zona central inferior del abanico y uno en la salida más baja del complejo del humedal donde el agua fluye hacia el río Yeso. Se agregaron dos puntos adicionales de comparación en el sitio de Aparejo y en Campamento Minero, respectivamente.

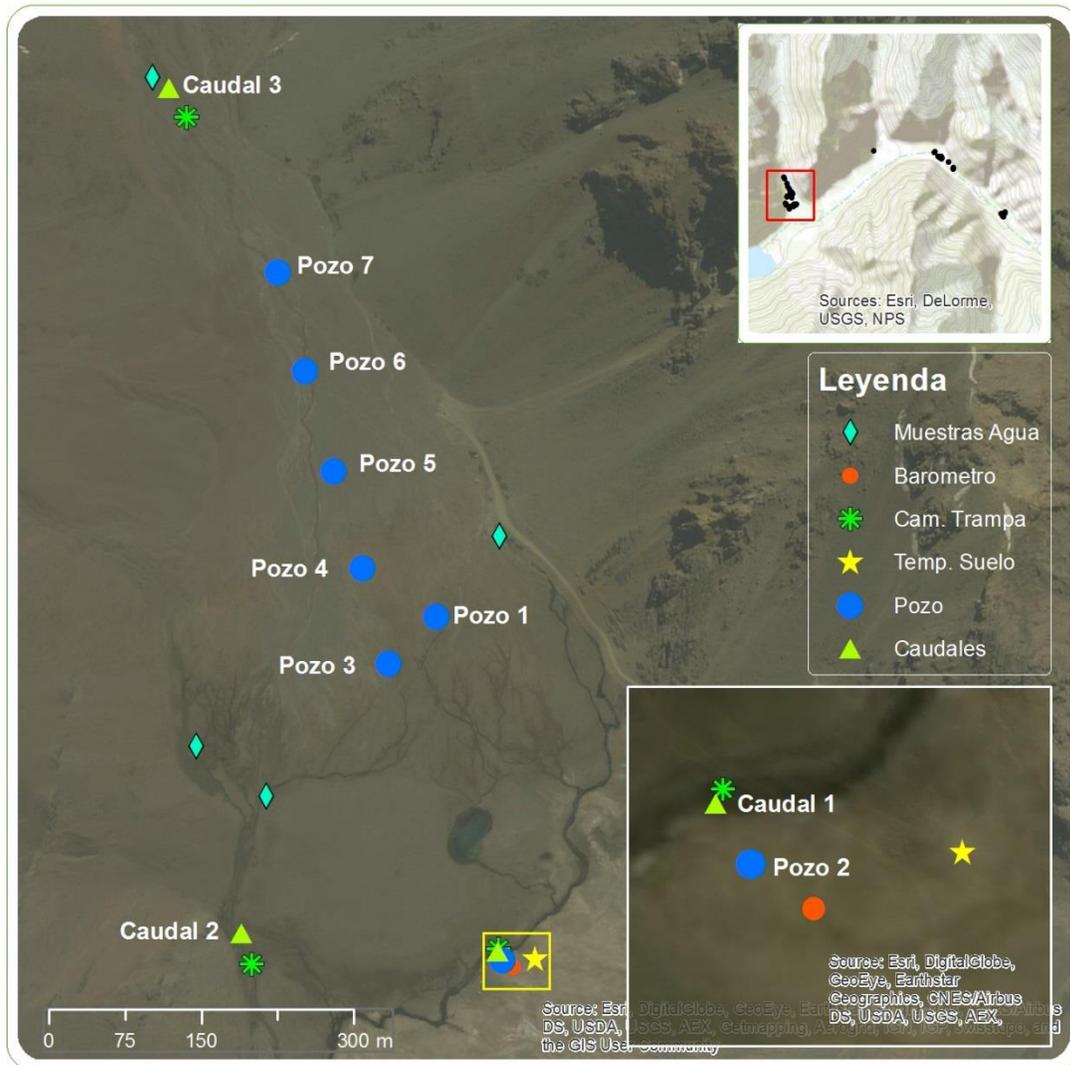


Figura 8: Red de monitoreo en humedal Casa Piedra<sup>1</sup>.

<sup>1</sup> Figura incluye además la ubicación de parcelas de exclusión para monitoreo de vegetación (ver sección III.1.c)

En Arroyo del 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.

En Campamento Minero establecimos 3 puntos de monitoreo (Figura 9). El primero de ellos fue establecido para medir el flujo superficial formado por los manantiales de aguas subterráneas. El segundo punto de medición se asocia a un pozo de prueba para medir las variaciones de nivel de agua subterránea. Un tercer punto de monitoreo para la escorrentía superficial de salida, el cual fue ubicado en una zanja de descarga donde el agua sale del sistema. La decisión de establecer solo 3 pozos de prueba fue en función de haber verificado la ausencia de escorrentía superficial.

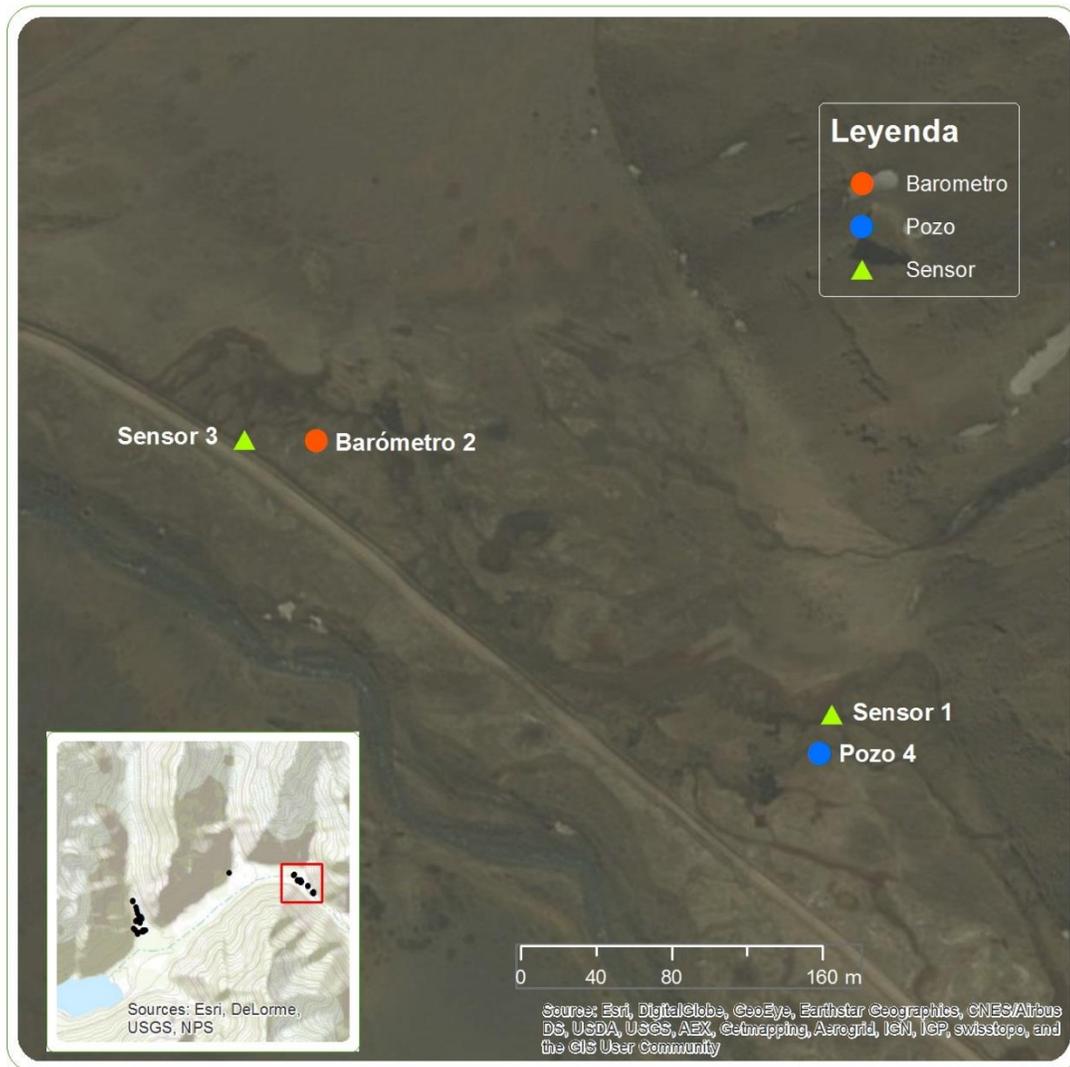


Figura 9: Puntos de monitoreo en humedal Campamento Minero<sup>2</sup>.

<sup>2</sup> Figura incluye además la ubicación de parcelas de exclusión para monitoreo de vegetación (ver sección III.1.c)

### Parque Valle del Yeso

En el sitio del Parque Valle del Yeso fueron instalados 3 pozos de prueba para monitorear la fluctuación del nivel de la napa freática (Figura 10). La decisión de establecer solo 3 pozos de prueba fue en función de haber verificado la ausencia de escorrentía superficial. Los pozos están ubicados en función de la estructura del terreno para capturar los distintos comportamientos hidrológicos del humedal.

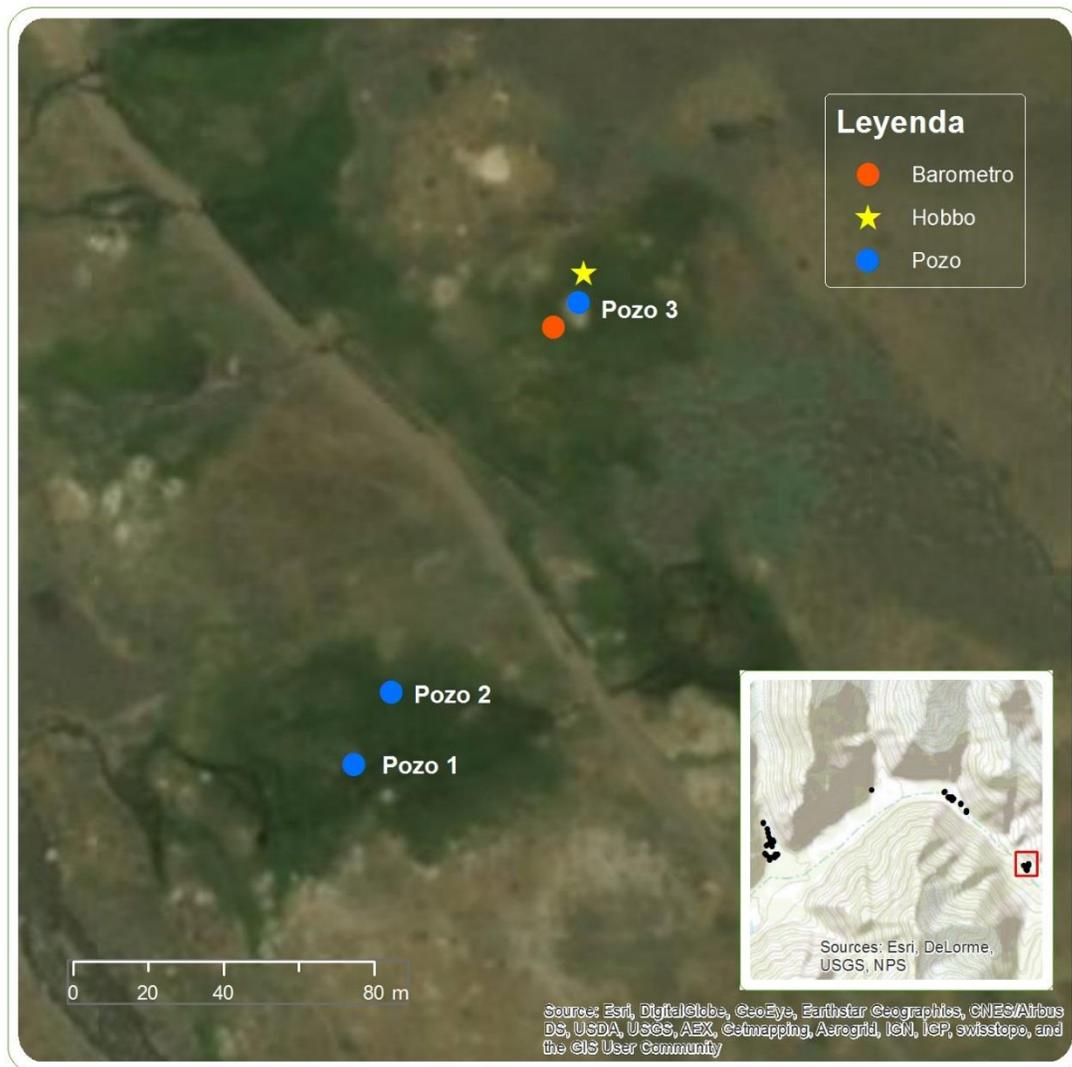


Figura 10: Red de monitoreo en humedal Parque Valle del Yeso<sup>3</sup>.

<sup>3</sup> Figura incluye además la ubicación de parcelas de exclusión para monitoreo de vegetación (ver sección III.1.c)

Todos los puntos de monitoreo - incluyendo flujo superficial y pozos - fueron equipados con sensores de presión con registradores de datos (Solinst Levelloggers). Los niveles de agua se registraron a intervalos de 15 minutos para los flujos superficiales y a intervalos de 3 horas para las aguas subterráneas.

En adición, fueron instalados dos perfiles verticales para medición de temperatura del suelo, uno en el humedal Casa Piedra y el segundo en el Parque Valle del Yeso donde se midieron las temperaturas en 7 intervalos de profundidad del suelo (2 cm, 10cm, 25cm, 50cm, 75cm, 1m y 1,5m) y en la superficie del terreno cada 12 horas.

## 1.2.2 Resultados

### Casa Piedra

El régimen hidrológico del flujo superficial en humedal Casa Piedra tiene flujos altos entre mediados de noviembre y mediados de marzo. El flujo máximo ocurre a mediados de febrero. Los flujos más bajos se observan entre finales de septiembre hasta principios de octubre, con una rápida recuperación de los flujos desde finales de octubre hasta principios de enero. Los caudales varían desde un mínimo de  $0,2 \text{ m}^3/\text{s}$  hasta  $1,75 \text{ m}^3/\text{s}$ . Hubo una diferencia significativa entre 2015 y 2016, donde el 2015 tuvo picos de flujo más altos en febrero y luego una disminución rápida a caudales bajos de  $0,2 \text{ m}^3/\text{s}$ , mientras que 2016 tuvo un flujo pico más bajo pero mantuvo flujos más altos durante todo el invierno con flujos de base en torno a  $1,0 \text{ m}^3/\text{s}$  y un aumento de los flujos en el inicio de 2017 con pico la máxima que suplantó a los  $2.3 \text{ m}^3/\text{s}$ .

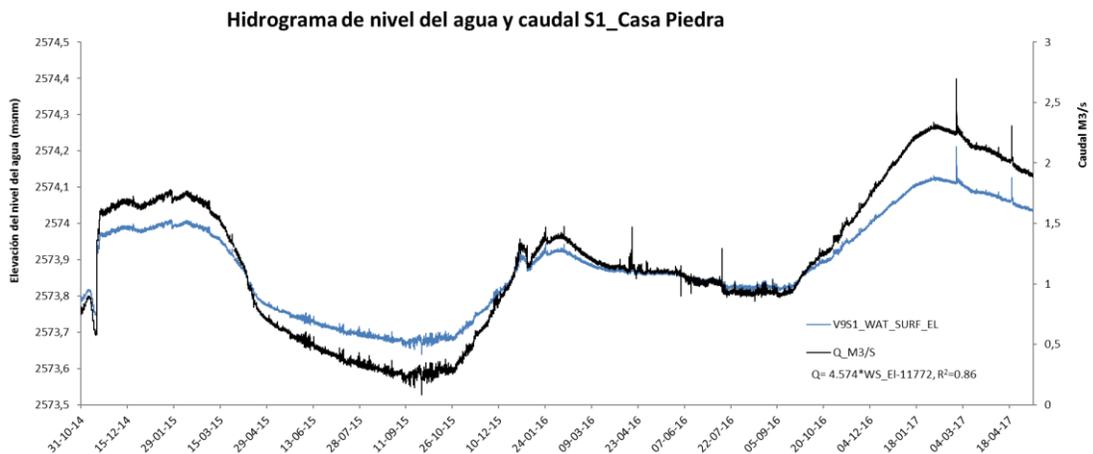


Figura 11: Hidrograma de nivel de agua y caudal en Casa Piedra, sensor 1, usando curvas de aforo derivadas de las mediciones de flujo.

Este comportamiento podría estar relacionado con la incidencia de El Niño y un retardo en la respuesta de la cuenca, pero se requieren series de tiempo más largas para corroborar esta hipótesis. Los niveles de agua subterránea en el abanico aluvial del humedal muestran un patrón monótono de desagüe y recarga, donde el nivel más alto de la capa freática se alcanza a principios de febrero y menor a principios de septiembre. Todos los pozos de ensayo a lo largo del transecto longitudinal del humedal mostraron el mismo patrón,

aunque la velocidad de agotamiento del almacenamiento de agua fue mayor en los pozos ubicados en la parte superior del transecto. Todos los pozos parecen haber alcanzado su nivel estático mínimo a principios de septiembre comenzando su recarga a partir de entonces.

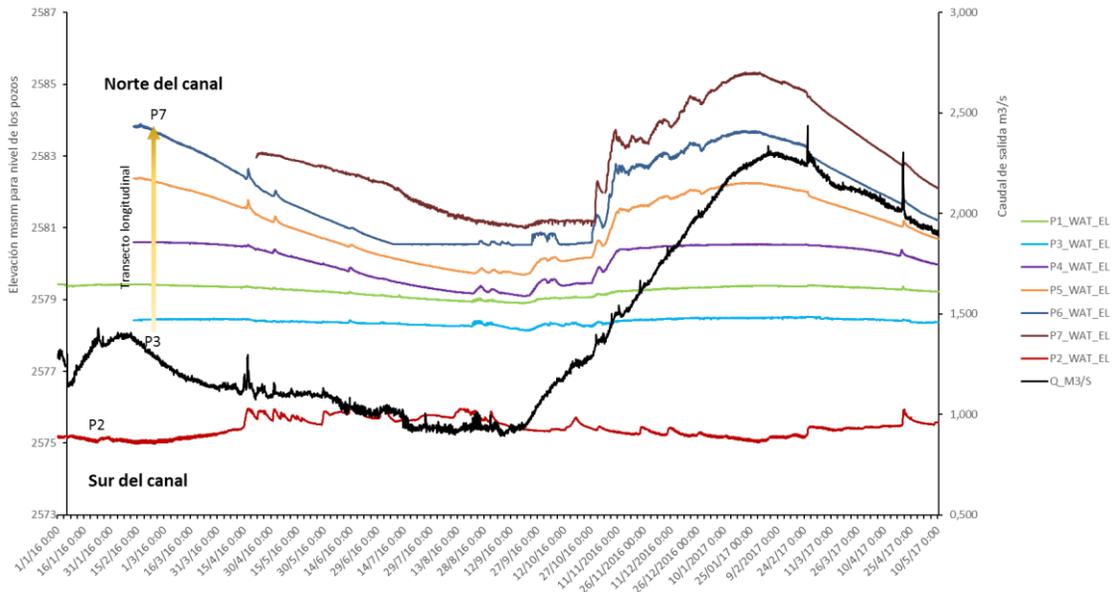


Figura 12: Hidrogramas de la napa freática y caudal superficial en el humedal Casa Piedra.

El régimen de aguas subterráneas parece estar controlando claramente el flujo superficial, por lo que el humedal actúa como un depósito de almacenamiento, acumulando agua de la nieve derretida en la primavera y regulando el flujo de salida durante la porción de secado del año. La recarga rápida del agua subterránea en el manantial y la reacción de los pozos en respuesta a los eventos de lluvia indica que los depósitos aluviales absorben muy rápidamente nuevas entradas de agua de los eventos de lluvia o flujos instantáneos debido a la rápida fusión de la nieve. Los suelos orgánicos finos y depósitos de turba densa en la parte inferior del abanico aluvial están funcionando como una presa natural que retiene el flujo entrante y almacena el agua cuesta arriba a lo largo del abanico aluvial. Esta característica es el mecanismo por el cual el humedal está regulando el flujo superficial en el sistema.

Observando la pendiente de la napa a lo largo del tiempo (figura 13) y comparándolas con el patrón de flujos superficiales, parecen indicar que el caudal superficial es controlado por el nivel de la capa freática a la altura del pozo 4, aproximadamente a la misma elevación de los resortes que dan lugar a los flujos superficiales en ambos flancos del abanico aluvial. La pendiente casi constante de la capa freática a lo largo del perfil longitudinal del abanico aluvial indica que los sistemas enteros se comportan como una sola unidad con un patrón predecible de descarga y recarga en el tiempo (figura 13). Todos los pozos alcanzaron su nivel estático (nivel mínimo estable) al mismo tiempo a fines de agosto y comenzaron a recargarse en sincronía a principios de septiembre, semanas antes de que se produjera cualquier desprendimiento de nieve. Esto parece indicar que además de la escorrentía superficial que se almacena en el suelo, también hay contribución de una gran fuente de agua subterránea que alimenta este sistema durante el año todo. Esta hipótesis es

corroborada por las diferencias en las características químicas del agua (conductividad eléctrica, pH y varias concentraciones iónicas) entre el flujo superficial de entrada en la parte superior del abanico aluvial y el agua de los manantiales que fluye en los flancos inferiores. Además, el humedal alcanza su nivel máximo de almacenaje en febrero (figura 14) durante el periodo más seco del año, resultando en los caudales más altos en el año. Con eso, el humedal produce más agua durante el periodo de sequía más intensa.

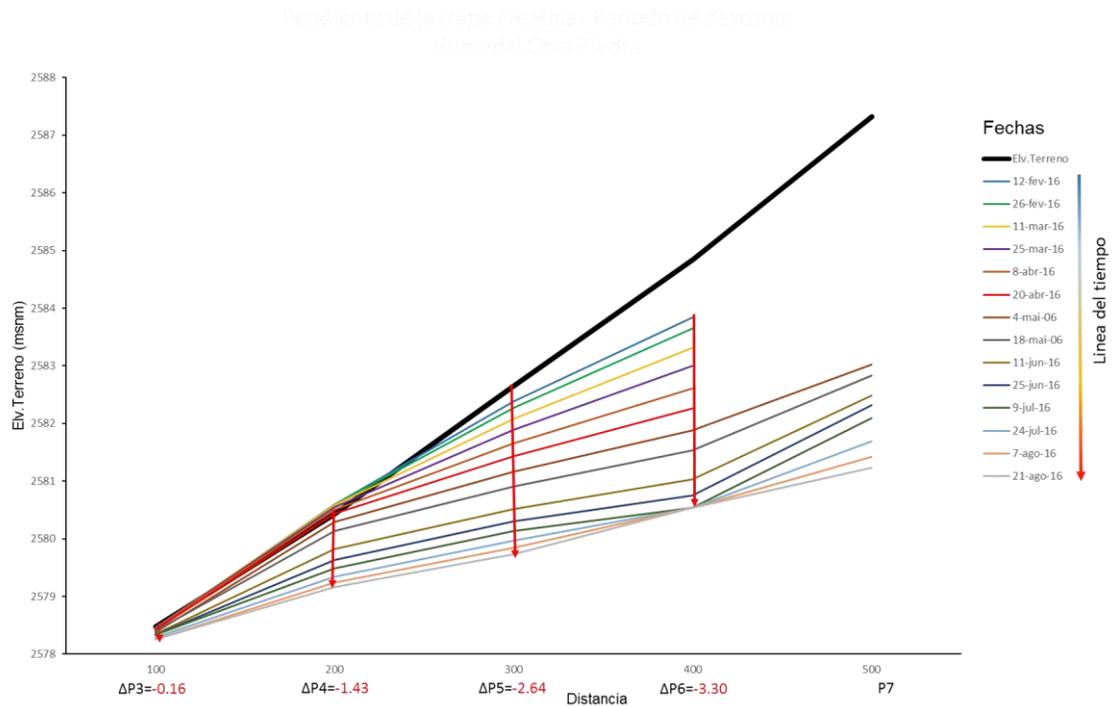


Figura 13: Pendiente de descarga de la napa freática en el humedal Casa Piedra.

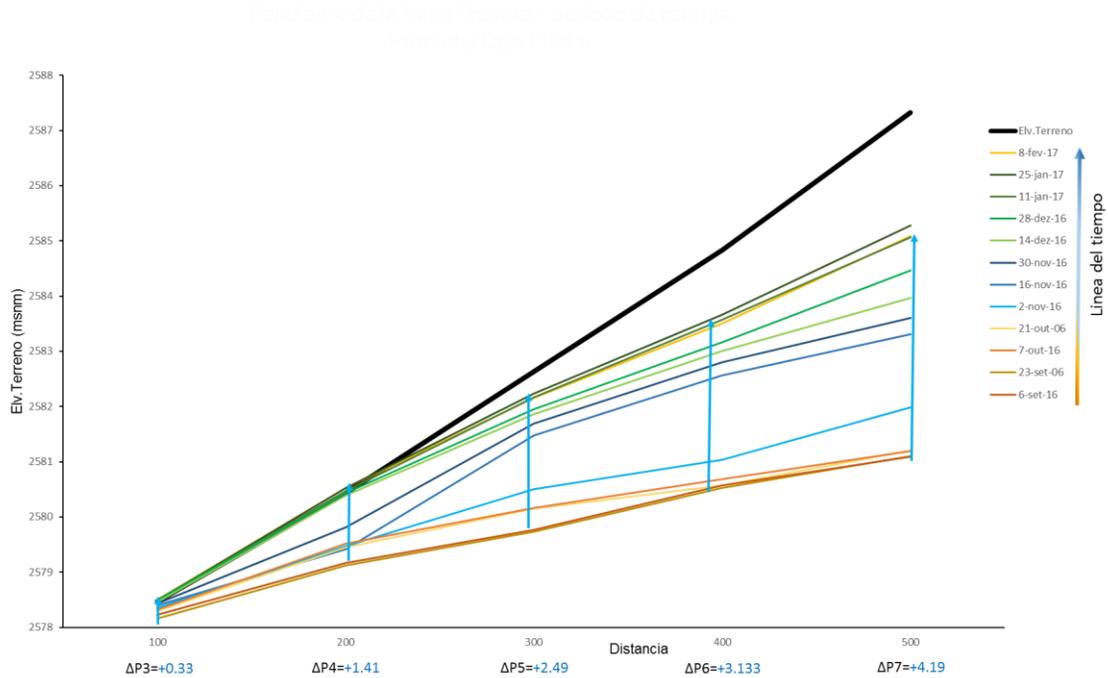


Figura 14: Pendiente de recarga de la napa freática en el humedal Casa Piedra.

### Arroyo del Aparejo

Este arroyo tiene un régimen de caudales irregular con un corto periodo de caudales altos en fines de diciembre e inicio de enero en respuesta a las altas temperaturas y subsecuente derretimiento de nieves, y un declino estable a caudales bajos que se extienden desde junio a septiembre (figura 15).

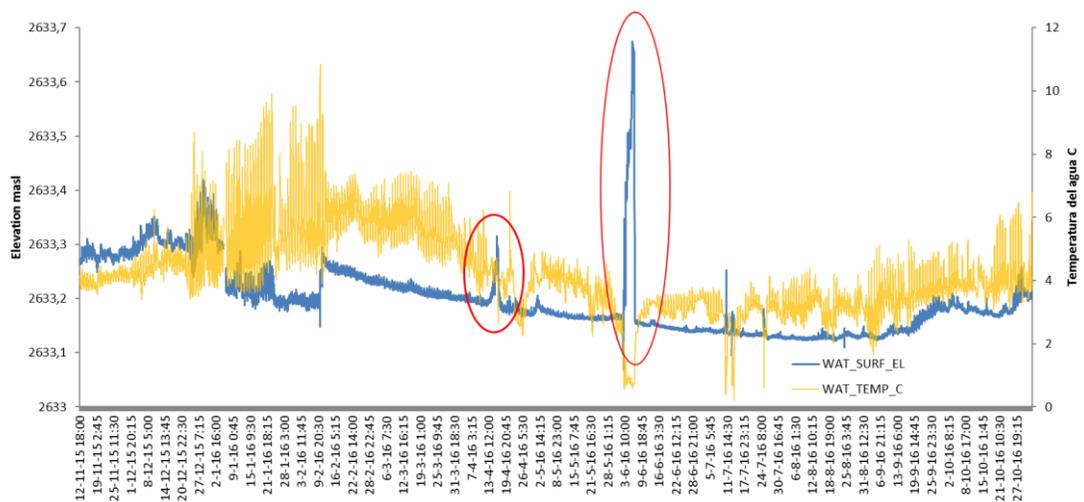


Figura 15: Hidrograma río Aparejo.

Este arroyo es caudaloso y parece estar respondiendo principalmente a los insumos de precipitación superficial, con poca o ninguna contribución del agua subterránea. Debido a que no hay ningún humedal asociado con el abanico aluvial en esta cuenca, no observamos ninguna indicación de que haya almacenamiento de agua subterránea y posterior regulación de flujo. Esto se puede ver en la trama común de la figura 16 que contiene el patrón de flujo de Casa Piedra y Aparejo.

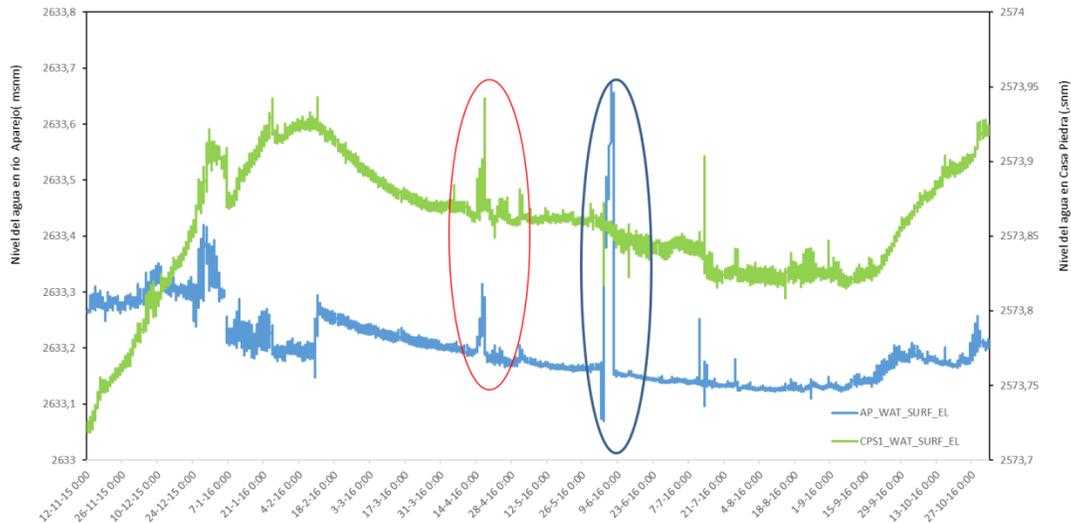


Figura 16: Comparación de patrones de flujo entre Arroyo del Aparejo y Casa Piedra, círculo rojo indica evento de alta precipitación e círculo azul es un evento de alto flujo en el invierno probablemente relacionado a una avalancha.

La propiedad de regulación de flujo se puede ver en la mantención en el tiempo de flujos altos en Casa Piedra durante los meses de verano en comparación con Aparejo, que muestra una rápida disminución de los flujos poco después de que la nieve de primavera se derrita. Ambos sistemas responden rápidamente a eventos extremos de precipitación, aunque la amplitud de la respuesta es mayor en Aparejo. Con el fin de explorar más a fondo las diferencias entre estos dos sistemas, se requeriría la adición de pozos de monitoreo en el abanico aluvial de Aparejo y comparar el régimen de aguas subterráneas con el observado en Casa Piedra.

### Campamento Minero

El régimen hidrológico del humedal de Campamento Minero fue mayoritariamente invariable tanto para la escorrentía superficial como para el agua subterránea, a lo largo de todo el año, con pequeñas oscilaciones probablemente causadas por eventos de precipitación (Figura 17).

Este patrón es consistente con un sistema que se abastece de agua subterránea, siendo esperable que tenga pequeñas variaciones. Sin embargo, el nivel del agua subterránea mostró una perturbación significativa, con una disminución instantánea del nivel de 0,185 m en 3 horas y se mantuvo en este nivel durante 24 días, volviendo luego de este periodo a mostrar una oscilación normal (Figura 18).

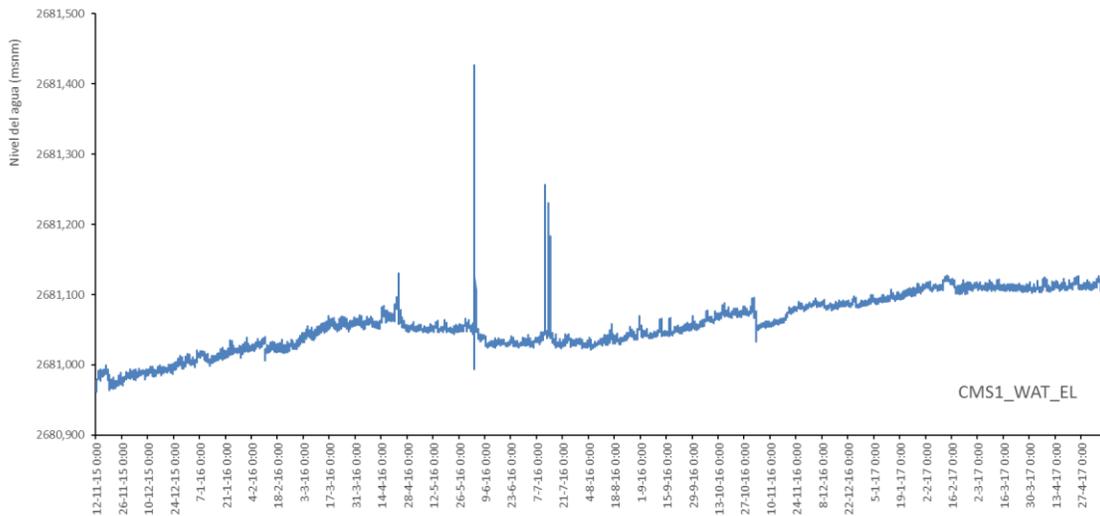


Figura 17: Hidrograma de escorrentía superficial del humedal del Campamento Minero.

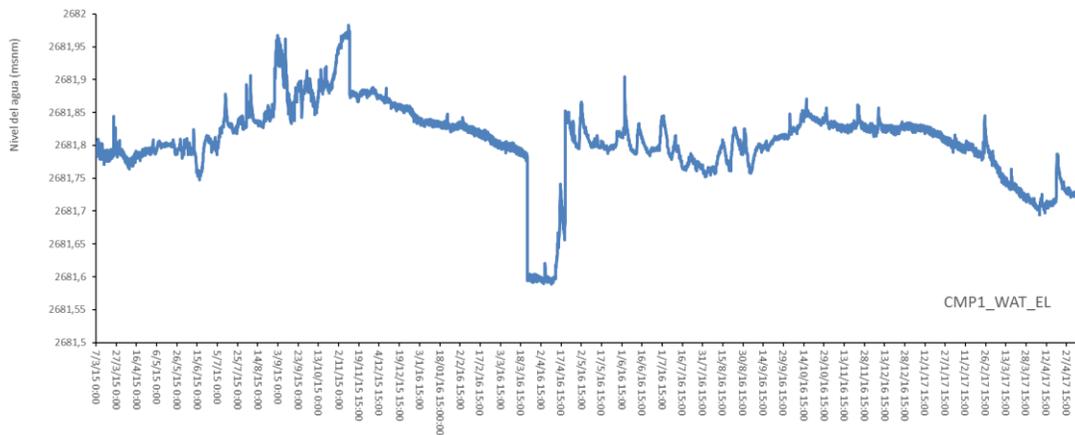


Figura 18: Régimen hidrológico de la napa freática en el humedal Campamento Minero.

No se sabe qué puede haber causado esta perturbación, pero la proximidad de este sitio a la operación de la mina de yeso puede sugerir que podría estar relacionado con las actividades mineras, o con alteraciones del canal de drenaje del humedal, lo que pudo provocar una rápida disminución en el nivel freático. Este sistema de humedales no parece tener una capacidad importante de almacenamiento de agua subterránea y mantiene su régimen estable debido a la constante entrada de agua de manantial.

### Parque Valle del Yeso

El humedal de Parque Valle del Yeso tiene una hidrología de aguas subterráneas compleja donde 2 de los pozos de monitoreo (PYP2 y PYP3) tienen una descarga/recarga similar, aunque PYP2 tiene una amplitud de variación de 2,07 m y PYP3 de 1,04 m, pero se

encuentran en los extremos opuestos del humedal, uno en la terraza de elevación más alta y el otro en la más baja. El tercer pozo, PYP1, que se encuentra en la terraza inferior y adyacente al PYP2, tiene un régimen hidrológico distinto con una amplitud de 1,08 m similar al PYP3. Los tres pozos se recargaron muy rápidamente a finales de septiembre de 2015 durante el derretimiento inicial de la nieve. Sin embargo, mientras que PYP2 y PYP3 oscilaron en el nivel durante el verano y el otoño de 2016 y tuvieron posteriormente una recarga rápida en septiembre, PYP1 permaneció con un nivel casi constante que se mantuvo hasta noviembre de 2016. En esta etapa no está claro por qué se da esta diferencia, es necesario continuar los esfuerzos de investigación para responder esta pregunta.

La evidencia parece indicar que este humedal tiene cierta capacidad de almacenamiento de agua subterránea y regula el flujo de salida, sin embargo, las breves series temporales disponibles y el hecho de que la mayoría de los datos fueron tomados durante un periodo de influencia del fenómeno de El Niño (2015-2016) es un factor que dificulta la elaboración de conclusiones robustas. Se requiere una mayor recolección de datos con series temporales más largas para poder evaluar mejor las propiedades de almacenamiento de agua de este humedal.

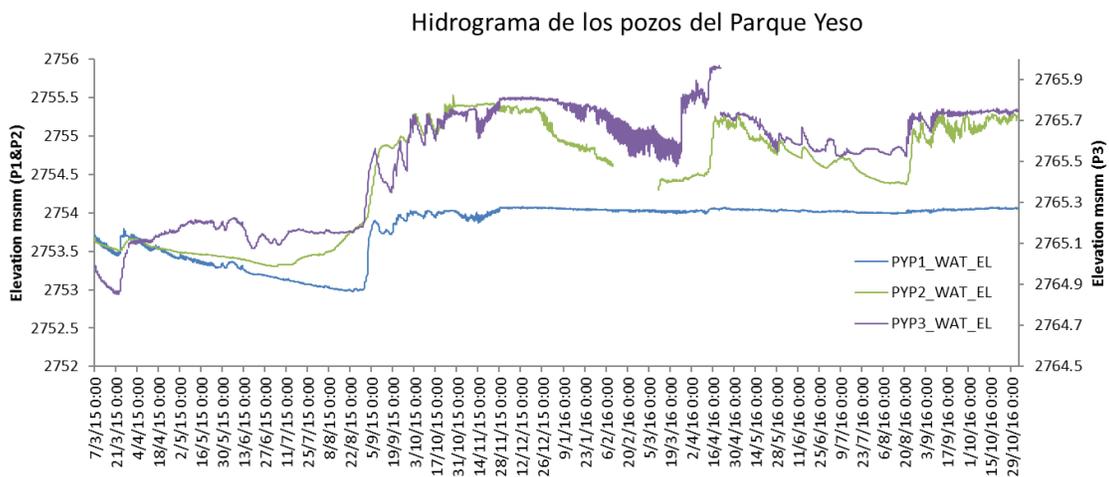


Figura 19: Régimen hidrológico de la napa freática en el humedal del Parque Valle del Yeso.

### 1.2.3 Desafíos y siguientes pasos

La recolección de datos en todos los sitios, excepto en el Campamento Minero, debería extenderse con el objetivo de obtener series de tiempo más largas que permitan una mejor comprensión de la dinámica hidrológica de los humedales de montaña en la cuenca del Yeso. El análisis adicional de la calidad del agua, trabajo actualmente en curso, y el análisis isotópico para determinar la edad del agua que sale del humedal pueden mejorar sustancialmente la interpretación de las fuentes de agua contribuyentes. Es esencial continuar con las mediciones de flujo de rutina para obtener curvas de aforo consistentes, y así poder estimar el patrón de los flujos con mayor precisión. Además, la instalación de pozos adicionales para el monitoreo de aguas subterráneas a lo largo del abanico aluvial del Arroyo del Aparejo mejoraría mucho nuestra capacidad de comparar su régimen con el

humedal de Casa Piedra. Se debe hacer un esfuerzo para suprimir el pastoreo en la Casa Piedra durante varios años para que la vegetación de los humedales se recupere del severo talaje al cual ha estado sometido durante muchos años. Esto proporcionaría información importante sobre cómo estos sistemas reaccionan en ausencia de pastoreo y cómo la vegetación ayuda a crear retener el suelo de la erosión y mejorar aún más la capacidad de almacenamiento de agua.

El elevado número de turistas, vehículos todoterreno y la incidencia del ganado han sido un reto importante para mantener el sistema de monitoreo funcionando adecuadamente. Hemos tenido varios actos de vandalismo que dañaron o robaron equipos, a pesar de la instalación de carteles indicando que este sistema es un proyecto de investigación. Los actos de vandalismo son un problema grave porque eliminan o alteran la posición de los sensores, que a su vez producen datos falsos que tienen que ser descartados con la consecuente pérdida de información relevante. Los pozos y las cámaras trampa fueron dañados por los caballos y el ganado, lo que dificulta el funcionamiento del sistema y la adquisición de los datos según lo previsto, y nos robaron sensores con informaciones valiosas que no podemos sustituir, a pesar de que se tomaron medidas de protección. El funcionamiento y mantenimiento del sistema también requiere una atención especial y se debe desarrollar una capacidad especializada para atender las demandas.

### 1.3 Monitoreo de la vegetación

#### 1.3.1 Metodología

Para caracterizar la vegetación presente en los sitios de estudio, se determinó la composición botánica en la primera temporada. La identificación de especies se realizó mediante una guía de campo y registro fotográfico para análisis de gabinete. En los casos en que fue necesario, se efectuaron colectas de especímenes para su identificación en laboratorio. Lo anterior, permitió generar una línea base de las especies presentes en los humedales.

Para los tres sitios de estudio se implementó un total de 39 Parcelas Experimentales (PE), de las cuales 25 estuvieron orientadas a medir recuperación pasiva y 14 para medir propagación asistida. Puesto que en la superficie de cada humedal se encontraron diferencias en la cobertura debido al pisoteo del ganado o el tránsito de vehículos, se determinaron dos categorías para el muestreo: mayor y menor tránsito (Cuadro 1).

Para estimar la cobertura vegetal en lugares con niveles de cobertura homogéneos en cada uno de los tres humedales seleccionados, se realizó un muestreo aleatorio estratificado. Para determinar los puntos de muestreo se aplicó el concepto de grilla cuadrangular espaciada cada 20 m (Figura 20), cubriendo la extensión de cada humedal (Manly, 1992; Brower *et al.*, 1998; Pulido *et al.*, 2011). En cada punto de muestreo se utilizó luego un marco de 2x2 m, grillado con espaciamiento de 20x20 cm (Figura 21), dando una cuadrícula total de 100 puntos de medición.



Figura 20: Esquema de muestreo de cobertura, cada 20 m (@Universidad de Chile, 2016).

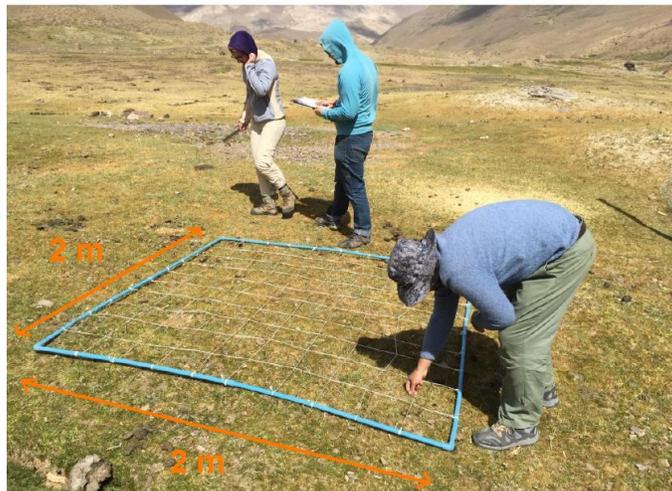


Figura 21: Marco para estimación de cobertura (@Universidad de Chile, 2016).

Las coberturas medias para cada humedal y condición de tránsito se presentan en el Cuadro 1 a continuación.

Cuadro 1: Coberturas medias según humedal y condición de tránsito (Fuente: Universidad de Chile, 2016).

Humedal	Cobertura (%)	
	Mayor tránsito	Menor tránsito
Casa Piedra - Delante de la morrena	15	30
Casa Piedra - Detrás de la morrena	70	100
Campamento Minero	50	90
Parque Valle del Yeso	30	70

Luego, para cada humedal e intensidad de tránsito se evaluaron algunas propiedades morfológicas de suelo para determinar el sitio apropiado para instalar las parcelas experimentales.

Adicionalmente, se caracterizaron las propiedades morfológicas del suelo. En las zonas identificadas con coberturas vegetales homogéneas se determinaron las siguientes

propiedades morfológicas: textura, color (en húmedo), pedregosidad y rocosidad. Estas propiedades permiten inferir el comportamiento de los suelos en términos de la facilidad de enraizamiento, la conducción y almacenamiento de agua. Estas variables son importantes para el desarrollo vegetal (Porta *et al.*, 1994; Schoeneberger, *et al.*, 2002; Brady and Weil, 2008).

Algunas propiedades fueron determinadas mediante pruebas de campo, mediante muestras obtenidas con barreno a profundidades entre 0-50 cm (Figura 22). La pedregosidad y rocosidad fueron determinadas en superficie.



Figura 22: Muestras de suelo obtenidas a través de barreno (@Universidad de Chile, 2016).

Las propiedades morfológicas del suelo en los tres humedales son similares (Cuadro 2), por lo tanto, se puede inferir que el comportamiento en términos de enraizamiento y la conducción y almacenamiento de aguas sería similar.

Cuadro 2: Propiedades morfológicas del suelo en tres vegas estudiadas (Fuente: Universidad de Chile, 2016).

Humedal	Condición de tránsito	Profundidad 0 - 50 cm					
		Textura	Color (húmedo)	Pedregosidad		Rociedad	
				Perfil	Superficie	Perfil	Superficie
Casa Piedra delante de la morrena	Mayor	Fa	10 YR 4/2	15% a 20 cm Grava	1% aislado	0%	0%
	Menor	Fa	10 YR 4/2	15% a 20 cm Grava	1% aislado	0%	0%
Casa Piedra detrás de la morrena	Mayor	FAa	10 YR 3/2	10% a 20 cm Guijarros	5% aislado	0%	Afloramientos aislados
	Menor	FAa	10 YR 3/2	10% a 20 cm Guijarros	5% aislado	0%	Afloramientos aislados
Campamento Minero	Mayor	FL	10 YR 4/3	5% a 20 cm Grava	0%	0%	Afloramientos aislados
	Menor	FL	10 YR 4/3	5% a 20 cm Grava	0%	0%	Afloramientos aislados
Parque Valle del Yeso	Mayor	FA	2.5 Y 3/2	30% a 30 cm Guijarros	0%	0%	Afloramientos aislados
	Menor	Faa	2.5 Y 2.5/2	30% a 20 cm Guijarros	5% aislado	0%	Afloramientos aislados

#### A. Método para la recuperación pasiva de humedales

El pastoreo durante la primavera y el verano, así como el tránsito vehicular en los humedales generan pérdidas de cobertura vegetal. Uno de los propósitos de este proyecto es determinar la tasa de recuperación pasiva de la vegetación, que consiste en la exclusión de las perturbaciones (ganadería, vehículos) en un área determinada, permitiendo que esta se recupere por sus propios medios (Martinez, 1996; Teuber *et al.*, 2006; Bochet *et al.*, 2011).

Las parcelas de exclusión de 6 x 6 m permiten excluir el pastoreo y el pisoteo del suelo se en cada uno de los sitios de estudio y para cada una de las dos condiciones de tránsito descritas, sin embargo, es necesario hacer las siguientes salvedades:

- Para evitar un impacto negativo en el paisaje, se acordó instalar solo 2 repeticiones en el sitio de estudio Parque Valle del Yeso.
- Por condiciones particulares del sitio Campamento Minero, se decidió instalar 3 parcelas adicionales para medir el comportamiento en las zonas donde existe un desnivel (corte) de aproximadamente 50 cm, la cual no se presenta en otros sitios

Las 25 parcelas experimentales instaladas se distribuyen se la siguiente manera:

Cuadro 3: Cantidad de parcelas experimentales para medir recuperación pasiva de vegetación (Fuente: Universidad de Chile, 2016).

Humedal	Condición de tránsito		Situación de corte
	Mayor	Menor	
Casa Piedra delante de la morrena	3	3	-
Casa Piedra detrás de la morrena	3	3	-
Campamento Minero	3	3	3
Parque Valle del Yeso	2	2	-

El proceso de instalación de las parcelas comenzó a fines de enero y se concluyó a mediados de Febrero (2015). Las mediciones de cobertura para la instalación de las mismas y como primer dato de trabajo se efectuaron el día 26 de enero del 2015.

Al interior de las parcelas se ha medido mensualmente<sup>4</sup> el porcentaje de cobertura vegetal, utilizando una grilla de 2 x 2 m (Figura 23) (Manly, 1992; Ramirez *et al.*, 1997; Brower *et al.*, 1998; Farfan *et al.*, 2000; Fredericksen, 2010; Pulido *et al.*, 2011). De igual modo, se mide una zona de control al exterior de las parcelas, siempre a 2 m del borde norte (Figura 24).

<sup>4</sup> Durante el periodo en que las condiciones climáticas permitan el acceso, usualmente durante septiembre-mayo.



Figura 23: Medición de la cobertura al interior de las exclusiones (@Universidad de Chile, 2016).



Figura 24: Mediciones de cobertura en la zona de control de cada exclusión (@Universidad de Chile, 2016).

Adicionalmente, en cada parcela se determinó la producción de biomasa vegetal. Para ello, se establecieron de modo aleatorio 3 cuadrantes de  $0,01 \text{ m}^2$  en los bordes internos de las parcelas (A). Dentro de estos cuadrantes se recolectó la vegetación, se envasó en bolsas de papel (previamente masada) y se masó en terreno, lo que representó la masa fresca (MF) (Ramirez *et al.*, 1997; Farfan *et al.*, 2000; Franco *et al.*, 2006).

Luego, en laboratorio las muestras se secaron en una estufa por 48 horas a  $105^\circ\text{C}$  para obtener la masa seca (MS). Al comparar las masas frescas y secas, se obtuvo el porcentaje de humedad (%H). Posteriormente, se estimó la producción de biomasa por metro cuadrado (P). Finalmente, se midió la altura de la vegetación (mínima y máxima) mediante el uso de una regla, en 4 puntos del marco  $2 \times 2 \text{ m}$ , tanto al interior como en el testigo exterior de cada parcela. Esto se realizó con el objeto de medir la producción de biomasa vegetal y determinar su variación a lo largo del tiempo.

Las mediciones de cobertura vegetal fueron comparadas mediante un análisis de varianza. Esto con el fin de establecer si es que existe un efecto de los distintos niveles de perturbación del suelo sobre las propiedades analizadas.

Luego se determinó la existencia de diferencias estadísticamente significativas, para lo cual se realizó una prueba de comparaciones múltiples (PCM) (Tukey) entre las medias de los niveles, comparadas con un valor crítico.

## **B. Método para la propagación activa de humedales**

Algunas zonas de los humedales han quedado desprovistas de vegetación, ya sea porque los cauces naturales cambiaron de posición o por causa del talaje y tránsito. Una de las actividades que se han desarrollado es el replante de champas y el desvío de cauces para irrigación de las parcelas. Esta técnica permite acelerar el proceso de colonización de especies vegetales, ya sea mediante la incorporación directa de semillas/esquejes, o bien la implantación de individuos vivos (champas). El éxito de esta práctica está ligado a factores tales como el clima, las características del suelo, la orientación y pendiente, la disponibilidad de agua y la humedad del suelo, entre otras (Rondon y Vidal, 2005; Bochet *et al.*, 2011; Martinez *et al.*, 2012).

Se realizaron 3 tratamientos: 1) riego gravitacional, para lo cual se han desviado cauces o bien cavado zanjas que permitan la irrigación constante; 2) riego gravitacional y el replante de champas; y 3) riego por capilaridad, emplazado en zonas con altos niveles de acumulación de sales en superficie.

En cuanto a la colecta y replante de champas, se buscaron continuos vegetacionales en las inmediaciones de las parcelas de expansión asistida. Las champas seleccionadas mantienen la composición florística del entorno. Se extrajeron champas de tamaños variables que luego fueron implantadas en las esquinas contrarias a los accesos de las parcelas, en sitios específicos que permiten determinar el éxito o no del replante.

Así, se establecieron 14 parcelas cercadas de 6 x 6 m (Cuadro 4). Cabe destacar que en el invierno de 2015 una avalancha sepultó una de las parcelas en Casa Piedra.

Cuadro 4: Parcelas experimentales para medir propagación activa de vegas (Fuente: Universidad de Chile, 2016).

Unidad homogénea	Tratamiento A	Tratamiento B	Tratamiento C
	(repeticiones)	(repeticiones)	(repeticiones)
Casa Piedra	1	1	3
Campamento Minero	3	3	-
Parque Valle del Yeso	1	1	-

En cada parcela se midió periódicamente el porcentaje de cobertura vegetal y su altura. En términos específicos, se evaluó el estado del replante (se encuentra turgente, seco o podrido), permitiendo medir el éxito del replante.

La variación de la cobertura vegetal fue comparada mediante un análisis de varianza. Esto tiene por objetivo establecer si es que existe un efecto de los distintos tratamientos sobre la expansión de humedales. Posteriormente se realizó una prueba de comparaciones múltiples para comprobar la existencia de diferencias significativas entre los tratamientos A y B, mediante un test de Tukey.

### C. Mediciones de suelo

Los suelos, en función de sus propiedades físicas y contenido de materia orgánica, son capaces de almacenar agua. Esta, proviene desde las precipitaciones y su posterior infiltración, o bien desde las aguas subterráneas cercanas a la superficie. Independiente de donde provenga, es conducida y almacenada por los poros. En consecuencia, la velocidad y/o facilidad del flujo tendrá relación con la cantidad y tipo de poros, que a su vez dependerá de la compactación del suelo (Porta *et al.*, 1994; Schoeneberger, *et al.*, 2002; Hillel, 2003; Dexter, 2004a, b; Brady *and* Weil, 2008).

Se realizaron calicatas y barrenos descriptores en cada humedal (Cuadro 5) con el fin de determinar las características físicas y morfológicas del pedón, tales como: color (en húmedo), clase textural, estructura, presencia de raíces y poros, pedregosidad, características de los límites de cada horizonte, presencia de carbonatos (reacción positiva HCl), óxidos o reducciones, entre otros (Porta *et al.*, 1994; Schoeneberger, *et al.*, 2002; Brady *and* Weil, 2008). Adicionalmente, las calicatas han sido complementadas con una serie de barrenos para detectar variaciones espaciales de algunas de estas propiedades.

Para cada horizonte, estrata o capa detectada en las calicatas descriptoras, se calculó el espacio poroso. Para ello se extrajo una muestra no disturbada mediante cilindros, a partir de los cuales se determinó en laboratorio la densidad aparente y la densidad real (Dane y Topp, 2002). Con estas muestras se midieron cambios en la densidad aparente (que determina la compactación debido al paso de vehículos y animales) (Porta *et al.*, 1994; Dane y Topp, 2002; Schoeneberger, *et al.*, 2002; Brady *und* Weil, 2008).

A partir de ello, se procedió a determinar propiedades físicas de las muestras tales como: densidad real mediante el método del picnómetro, densidad aparente mediante el método del cilindro y el método del terrón, de acuerdo a la metodología descrita por Dane y Topp (2002). Con los resultados de densidad aparente del cilindro (Dac) y la densidad real (Dr) se calculó el espacio poroso, el cual expresa el volumen de poros en relación al volumen de los sólidos del suelo.

Cuadro 5: Calicatas y barrenos en humedales (Fuente: Universidad de Chile, 2016).

Humedal	Tipo muestreo	Ubicación geográfica (UTM 19 h)	Observación
Casa Piedra delante de la morrena	Calicata inferior 1	404827 E, 6278860 S	Zona con acumulaciones superficiales de sales, superficie plana con pendiente inferior al 2%. Destaca evidencia de compactación.
	Calicata inferior 2	405150 E, 6278929 S	Zona con acumulaciones superficiales de sales, superficie plana con pendiente inferior al 2%. Destaca evidencia de compactación y concentraciones calcáreas en el perfil.
	Barreno inferior oriente 1	404929 E, 6278861 S	Desarrollado a 100 metros al oriente de la calicata inferior 1.
	Barreno inferior poniente	404728 E, 6278806 S	Ejecutado a 100 metros al poniente de la calicata inferior 1.
	Barreno inferior sur	404851 E, 6278814 S	Ejecutado a 50 metros al sur de la calicata inferior 1.
	Barreno inferior oriente 2	405212 E, 6278986 S	Ejecutado a 100 metros al oriente de calicata inferior 2 y 100 metros del cerro.
Casa Piedra detrás de la morrena	Calicata superior 1	404823 E, 6279275 S	Zona con presencia de materia orgánica en descomposición. Se establece en el punto medio del micro valle 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.
	Calicata superior 2	404850 E, 6279176 S	Se desarrolla en una zona que comparte las características de la calicata superior 1, pero en suelo más saturado y con un mayor grado de descomposición de la materia orgánica.
	Barreno superior oriente	404922 E, 6279202 S	Ejecutada a 100 metros al oriente de calicata superior 2 y 50 metros del cerro.
	Barreno superior poniente	404603 E, 6279179 S	A 250 metros al poniente de calicata superior 2 y 50 metros del cerro.
	Barreno superior norte	404786 E, 6279311 S	A 50 metros aguas arriba de la calicata superior 1.
	Barreno superior sur	404841 E, 6279227 S	Establecido a 50 metros aguas abajo de la calicata superior 1.
Campamento Minero	Calicata media	409451 E, 6280491 S	Establecida en una superficie plana con pendiente inferior al 2%. Destaca la saturación del perfil.
Parque Valle del Yeso	Calicata inferior 1	411488 E, 6278580 S	Se establece en una zona plana con pendiente inferior al 2% y con evidencia de alto nivel de tránsito.
	Calicata superior 1	411490 E, 6278593 S	Se ubica en una zona con pendiente 20 a 30%, en un plano inclinado y ondulado con presencia de zanjas de erosión hídrica pre-canalizada superficial.
	Barreno inferior	411412 E, 6278554 S	Establecido a 65 metros al sur de la Calicata inferior 1. Zona saturada.
	Barreno superior	411482 E, 6278653 S	Establecido a 25 metros al norte de la Calicata superior 1. Zona saturada.

Conociendo el espacio poroso, se pudo estimar el volumen de agua que es capaz de almacenar el suelo (Hillel, 2003). A partir de las muestras no disturbadas, también se estimó una curva característica de retención de agua, equilibradas a tensiones de 33 y 1.500 kPa, de acuerdo a lo señalado por Dane y Topp (2002) y Hartge *und* Horn (2009).

Tensiones inferiores a los 33 kPa indican agua libre, la que se moviliza en el perfil del suelo. Las tensiones entre los 33 y 1.500 kPa corresponden a agua retenida, la cual se encuentra almacenada en el suelo y puede ser utilizada por las plantas. Finalmente, tensiones superiores a los 1.500 kPa, corresponden a aguas inmovilizadas, siendo incapaces de ser absorbidas por las plantas (Porta *et al.*, 1994; Brady *and* Weil, 2008; Hartge *und* Horn, 2009). Esto permitirá saber que fracción del agua retenida por los poros corresponde específicamente a agua libre, agua almacenada y agua inmovilizada.

Finalmente se realizaron pruebas de infiltración mediante cilindros infiltrómetros en los suelos asociados a las calicatas descritas previamente. En esta prueba se midió la velocidad de infiltración, así como la columna de agua infiltrada, lo que permitió observar la facilidad o dificultad con que el flujo de agua ingresa al suelo (Porta *et al.*, 1994; Schoeneberger, *et al.*, 2002; Hillel, 2003; Dexter, 2004a, b; Brady *and* Weil, 2008).

### 1.3.2 Resultados

Las mediciones de cobertura vegetal abarcan el periodo entre enero de 2015 a octubre del 2016. A continuación, se detallan los datos de cobertura vegetal de las exclusiones.

#### A. Recuperación pasiva de humedales

##### 1. Sitio de estudio Casa Piedra - delante de la morrena.

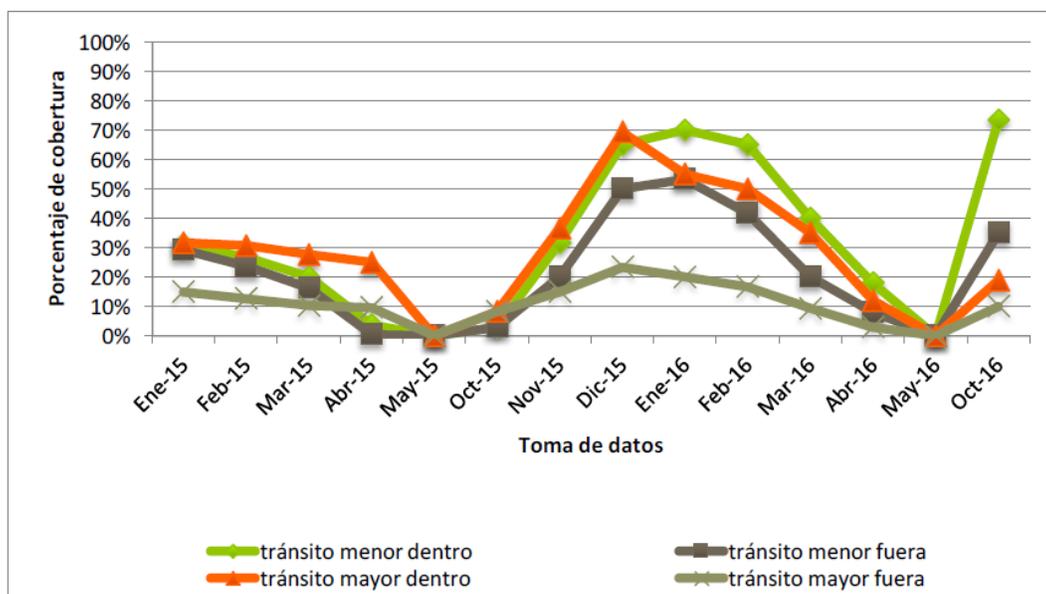
###### a. *Evolución de la cobertura vegetal*

La fracción del humedal Casa Piedra delante de la morrena presentó una cobertura media de 26,75% al inicio de las mediciones y de 9,73% al concluir la temporada 2014-2015. Existe una disminución mensual media de la cobertura de 5,67% ( $\pm 0,02\%$ ) (Figura 25).

En la temporada 2015-2016, el humedal comenzó con una cobertura media del 5,67%. Cabe destacar que este humedal es la que cuenta con mayor cobertura vegetal a inicios de temporada debido a la menor altitud, por lo tanto, el deshielo es más temprano y rápido. A lo anterior se suma que, hasta fines de diciembre, no había ganado en este humedal. Sin embargo, este humedal también presenta una temprana pérdida de cobertura.

El aumento de la cobertura fue abrupto, a razón de una tasa del 27,81%/mes ( $\pm 23,19\%$ ), llegando al máximo de cobertura en diciembre de 2015 con un 51,92%, manteniéndose estable hasta el mes de febrero de 2016, observándose luego un descenso en la cobertura.

La mayor cobertura se encontró al interior de las exclusiones, particularmente en las condiciones menos degradadas (tránsito menor). Al contrario, los testigos de las condiciones de mayor tránsito presentaron las coberturas más bajas, debido al paso de vehículos y al talaje de animales (Figura 25).



**Figura 25.** Evolución de la cobertura vegetal en humedal Casa Piedra – delante de la morrena (Fuente: Universidad de Chile, 2016).

Cabe destacar que en el periodo de mayor cobertura (diciembre-febrero de la temporada 2015-2016) existe una diferencia estadísticamente significativa. Esto indica que el incremento en la cobertura vegetal al interior de las parcelas, respecto del exterior (testigo), se debe a la presencia de exclusiones y la imposibilidad de paso de animales (Cuadro 6).

Cuadro 6: Pruebas de comparación múltiples para cobertura vegetal humedal Casa Piedra delante de la morrena (Fuente: Universidad de Chile, 2016).

Exclusión	Tránsito menor			Tránsito mayor		
	Cobertura media	Diferencia media	PCM	Cobertura media	Diferencia media	PCM
Dentro	62,22%	20,00%	a	58,11%	39,78%	a
Fuera	42,22%		b	18,33%		b

$$W_{T_{menor}} = 18,57$$

$$W_{T_{mayor}} = 29,07$$

### b. Biomasa vegetal

La producción de biomasa al comienzo de la temporada 2015-2016 es baja. El valor medio inicial alcanzó los 0,09 kg MS/m<sup>2</sup>, mientras que en plena temporada llegó a los 0,43 kg MS/m<sup>2</sup>, presentando un aumento del 79,07%.

La producción de biomasa en plena temporada (febrero) presenta valores similares a otros bofedales altoandinos, los que alcanzan los 0,45 kg MS/m<sup>2</sup>. Dichos bofedales altoandinos en su capacidad de producción mínima, se acercan a la cifra mínima alcanzada al inicio de la temporada de crecimiento (noviembre), alcanzando los 0,13 kg MS/m<sup>2</sup> (Alzerreca *et al.*, 2001).

La producción de biomasa de este humedal superó las condiciones posibles de encontrar en el altiplano boliviano, ya que estos solo alcanzan los 0,38 kg MS/m<sup>2</sup> (Alzerreca *et al.*, 2001).

En tanto, en la cuenca del Maipo es posible encontrar producciones de biomasa en vegas altoandinas, con valores en torno a los 0,25 kg MS/m<sup>2</sup> (Fredericksen *et al.*, 2011). Esto indica que la capacidad del humedal Casa Piedra delante de la morrena, duplica en capacidad de producción en condiciones ambientales similares.

### c. Altura vegetal

La altura está ligada al talaje del ganado, así como al pisoteo que pueda sufrir y los efectos latentes de la compactación de los suelos. Estas variables quedan en evidencia en los testigos, al presentar en todos los casos valores inferiores comparadas con la situación al interior de las exclusiones (Figura 26). Tanto al interior como al exterior de las parcelas, en el periodo de máximo crecimiento (diciembre - febrero), es posible observar importantes diferencias entre las alturas mínimas y máximas, siendo particularmente evidente la diferencia entre las máximas (Figuras 26 y 27). La diferencia se incrementa a medida que pasa el tiempo desde el punto de máximo crecimiento, lo cual indica el efecto negativo que genera el pastoreo al exterior de las parcelas.

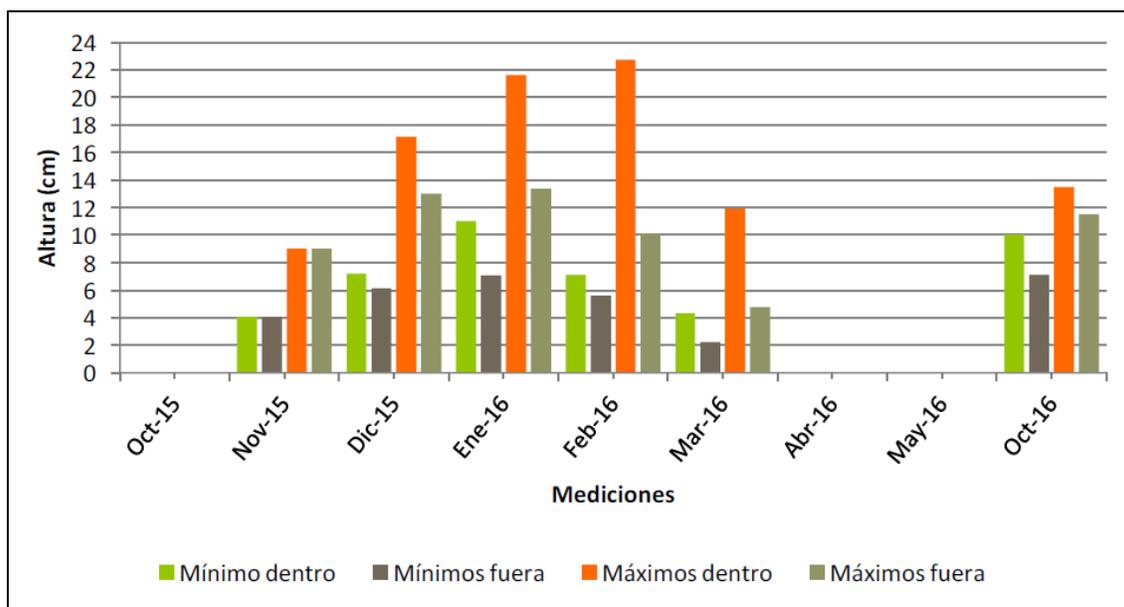


Figura 26: Alturas medias de vegetación en zonas de menor tránsito humedal Casa Piedra – delante de la morrena (Fuente: Universidad de Chile, 2016).

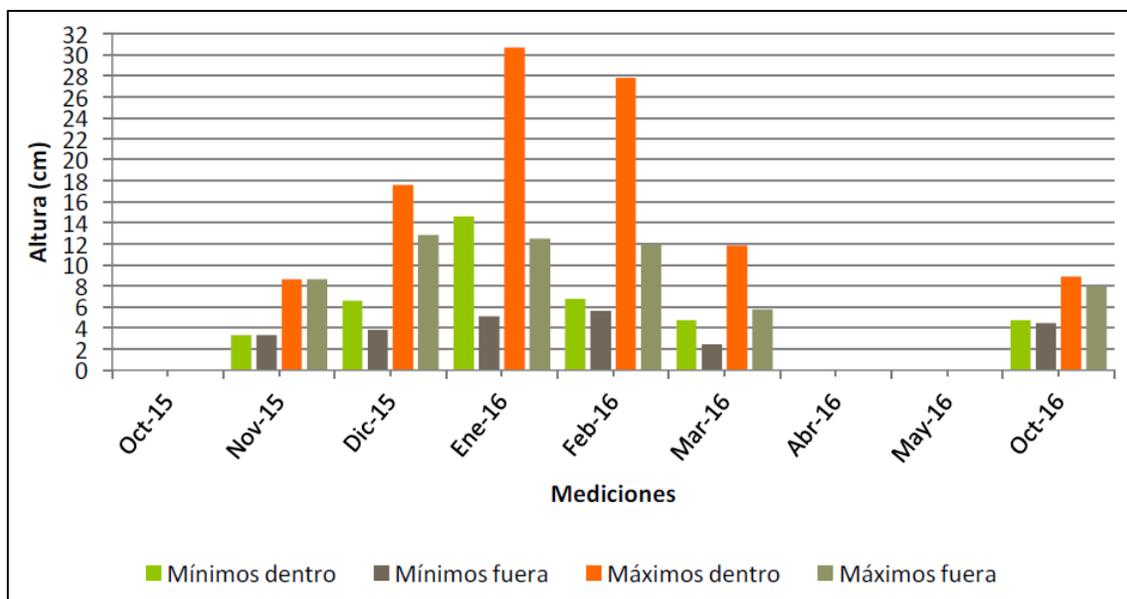


Figura 27: Alturas medias de vegetación en zonas de mayor tránsito humedal Casa Piedra – delante de la morrena (Fuente: Universidad de Chile, 2016).

## 2. Sitio de estudio Casa Piedra-detrás de la morrena.

### a. Evolución de la cobertura vegetal

El humedal detrás de la morrena presentó una cobertura media del 65% al inicio de las mediciones en la temporada 2014-2015 y de 6,75% al concluir la misma. En promedio existe una disminución mensual de la cobertura de 19,42% ( $\pm 0,16\%$ ) (Figura 28). En tanto, la temporada 2015-2016 inició con una cobertura media del 1,00%, llegando a un máximo de cobertura en enero de 2016 con un 79,25% ( $\pm 8,80\%$ ). En promedio existe un incremento mensual de la cobertura de 32,83% ( $\pm 1,30\%$ ). Entre los meses de diciembre y febrero, la cobertura se mantiene en un equilibrio relativo, luego de lo cual comienza a disminuir, llegando a un mínimo en mayo de 2016, dando paso al periodo de dormancia. Estas parcelas presentan una importante cobertura de especies raras asociadas a suelos saturados, pero sin presencia de columna de agua en superficie. En consecuencia, la menor cobertura en estas parcelas se puede atribuir a la presencia de agua en superficie, la que a enero disminuye, pero que sin embargo no generan impactos en la cobertura. Esto último se debe al inicio de la disminución de coberturas en general, debido a factores como temperatura y radiación solar.

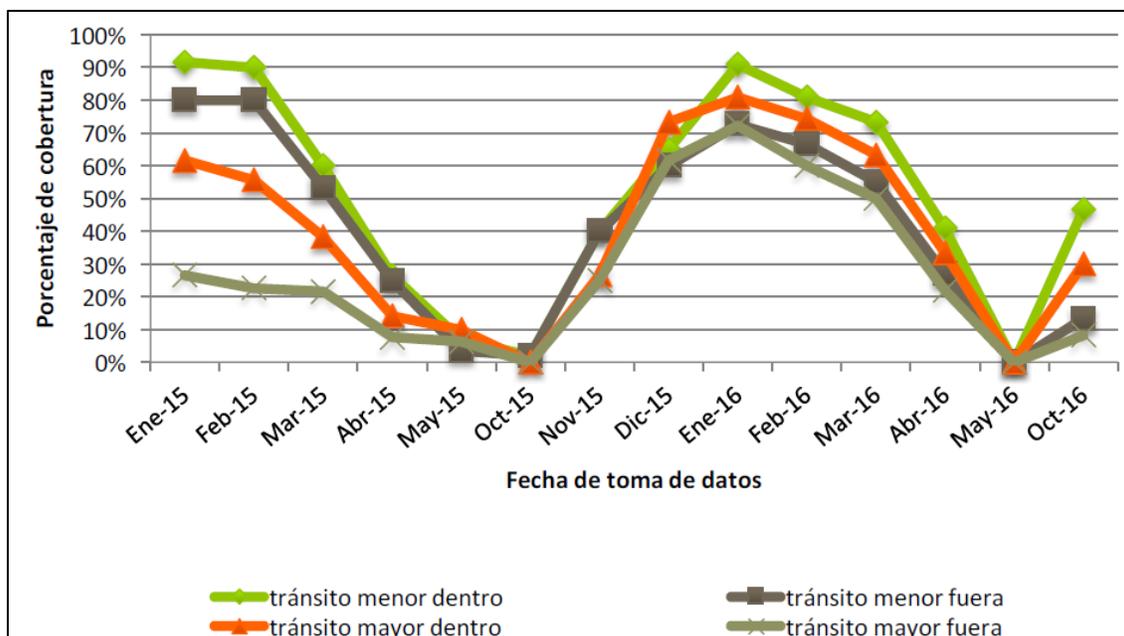


Figura 28: Evolución de la cobertura vegetal en el humedal Campamento Minero (Fuente: Universidad de Chile, 2016).

En cuanto a las diferentes condiciones de tránsito, destaca que en las zonas con menor tránsito aumentó la cobertura con mayor rapidez, a diferencia de las zonas más transitadas. Esto se debe a que, las zonas más transitadas, evidencian algunos rasgos de compactación entre 0 y 10 cm, por tanto, dificultan y desaceleran los procesos de crecimiento vegetal (Porta *et al.*, 1994; Schoeneberger, *et al.*, 2002; Hillel, 2003; Dexter, 2004a, b; Brady and Weil, 2008).

Todo lo anterior, implica que en el periodo de mayor cobertura (diciembre-febrero de la temporada 2015-2016), existen diferencias entre exclusiones y testigos, en ambas situaciones de tránsito, aunque sin presentar significancia estadística. La diferencia de cobertura en las zonas con menor tránsito es tan solo de un 12%, mientras que en las zonas con mayor tránsito, es de 11,55% (Cuadro 7).

Cuadro 7: Pruebas de comparación múltiples para cobertura vegetal humedal Casa Piedra detrás de la morrena (Fuente: Universidad de Chile, 2016).

Exclusión	Tránsito menor			Tránsito mayor		
	Cobertura media	Diferencia media	PCM	Cobertura media	Diferencia media	PCM
Dentro	77,89%	12,00%	a	77,33%	11,55%	a
Fuera	65,89%		a	65,78%		a

$$W_{Tmenor} = 43,66$$

$$W_{Tmayor} = 21,64$$

b. Biomasa vegetal

La producción de biomasa fue baja en el humedal Casa Piedra detrás de la morrena, alcanzando los 0,09 kg MS/m<sup>2</sup> al inicio de la temporada 2014-2015 y 0,28 kg MS/m<sup>2</sup> a plena producción en 2016, lo que implica un aumento del 67,86%. A diferencia del caso anterior, este humedal se encuentra por debajo de la producción media de biomasa en ecosistemas similares en el altiplano boliviano (Alzereca *et al.*, 2001), pero consistente con los valores de plena producción con vegas altoandinas de la cuenca del Maipo (Fredericksen *et al.*, 2011).

c. Altura vegetal

En tanto, las mayores alturas medias se observaron en las exclusiones de las zonas de menor evidencia de tránsito, al igual que las menores alturas medias (Figuras 29 y 30). Si solo se comparan las condiciones de menor tránsito, es posible detectar una diferencia de las alturas medias mínimas que varía entre 2,22 y 8,77 cm, mientras que en las alturas medias máximas, los rangos de diferencia son mayores, variando entre 0 y 18,49 cm.

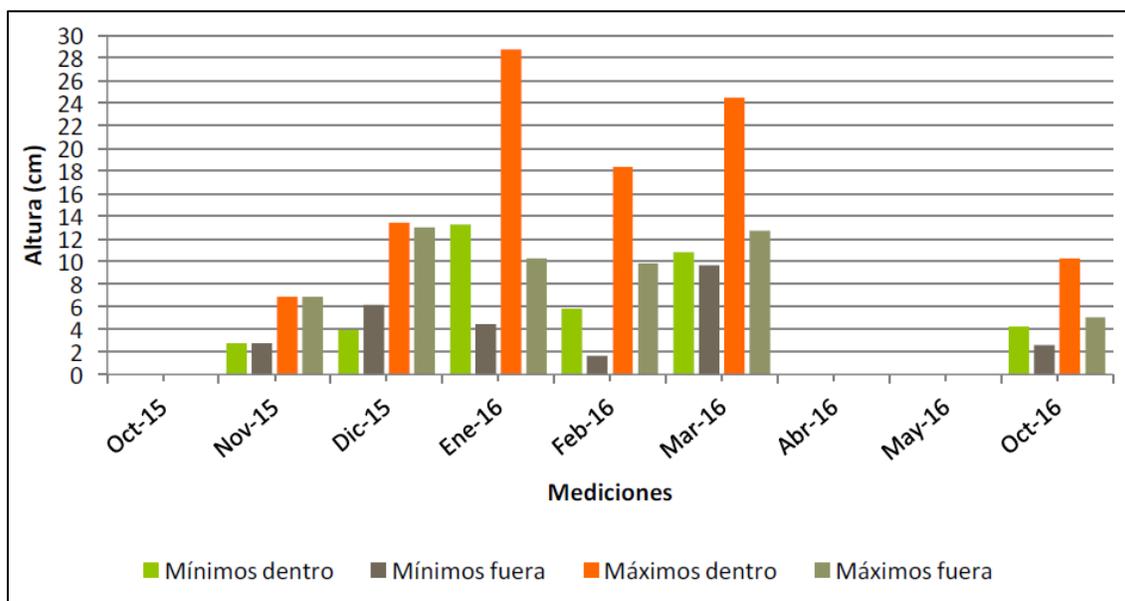


Figura 29: Alturas medias de vegetación en zonas de menor tránsito humedal Casa Piedra – detrás de la morrena (Fuente: Universidad de Chile, 2016).

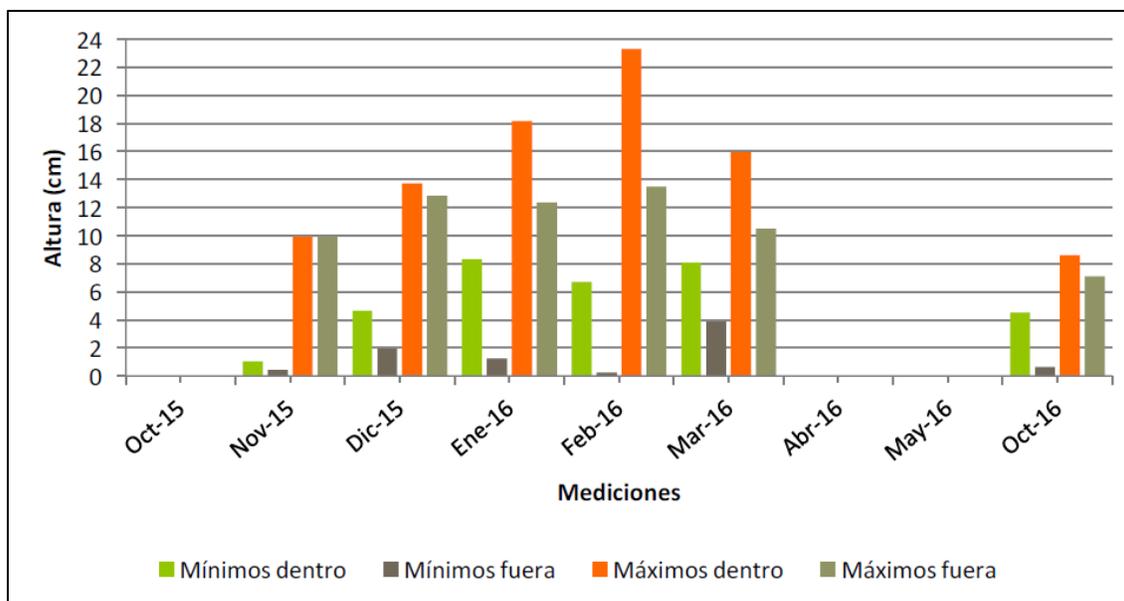


Figura 30: Alturas medias de vegetación en zonas de mayor tránsito humedal Casa Piedra detrás de la morrena (Fuente: Universidad de Chile, 2016).

Al igual que en el humedal anterior, a medida que avanza la temporada, las alturas mayores se presentaron siempre al interior de las exclusiones. Luego, la diferencia con los testigos es explicable por efecto del talaje animal. Pese a ello, las alturas tanto de las exclusiones como los testigos, a partir de febrero comienzan una tendencia a la baja explicado por el cambio de las condiciones ambientales.

### 3. Sitio de estudio Campamento Minero

#### a. Evolución de la cobertura vegetal

El humedal Campamento Minero destacó por presentar espejos de agua, con columnas entre 5 a 50 cm. Este humedal presentó una cobertura media inicial en la temporada 2014-2015 de 71,67%, la que disminuyó a 1,86% en mayo de 2015. La disminución mensual media de la cobertura fue de un 23,27% ( $\pm 0,27\%$ ) (Figura 31).

La temporada 2015-2016 comenzó con una cobertura media de 1,22%, la que aumento hasta diciembre de 2016. Entre diciembre y febrero no existe mayor variación, presentando el máximo valor de cobertura en enero con un 87,78%. La tasa de aumento mensual de la cobertura vegetal es de un 41,11% ( $\pm 2,91\%$ ) entre los meses de octubre y diciembre.

El denominado “corte” presenta los valores más altos de cobertura junto a las exclusiones de las zonas de menor tránsito. Estas zonas presentan una menor cantidad de agua libre (columnas), por lo que existe un efecto positivo sobre la cobertura vegetal de especies menos tolerantes a condiciones de inundación permanente. Además, en el caso de la zona de corte, existen otras características que influyen sobre la cobertura vegetal, tales como su posición de plano elevado y en una

exposición que le permite contar con más iluminación en el día. En consecuencia, dichas características morfológicas pueden influir sobre un derretimiento de nieve más rápido, dando paso al espacio necesario para el desarrollo de la vegetación.

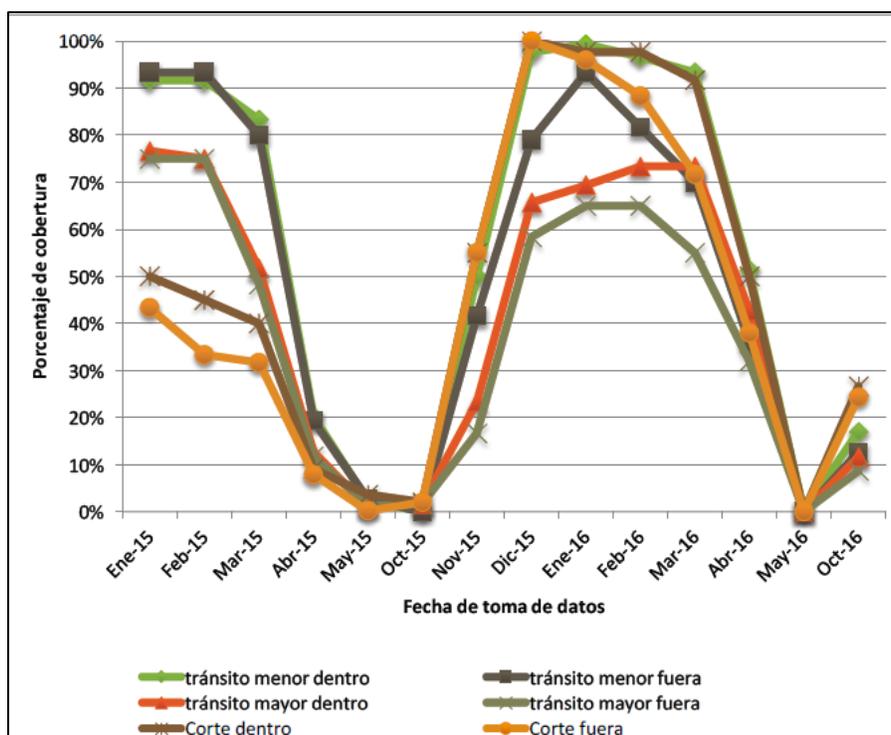


Figura 31: Evolución de la cobertura vegetal en humedal Campamento Minero (Fuente: Universidad de Chile, 2016).

En el periodo de máximo crecimiento (diciembre - febrero de la temporada 2015-2016), la diferencia media de cobertura entre las exclusiones y los testigos en las zonas con menor tránsito fue de 17,78%. Así también, las exclusiones de las zonas con mayor evidencia de tránsito presentaron coberturas vegetales mayores en un 9,44%. En tanto, en las zonas de corte, las coberturas vegetales varían en un 3,66% (Cuadro 8, Figura 32). Pese a lo anterior, tan solo las exclusiones ubicadas en la zona de menor tránsito presentaron diferencias estadísticamente significativas, las que evidencian el efecto positivo de las parcelas. Por el contrario, las zonas con mayor tránsito y las zonas de corte, no presentaron diferencias estadísticamente significativas, por lo que las variaciones de cobertura no son atribuibles al efecto de las parcelas (Cuadro 8).

Cuadro 8: Pruebas de comparación múltiples para cobertura vegetal, humedal Campamento Minero (Fuente: Universidad de Chile, 2016).

Exclusión	Tránsito menor			Tránsito mayor			Situación de Corte		
	Cobertura media	Diferencia media	PCM	Cobertura media	Diferencia media	PCM	Cobertura media	Diferencia media	PCM
Dentro	98,89%	17,78%	a	69,44%	9,44%	a	98,44%	3,66%	a
Fuera	81,11%		b	60,00%		a	94,78%		a

$W_{Tmenor} = 15,51$   
 $W_{Tmayor} = 39,71$   
 $W_{Corte} = 6,16$

### b. Biomasa vegetal

Respecto a la producción de biomasa, se observó que es la más elevada de todos los humedales. En este caso alcanzó los 0,14 kg MS/m<sup>2</sup> al inicio de la temporada, aumentando en un 75,44% para llegar a los 0,57 kg MS/m<sup>2</sup> en el periodo de máxima producción (febrero de 2016). El valor alcanzado al inicio de la temporada 2015-2016 aún se encuentra por debajo de la producción media de praderas altoandinas y bofedales altoandinos bolivianos (0,38 kg MS/m<sup>2</sup> y 0,45 kg MS/m<sup>2</sup>, respectivamente), pero se acerca a los mínimos de producción de los bofedales altoandinos (0,13 kg MS/m<sup>2</sup>) (Alzerrca *et al.*, 2001). Sin embargo, en plena producción (febrero 2016) supera a todos los ecosistemas similares. En relación a las vegas altoandinas del Maipo, al inicio de temporada se encuentra casi a la mitad de su capacidad productiva (0,25 kg MS/m<sup>2</sup>), pero a plena producción duplica dicho valor (Fredericksen *et al.*, 2011).

### c. Altura vegetal

Las medias de altura de la vegetación al interior de las exclusiones fueron mayores que los testigos, independiente de la condición en la cual se emplaza cada parcela. Las mayores alturas medias se observaron en las exclusiones de las zonas de corte, al igual que las menores alturas medias (Figura 32, 33 y 34).

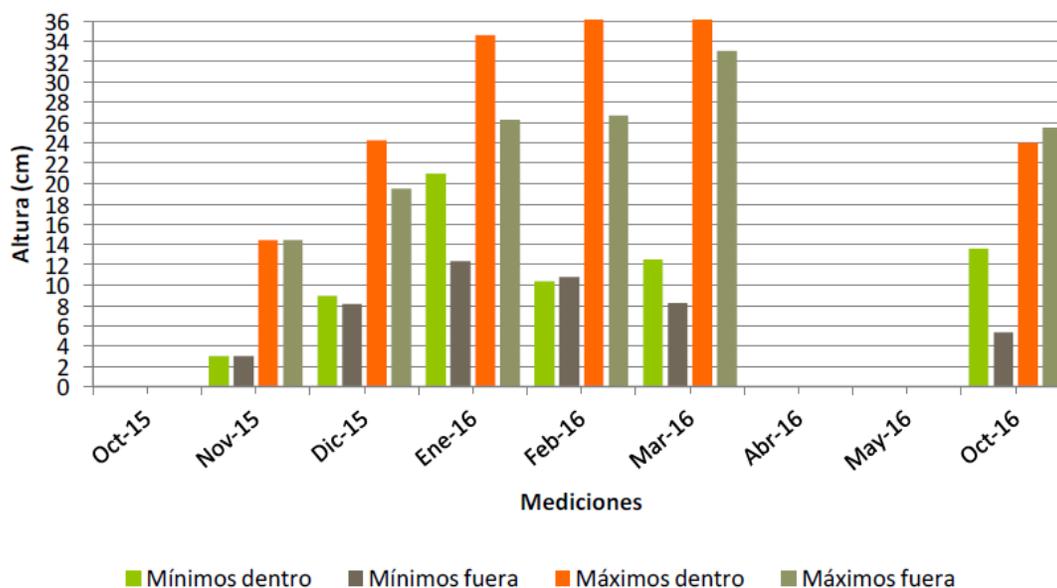


Figura 32: Alturas medias de vegetación en zonas de mayor tránsito humedal Campamento Minero (Fuente: Universidad de Chile, 2016).

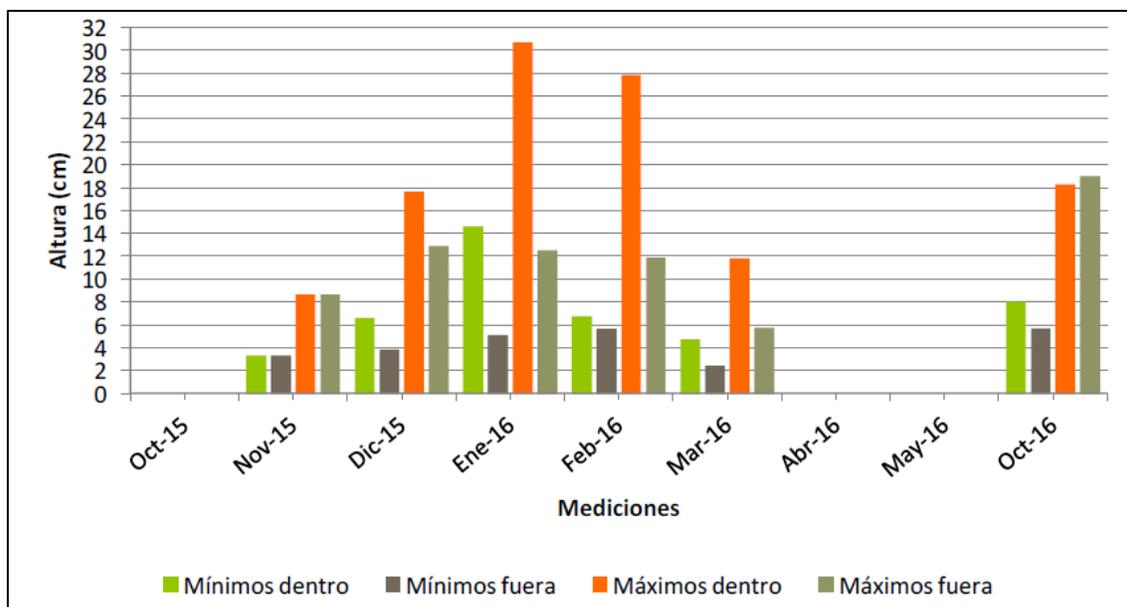


Figura 33: Alturas medias de vegetación en zonas de mayor tránsito humedal Campamento Minero (Fuente: Universidad de Chile, 2016).

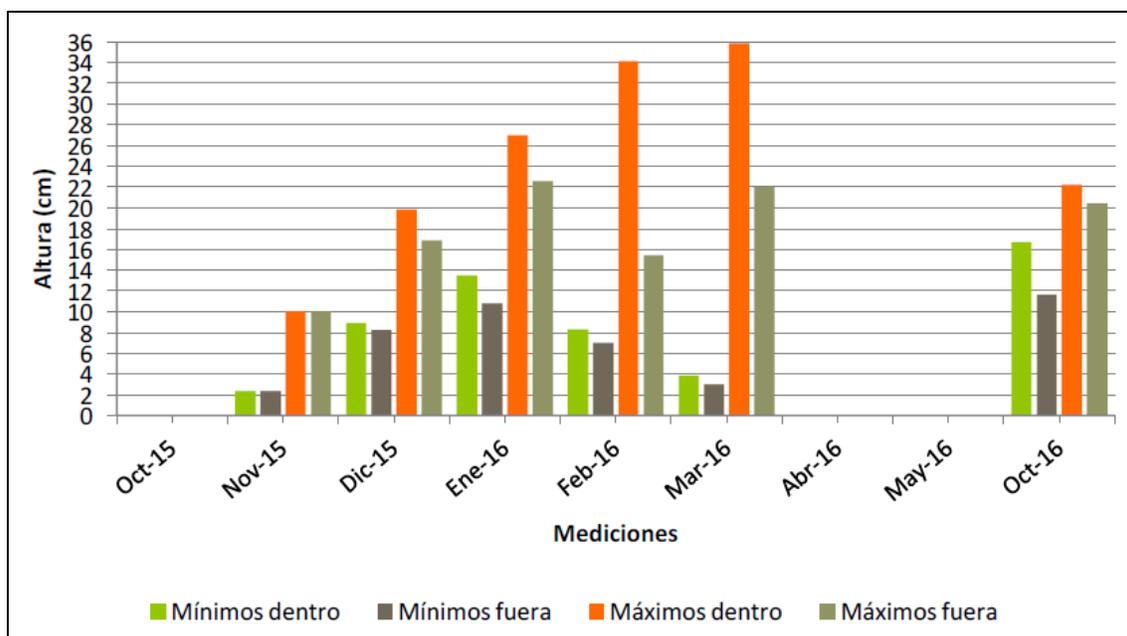


Figura 34: Alturas medias de vegetación en zonas de corte humedal Campamento Minero (Fuente: Universidad de Chile, 2016).

#### 4. Sitio de estudio Parque Valle del Yeso

##### a. Evolución de la cobertura vegetal

Parque Valle del Yeso es el humedal estudiado de mayor altitud, destacando también por presentar un deshielo tardío. De igual modo, es la que presenta de manera

temprana el efecto de las condiciones ambientales, como la disminución de la temperatura, del agua disponible/almacenada, y de las horas de luz (Serrada, 2008; Yang *et al.*, 2014). También destaca por tener una pendiente media de 15%. Este humedal presentó una cobertura media inicial de 44,38% en la temporada 2014-2015, bajando a 10,38% al concluir la temporada. La disminución mensual media de cobertura fue de 11,33% ( $\pm 0,04\%$ ) (Figura 35). Para la temporada 2015-2016, el humedal presentó una cobertura media inicial de 0,00%, aumentando a una tasa del 31,88%/mes ( $\pm 3,71\%$ ). En diciembre del 2015, la cobertura media alcanzada es del 63,63% y se estabilizó hasta el mes de febrero de 2016, luego del cual comienza el decrecimiento de la cobertura.

Para ambas condiciones de tránsito, hubo diferencias en las coberturas entre las exclusiones y los testigos (Cuadro 9). Dicha diferencia es más notoria en el caso de las parcelas ubicadas en las zonas con menor evidencia de tránsito, debido posiblemente al menor daño. El daño deriva del pisoteo animal (efecto acumulativo), así como por el tránsito de visitantes. En las zonas de menor tránsito, las exclusiones tienen 38,33% más de cobertura en comparación a los testigos. Por el contrario, en las zonas con mayor tránsito las exclusiones aportaron tan solo con un 10,34% más de cobertura. Solo en el primer caso existe diferencia estadísticamente significativa, demostrando el efecto positivo de las exclusiones.

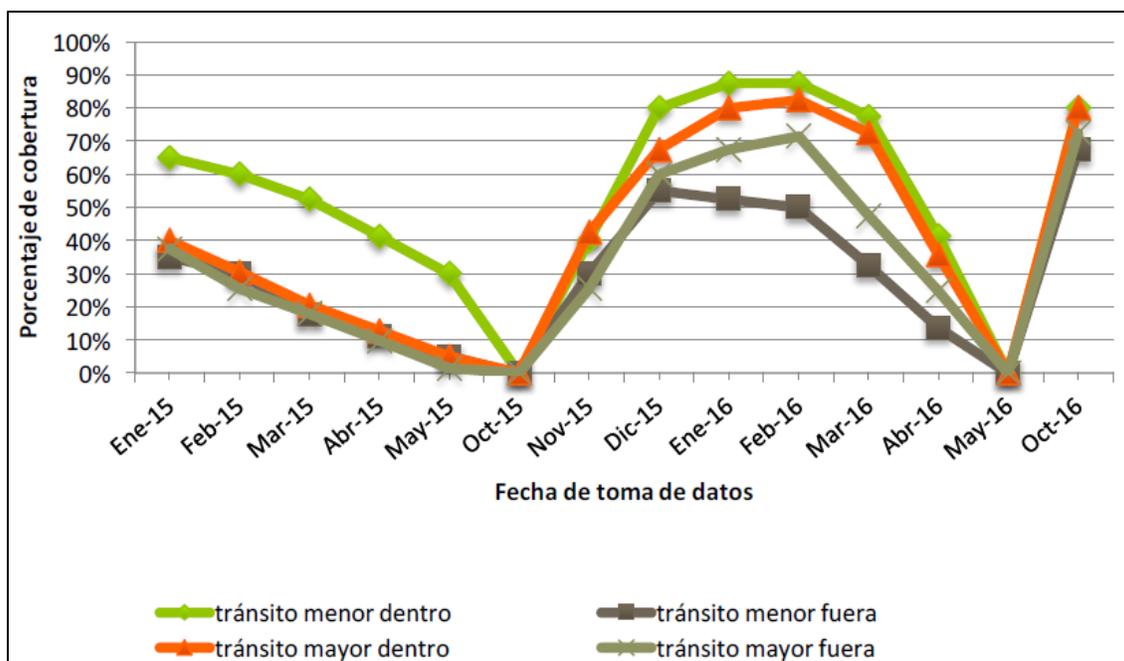


Figura 35: Evolución de la cobertura vegetal en humedal Parque Valle del Yeso (Fuente: Universidad de Chile, 2016).

Cuadro 9: Pruebas de comparación múltiples para cobertura vegetal humedal Parque Valle del Yeso (Fuente: Universidad de Chile, 2016).

Exclusión	Tránsito menor			Tránsito mayor		
	Cobertura media	Diferencia media	PCM	Cobertura media	Diferencia media	PCM
Dentro	90,83%	38,33%	a	76,67%	10,34%	a
Fuera	52,50%		b	66,33%		a

$$W_{Tmenor} = 34,85$$

$$W_{Tmayor} = 39,33$$

*b. Biomasa vegetal*

La producción de biomasa fue la más baja de todos los humedales en estudio. En este caso alcanza los 0,06 kg MS/m<sup>2</sup> al inicio de la temporada 2014-2015 y 0,20 kg MS/m<sup>2</sup> a plena producción en febrero del 2016, lo que representa un aumento del 70%. Algunas explicaciones a este fenómeno son que, a inicio de temporada, la mayor altitud a la que se encuentra este humedal asegura la permanencia por mayor tiempo de la nieve invernal y menor temperatura, por tanto, menor tiempo y condiciones para el desarrollo vegetal. Otra explicación se relaciona con el tipo de vegetación presente en este humedal, que es más rala.

*c. Altura vegetal*

Para los humedales del Parque Valle del Yeso, las alturas medias de la vegetación fueron mayores en las zonas de menor tránsito. Esto se explica principalmente por la mayor cantidad de poaceas (de crecimiento y regeneración rápida), así como las mejores condiciones de suelo que facilitan el desarrollo y crecimiento de estas. Evidentemente, las mayores alturas están ligadas a las exclusiones, superando en la mayoría de los casos, la altura presente en los testigos (Figura 36 y 37).

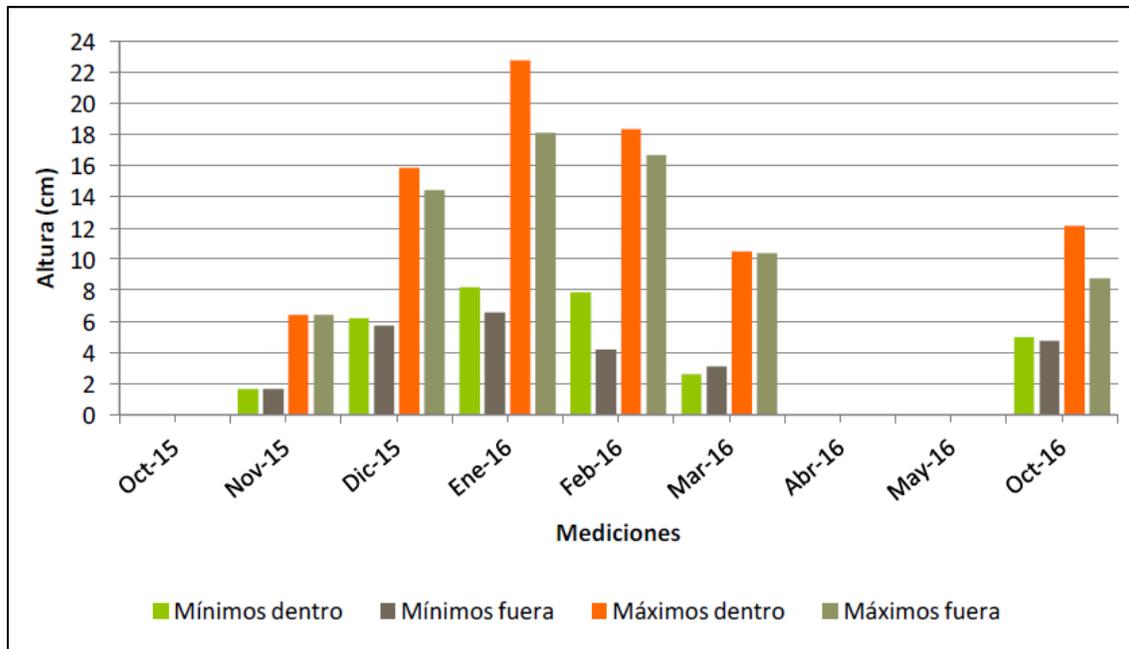


Figura 36: Alturas medias de vegetación en zonas de menor tránsito humedal Parque Valle del Yeso (Fuente: Universidad de Chile, 2016).

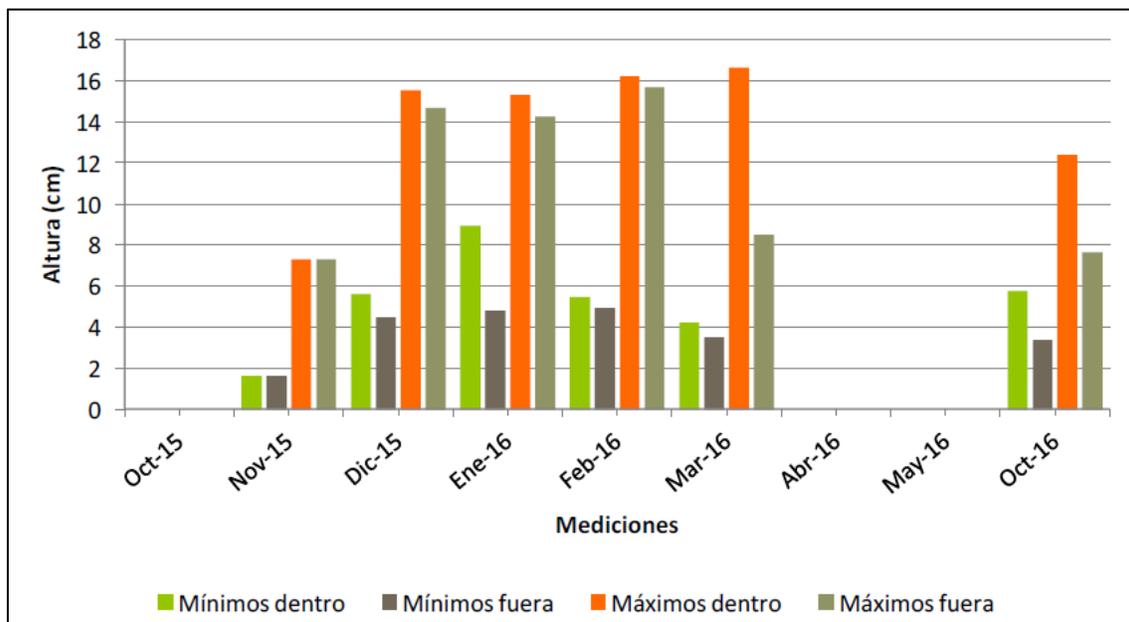


Figura 37: Alturas medias de vegetación en zonas de mayor tránsito humedal Parque Valle del Yeso (Fuente: Universidad de Chile, 2016).

## B. Propagación activa de humedales

### 1. Humedal Casa Piedra delante de la morrena

El humedal Casa Piedra delante de la morrena cuenta con tres parcelas experimentales. Estas corresponden al tratamiento C: “riego por ascenso capilar”. Esta zona, muestra el comportamiento natural de ascenso capilar que alimenta a la vegetación, que se ha visto alterado por el pisoteo y talaje animal, así como el tránsito de vehículos y visitantes. Estas parcelas, a diferencia del entorno muestran una importante tasa de crecimiento vegetal y acumulación de depósitos de sal en superficie (Figura 38), que indican el incremento de flujo, presentando humedad a escasa profundidad (10 cm), a diferencia de los testigos. Esta situación, tiende a ocurrir por la mejora en las condiciones de porosidad del suelo (Porta *et al.*, 1994; Brady *and* Weil, 2008; Hartge *and* Horn, 2009).



Figura 38: Riego por ascenso capilar humedal Casa Piedra delante de la morrena (@Universidad de Chile, 2016).

El establecimiento de exclusiones en este caso ha permitido detectar la recuperación de los mecanismos naturales de riego. Esto a su vez, se refleja en el aumento de cobertura vegetal (Cuadro 10).

Cuadro 10: Efectos de la expansión de cobertura por recuperación de riego capilar (Fuente: Universidad de Chile, 2016).

Fechas	Parcelas					
	EXP-4		EXP-5		EXP-6	
	Dentro	Fuera	Dentro	Fuera	Dentro	Fuera
	Riego por ascenso capilar					
oct-15	1,00%	0,00%	0,00%	1,00%	0,00%	0,00%
nov-15	10,00%	2,00%	10,00%	1,00%	25,00%	25,00%
dic-15	35,00%	5,00%	40,00%	2,00%	70,00%	50,00%
ene-16	25,00%	5,00%	20,00%	5,00%	80,00%	50,00%
feb-16	20,00%	5,00%	20,00%	5,00%	75,00%	55,00%
mar-16	25,00%	5,00%	30,00%	1,00%	50,00%	55,00%
abr-16	-	-	-	-	-	-
may-16	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
oct-16	15,00%	10,00%	20,00%	0,00%	25,00%	20,00%

## 2. Sitio de estudio Casa Piedra - detrás de la morrena

La zona posterior a la morrena del humedal Casa Piedra cuenta con dos parcelas experimentales en donde se desarrollaron los tratamientos A y B. Dichos tratamientos corresponden a riego gravitacional y riego gravitacional más replante de champas. Se encuentran al costado de un cauce, el cual ha variado constantemente de posición desde los deshielos, lo que ha obligado a reabrir de manera periódica canales para la inundación de las parcelas, así como la reparación de las mismas (Figura 39).



Figura 39: Riego gravitacional e implantación de champas humedal Casa Piedra detrás de la morrena (@Universidad de Chile, 2016).

El desarrollo del suelo en dicha posición es escaso, ya que corresponde a depósitos de material transportado por el cauce. Esto explica la baja presencia de vegetación, debido a la complejidad para el desarrollo y crecimiento de la misma sobre este tipo de sustrato.

Un incremento de la cobertura vegetal al interior de la parcela EXP-2, implica un efecto positivo debido al riego gravitacional (tratamiento A), los que sin embargo decrecen de manera natural por efecto de las condiciones ambientales, al igual que la cobertura del humedal (Cuadro 11). Para lograr lo anterior, se requiere asegurar la provisión de agua constante, requiriendo de supervisión y mantención permanente.

Para el caso de la parcela EXP-3 (tratamiento B), el éxito se basa en la sobrevivencia de un replante de 400 cm<sup>2</sup>, a lo largo del tiempo (se mide la cobertura viva del implante). El replante inicial establecido en noviembre no fue capaz de sobrevivir, dado que no mantuvo su cobertura viva. Esto se debe a que el implante se extrajo en un periodo muy temprano luego del deshielo, y no se encontraba en las condiciones propicias para su desarrollo (Cuadro 11).

Cuadro 11: Efectos de la expansión de cobertura vegetal (Fuente: Universidad de Chile, 2016).

Fechas	Parcelas		
	EXP-1	EXP-2	EXP-3
	-	Sólo riego gravitacional	Riego gravitacional + Implante
oct-15	Eliminada por alud	0,00%	0,00%
nov-15		5,00%	7,00%
dic-15		10,00%	0,00%
ene-16		30,00%	98,00%
feb-16		40,00%	95,00%
mar-16		15,00%	90,00%
abr-16			
may-16		0,00%	0,00%
		60,00%	95,00%

Luego de la medición de diciembre de 2015, se estableció nuevamente un implante de 400 cm<sup>2</sup>, el cual se mantuvo vivo hasta final de la temporada. En consecuencia, el riego y un implante en la zona del humedal Casa Piedra detrás la morrena evidenciaron resultados positivos, pero se debe recalcar que se tratan de superficies pequeñas (para evitar impactos mayores) y de prueba. Además, para lograr esto, se requiere de un cuidado constante y riego asistido, así como la exclusión efectiva del ganado.

### 3. Sitio de estudio Campamento Minero

En el humedal Campamento Minero hay seis parcelas experimentales, en donde se desarrollaron los tratamientos A y B. Dos parcelas fueron regadas por un cauce desviado (EXP-1 y EXP-3) y otras dos se encuentran inundadas (EXP-2 y EXP-5), mientras que las dos restantes fueron regadas mediante una zanja que drena desde una laguna lateral (EXP-4 y EXP-6) (Cuadro 12 y 13).

En el caso del riego gravitacional, en todas las parcelas se evidenciaron diferencias (mejoras) de cobertura en comparación a los testigos, lo cual podría ser atribuible al efecto del riego. En algunos casos, los efectos son más notorios que los otros, que se puede deber a una mejor disponibilidad de agua, por ejemplo, evitando columnas profundas con apozamientos permanentes (Cuadro 12).

Cuadro 12: Efectos de la expansión de cobertura por riego gravitacional (Fuente: Universidad de Chile, 2016).

Fechas	Parcelas					
	EXP-1		EXP-2		EXP-5	
	Dentro	Fuera	Dentro	Fuera	Dentro	Fuera
	Sólo riego gravitacional		Sólo riego gravitacional		Sólo riego gravitacional	
oct-15	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
nov-15	65,00%	35,00%	50,00%	5,00%	0,00%	0,00%
dic-15	90,00%	60,00%	30,00%	5,00%	5,00%	1,00%
ene-16	85,00%	60,00%	80,00%	10,00%	5,00%	1,00%
feb-16	75,00%	65,00%	10,00%	10,00%	5,00%	3,00%
mar-16	95,00%	90,00%	60,00%	15,00%	25,00%	20,00%
abr-16						
may-16	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
oct-16	80,00%	70,00%	60,00%	40,00%	0,00%	0,00%

Para el implante, se escogieron champas de 20 x 60 cm, las que fueron instaladas al interior de las parcelas en noviembre de 2015. La parcela EXP-3, era regada por el desvío de un cauce y el implante fue protegido por una taza. Las parcelas EXP-4 y EXP-6, son regadas por el dren canalizado desde lagunas laterales, surtiendo agua de manera constante (Figura 40).

Sin embargo, la dosificación no es la más adecuada para estas últimas parcelas, debido a que se generan estancamientos con columnas de agua de 20 a 30 cm. Para el caso de la parcela EXP-6, se requirió la reinstalación del implante a una zona más elevada, dado que el primer implante fracasó. En el caso de la parcela EXP-4, no se requirió una reinstalación, sin embargo, no ha generado coberturas tan eficientes (Cuadro 13).

Cuadro 13: Efectos de la expansión de cobertura por reimplante y riego (Fuente: Universidad de Chile, 2016).

Fechas	Parcelas		
	EXP-3	EXP-4	EXP-6
	Dentro	Dentro	Dentro
	Riego gravitacional + Implante	Riego gravitacional + Implante	Riego gravitacional + Implante
oct-15	0,00%	0,00%	0,00%
nov-15	20,00%	5,00%	1,00%
dic-15	30,00%	15,00%	20,00%
ene-16	60,00%	50,00%	90,00%
feb-16	90,00%	45,00%	10,00%
mar-16	75,00%	25,00%	20,00%
abr-16			
may-16	0,00%	0,00%	0,00%
oct-16	40,00%	50,00%	80,00%



Figura 40: Zanja de drenaje, taza e implante de champa humedal Campamento Minero (@Universidad de Chile, 2016).

#### 4. Sitio de estudio Parque Valle del Yeso

Finalmente, el humedal Parque Valle del Yeso cuenta con dos parcelas de expansión, en las que se desarrollaron los tratamientos A y B. En ambos casos se ha verificado la existencia de flujos superficiales (Cuadro 14). Para el caso del tratamiento B, se implantaron en noviembre cuatro champas de 20 x 20 cm con diferentes especies predominantes en una taza, y es regado mediante la apertura de una zanja. En ambos casos se reportan apropiados niveles de cobertura, que se han mantenido en el tiempo (tratamiento B, parcela EXP-1) o incrementado su cobertura en relación con el testigo (tratamiento A, parcela EXP-3) (Cuadro 14).

Cuadro 14: Efectos de la expansión de cobertura por riego gravitacional (Fuente: Universidad de Chile, 2016).

Fechas	Parcelas				
	EXP-1	EXP-2		EXP-5	
	Dentro	Dentro	Fuera	Dentro	Fuera
	Sólo riego gravitacional + implante	-		Sólo riego gravitacional	
oct-15	0,00%	Eliminada		0,00%	0,00%
nov-15	70,00%			50,00%	50,00%
dic-15	95,00%			75,00%	50,00%
ene-16	100,00%			90,00%	45,00%
feb-16	95,00%			90,00%	40,00%
mar-16	85,00%			60,00%	40,00%
abr-16					
may-16	0,00%			0,00%	0,00%
oct-16	100,00%			100,00%	65,00%

### C. Estimación retención de agua

En cuanto a la retención de agua de los suelos estudiados, en general se observó una tendencia a presentar capacidades de almacenaje de agua ligeramente mayores en los horizontes superficiales, ya que el mayor contenido de partículas finas en estos garantiza un mayor volumen de poros capaces de retener el agua. En contraste, se encuentran los horizontes subsuperficiales con mayor contenido de arena, los cuales, si bien pueden presentar un espacio poroso mayor, fallan en retener el agua, facilitando su evacuación en profundidad y, en consecuencia, limitando su capacidad de almacenaje. Sin embargo, el menor grosor de estas capas de suelo disminuye su aporte neto a la capacidad de almacenaje total del perfil.

En el humedal Casa Piedra - detrás de la morrena, los perfiles presentaron valores de retención de agua bastante altos. Esto guarda relación con la disminución del contenido de arena observada en los resultados de granulometría.

Los suelos del humedal Campamento Minero representan con mayor fidelidad la progresión esperable en suelos de humedal desarrollados en matrices de material más grueso, con mayores retenciones en superficie, donde se acumula la materia orgánica y el material fino.

Finalmente, en el Parque Valle del Yeso se da la condición típica de descenso de la capacidad de retención a medida que aumenta la profundidad. Sin embargo, también presenta un ascenso relevante de la retención en el horizonte más profundo. Este fenómeno está ligado al aumento en la proporción de partículas finas.

Se ha realizado una primera estimación a grandes rasgos del volumen de agua almacenada por los suelos asociados a las distintas calcatas ejecutadas, llevado a

unidades de superficie, con el fin de dar una noción de la magnitud de la retención de agua de estas unidades de suelo. El detalle se muestra en el Cuadro 15.

Cuadro 15: Almacenaje de agua por horizonte y superficie (Fuente: Universidad de Chile, 2016).

Calicata	Profundidad (cm)	Humedad aprovechable (m <sup>3</sup> m-2)	Humedad aprovechable (m <sup>3</sup> ha-1)
Casa Piedra (delante) 1	90	0,13	1255,99
Casa Piedra (delante) 2	60	0,04	395,88
Casa Piedra (detrás) 1	50	0,01	112,95
Casa Piedra (detrás) 2	30	0,02	168,87
Campamento Minero	43	0,04	359,94
Parque Valle del Yeso Inferior	110	0,07	689,73
Parque Valle del Yeso Superior	77	0,06	560,16

### 1.3.3 Conclusiones

El proyecto se inició en enero 2015. Desde fines de febrero se aprecia una tendencia a la baja del agua superficial y en el suelo de los humedales estudiados. La medición de mediados de mayo permitió comprobar el fin de la temporada de crecimiento y el inicio del receso otoño-invernal de las especies vegetales. En este mes también concluyo la bajada del ganado que se mantiene pastando durante la primavera y el verano.

Por otro lado, la temporada de crecimiento vegetal comienza inmediatamente luego del deshielo, con altas tasas de incremento de cobertura hasta el mes de diciembre. A partir de entonces el crecimiento se equilibra, presentando un leve peak de cobertura en los meses de enero-febrero que varía según altitud, luego de lo cual comienza un decrecimiento hasta el mes de mayo, para posteriormente dar paso, nuevamente, al periodo de dormancia invernal.

Existen diferencias en las tasas de aumento y disminución de la cobertura vegetal en cada humedal asociado a dos grupos de factores: i) por un lado los morfológicos y climáticos, en donde inciden variables como la altitud, y la temperatura; y ii) los factores antrópicos como la degradación de los suelos, el talaje selectivo del ganado y la pérdida de cobertura. Lo anterior se refleja estadísticamente en las exclusiones con menor tránsito (suelos menos degradados). En las zonas de mayor tránsito (suelos más degradados), donde si bien el interior de las parcelas presenta incrementos de cobertura vegetal en comparación a los testigos, no existe aún un distanciamiento estadístico que permita observar diferencias significativas. Dado el daño que presentan las zonas de mayor tránsito, es posible que se requiera mayor tiempo de observación, para lograr las condiciones que favorezcan el desarrollo vegetativo.

El sobre pastoreo y el tránsito excesivo sobre suelos frágiles genera pérdida de cobertura vegetal y compactación de suelos. Esto, a su vez, influye en la capacidad de infiltración de los suelos de humedal, en la conducción del agua y en su almacenamiento. Cerrando el ciclo, dichas perturbaciones del suelo incrementan la dificultad de propagación y enraizamiento de las especies vegetales. La pérdida de cobertura vegetal altera la capacidad de retener sedimento, afectando la turbiedad del agua y su calidad.

Respecto a los suelos de humedal, sus características particulares favorecen el almacenaje de agua, debido a sus texturas finas y contenidos considerables de materia orgánica (detectado por las Densidades aparentes). Esta situación se da principalmente en superficie, dado que en profundidad dominan las texturas gruesas y las gravas, que aseguran el libre movimiento del agua, y menor o nula capacidad de almacenamiento.

En lo que atañe a la calidad de aguas, es posible notar el efecto que generan dos eventos. En primer lugar, la disminución de la turbidez y de la conductividad eléctrica, producto del efecto de dilución al existir mayor disponibilidad de agua. Esto a su vez, indica que, de manera natural, la zona cuenta con elevados niveles de sales carbonatadas (principalmente yeso), debido a las condiciones litológicas de la cuenca, que además condiciona algunas características de los suelos en las zonas de mayor concentración. En segundo lugar, la presencia de ganado aporta mayores niveles de nitrógeno al agua, cuya concentración se incrementa a medida que el agua cruza el humedal. Esta situación es opuesta al contenido de sedimentos, los que quedan retenidos en el humedal, por lo que disminuye la turbiedad aguas abajo.

Dado el impacto positivo que generan los humedales altoandinos en su entorno inmediato y aguas abajo, y su fragilidad, es que se deben considerar medidas de gestión que impidan su degradación. Se sugiere que la gestión se enfoque a la regulación de la carga animal y del tránsito vehicular. En sitios con mayor nivel de degradación, se pueden realizar experiencias de replante y riego para incrementar la rapidez de la propagación vegetal, así como la construcción de obras de conservación de suelos.

Por otro lado, dada su capacidad de retención y almacenamiento de agua y su efecto sobre la calidad de las mismas, todos servicios ecosistémicos de gran interés, es que su manejo adecuado puede servir como una red de infraestructura verde en apoyo de infraestructura gris, tales como embalses, piscinas decantadoras o de regulación de crecidas, plantas potabilizadoras, generadoras hidroeléctricas, entre otras.

## 2. MODELAMIENTO

En el área de estudio se realizó un análisis de la capacidad de producción de sedimentos de las cuencas altas de la cuenca del Río Maipo, donde a través del uso de la herramienta de modelaje InVEST y del modelo SDR (Sediment Delivery Ratio Model) se ha estimado la potencialidad de producción y retención de sedimentos de las cuencas y que permitirá en fases posteriores identificar las áreas donde el retorno de la inversión sea más alto al realizar actividades de conservación en la cuenca. Este análisis hace uso de nuevas imágenes disponibles y de las últimas versiones de los módulos de sedimentos los softwares InVEST y RIOS desarrollados por TNC y Natural Capital Project (<http://www.naturalcapitalproject.org/invest/>).

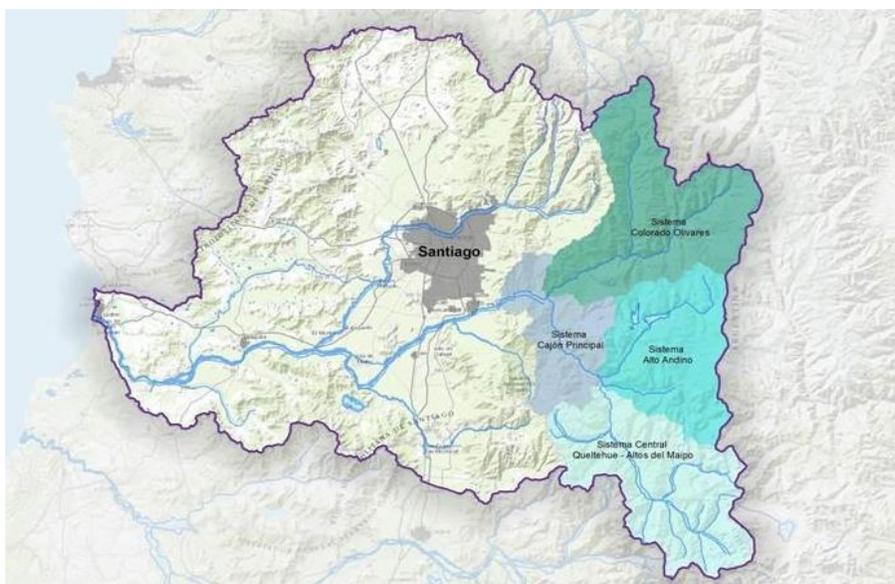


Figura 41: Área de estudio, Cuenca alta del río Maipo.

### 2.1 Metodología

El área de estudio (Figura 41) se realizó un análisis de la producción de sedimentos de las cuencas altas de la cuenca del Río Maipo, donde a través del uso de la herramienta de modelaje InVEST y del modelo SDR (Sediment Delivery Ratio Model) se ha estimado la potencialidad de producción y retención de sedimentos de las cuencas permitiendo identificar las áreas donde el retorno de la inversión es más alto al realizar actividades de conservación.

El software InVEST consiste en un paquete de software que incorpora diversos modelos de mapeo y evaluación de los servicios ecosistémicos que ofrecen a las sociedades. Está basado en el modelamiento de los procesos biofísicos en un entorno explícito espacialmente ya que están vinculados a de sistemas de información geográficos. Este paquete de herramientas de modelación desarrollado por el Natural Capital Project es de código abierto y uso libre

(<http://www.naturalcapitalproject.org/invest/>), y cuenta con modelos para diversos servicios ambientales en el ámbito terrestre, como la captura de carbono y los servicios de polinización en paisajes agrícolas, en ámbitos marino-costeros, como la protección costera basada en ecosistemas, y en el ámbito hidrológico, como son los modelos de rendimiento hídrico, purificación de contaminantes y exportación/retención de sedimentos.

El Modelo denominado SDR o Sediment Delivery Ratio Model tiene como objetivo mapear la generación de sedimentos en las cuencas y la entrega de éstos al torrente. Está basado en una formulación de la ecuación universal revisada de pérdida de suelos (RUSLE), bajo un enfoque de enrutamiento según el trabajo de Borselli *et al.* (2008), donde se incorporan los procesos de exportación/retención de suelos cuesta abajo en un paisaje.

Las unidades de análisis corresponden a 30 x 30 metros de lado, o 900 m<sup>2</sup> cada una, puesto que el análisis se realizó en base a rasters de entrada en escala 1:100.000. Los resultados del modelo de sedimentos incluyen la carga de sedimentos entregado a la corriente a una escala de tiempo anual, así como la cantidad de sedimento erosionado de las cuencas y una cuantificación del servicio de retención por la vegetación y las características topográficas. Las variables de salida del modelo SDR consideradas para el análisis corresponden a:

1. Exportación de Sedimentos (toneladas/cuenca y/o Toneladas/Unidad de Análisis): determina la cantidad total de sedimento exportado al cauce por cada cuenca. Corresponde a la modificación del resultado de la USLE modificado por el algoritmo de conectividad espacial. Esto debe compararse con la carga de sedimentos observada en la salida de la cuenca/subcuenca para su calibración. El conocimiento del régimen hidrológico en la cuenca y la contribución de la erosión laminar en el rendimiento cantidad total de sedimentos ayudará en el futuro a ajustar los valores de este resultado.
2. USLE Total (Toneladas/Cuenca y/o Toneladas/Unidad de Análisis): Cantidad total de la pérdida potencial del suelo en cada cuenca calculado por la ecuación USLE. Corresponde a la aplicación tradicional de la ecuación de USLE a cada unidad de análisis. Estos valores deben compararse con valores de referencia en bibliografía si hay disponibles, y con observación en terreno.

### Generación de escenarios

Este ejercicio de modelación supuso tres escenarios para evaluar y analizar configuraciones alternativas del paisaje en cuanto a cobertura vegetal del suelo. Estos escenarios varían entre sí únicamente en esta variable, reflejando como cambios en grado de cobertura del suelo, considerados en la ecuación USLE por el factor  $C_i$  y el factor  $P_i$  tendrían en la exportación de sedimentos o pérdida de suelo.

Se realizan de esta forma 3 corridas independientes del modelo SDR utilizando diferentes rasters de cobertura del suelo y factores asociados. Dado que el modelo toma como dato proxy de cobertura del suelo el raster de NDVI, la generación de 3 escenarios a evaluar consiste en la alteración de este raster para reflejar las condiciones sujetas a análisis. Los 3 rasters de NDVI corresponden así a:

1. Línea base: calcula la exportación de sedimentos en base a la condición de las coberturas del suelo según el método descrito en la sección anterior, correspondiente a la configuración del paisaje para el año 2015 (primavera). Tiene el objetivo de servir como referencia para los cambios potenciales en la exportación de sedimentos de los escenarios alternativos del paisaje y servir como plataforma para la posterior calibración y validación del modelo.
2. Escenario sin cobertura vegetal: Modifica el raster de entrada reemplazando todas las unidades de análisis diferentes a “cuerpos de agua” en el raster línea base por coberturas suelo desnudo. Tiene el objetivo de estimar por medio de contraste el servicio actual de retención de sedimentos que presta la configuración actual coberturas que hay en la cuenca respecto a una condición hipotética de ausencia total de coberturas vegetales.
3. Escenario con cobertura vegetal potencial: Modifica el raster de entrada incrementando de manera focalizada los valores de NDVI, representado así el impacto que actividades de restauración de áreas degradadas tendría en el incremento de cobertura vegetal del suelo y el impacto de estos incrementos en la exportación de sedimentos. Tiene el objetivo de estimar por medio de contraste la reducción potencial en exportación de sedimentos que actividades de restauración del paisaje podrían tener en la cuenca.

## 2.2 Resultados

### Susceptibilidad a la erosión y exportación de sedimentos

Hay 5.048 ha de humedal sobre los 2.450 msnm de acuerdo con el resultado del Maxent en toda la cuenca. De ellos, 1.464 ha de están en la cuenca del Maipo y 796 ha aguas arriba de los embalses.

Cuadro 16: Humedales en las cuencas y estado.

SUBCUENCA	Estado pobre (has)	Estado regular (has)	Estado bueno (has)	Área total en Humedal	
				has	% de la subcuenca
Río Olivares	26	348	41	415,64	0,60%
Río Barroso	69	282	61	411,65	1,50%
Río Colorado - Alto	101	711	83	893,82	1,30%
Río Yeso arriba Embalses	82	536	178	796,38	2,30%
Río Yeso abajo Embalses	34	443	206	683,57	2,40%
Río El Volcán	17	221	24	261,5	0,90%
Río Colina	20	221	45	285,6	1,20%
Río Negro	32	456	201	688,47	2,40%
Río Maipo en quebradas	68	352	231	650,63	1,80%
Río Blanco	3	18	1	21,47	0,30%
Área total de humedal				5.109	14,70%

Dentro de este total hay 430,3 ha en estado Pobre (8,5%), mientras que el 70% de los humedales está en estado Regular de acuerdo con el análisis efectuado (3.559,9 ha). En estado Bueno está solo el 20% con cerca de 1.000 ha. En la cuenca del Yeso, combinando aguas arriba y abajo de los embalses, se sigue el mismo patrón con 110 ha en estado Pobre (7,5%), 972 ha en estado Regular (66%) y 381 ha en estado Bueno (26%). Estas 796 ha de humedales aguas arriba de los embalses del Yeso hoy exportan 2.617 toneladas de sedimentos anuales según los datos disponibles, la degradación de estos supondría un incremento a 5.668 toneladas y su restauración una reducción a 1.889, siendo un 28% menos de toneladas de sedimentos anuales exportados por los humedales de dicha cuenca. Las demás subcuencas presentan beneficios de otras magnitudes.

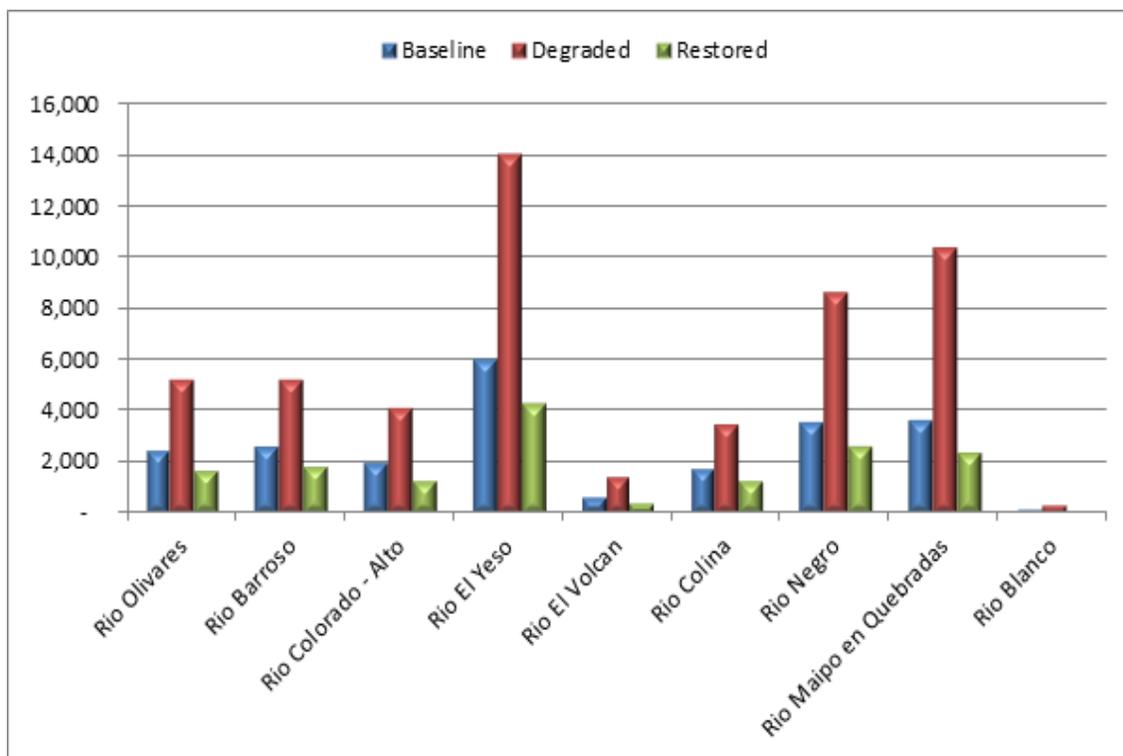


Figura 42: Exportación absoluta de sedimentos en humedales en toneladas/cuenca/año.

Este primer ejercicio de modelación de exportación de sedimentos arrojó información en formato de raster sobre la distribución espacial del proceso de generación y exportación de sedimentos para toda la zona de estudio, en escala 1:100.000 inicialmente, y en escala 1:35.000 en la iteración final enfocada únicamente en las áreas de humedal. Este resultado a nivel de píxeles, permite refinar la definición de las posibles áreas de trabajo para la restauración o mejoramiento de las condiciones ecológicas de las cuencas.

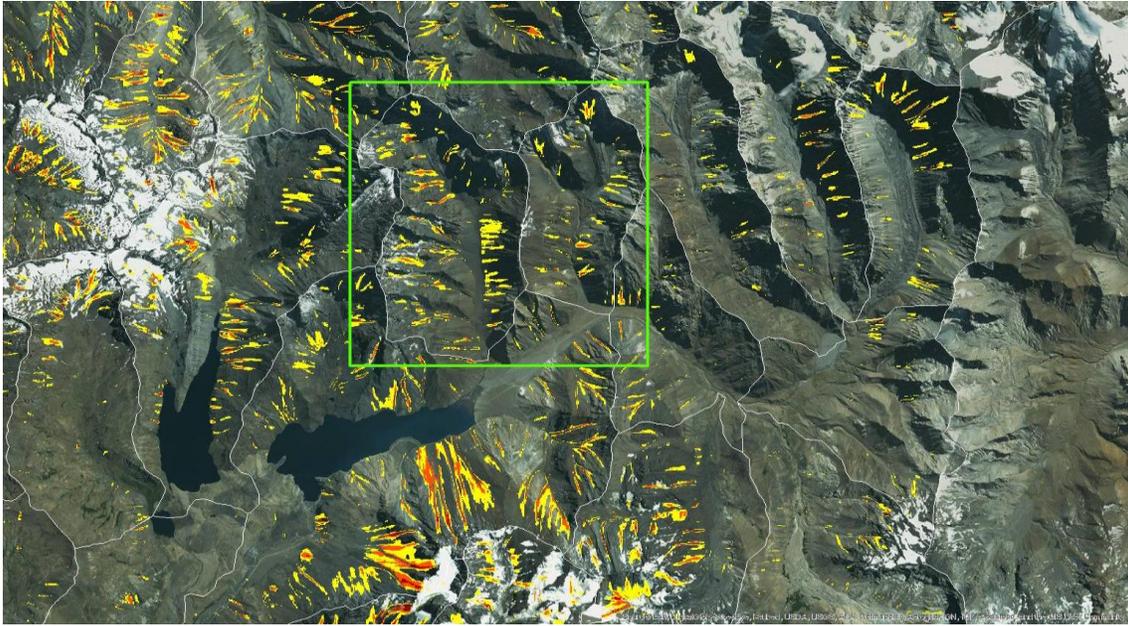


Figura 43: Áreas con mayor susceptibilidad a la erosión y exportación de sedimentos, obtenido con la herramienta SDR. Los tonos rojos indican los valores mayores. Cuenca del río Yeso a la altura de los embalses.

Como se observa en la imagen, una de las ventajas de los resultados de la herramienta SDR es la posibilidad de discriminar en el paisaje la distribución espacial de las áreas de mayor susceptibilidad a los procesos erosivos. En el área detallada en la figura es posible observar que algunas cuencas tienen una mayor proporción de su área en condiciones de alta susceptibilidad que otras. Son estas sub-cuencas las que pueden considerarse prioritarias para el trabajo de restauración y conservación de los humedales en sus desembocaduras ya que su función de buffer natural se hace más relevante según haya una mayor exportación de sedimentos en el área aguas arriba de éstas. En esta misma imagen es posible ver esto en el área encerrada por el recuadro verde que corresponde a las áreas de aporte de sedimentos arriba de los humedales de Casa Piedra y del sitio Aparejo.

En estas dos subcuencas del río Yeso arriba de los embalses, pese a su cercanía y similitud en condiciones de suelos y clima, tienen diferencias marcadas en la cantidad de su área que identificada por el modelo SDR como de alta producción de sedimentos y susceptible a la erosión, siendo mayor en la cuenca arriba del humedal de Casa Piedra, a la izquierda en el recuadro. Con base en estos resultados y siguiendo esta lógica de análisis se puede proponer al humedal de Casa Piedra como de mayor importancia para el control de sedimentación respecto de aquellos a la salida de Aparejo, pues el volumen total de suelo perdido es mayor en su cuenca arriba que en la de Aparejo. Este mismo tipo de análisis es posible de desarrollar para todo el resto del área de estudio gracias a los resultados obtenidos con la modelación con SDR. Identificar las cuencas que exportan más sedimentos, tanto en la línea base como en los dos escenarios modelados, degradación y restauración de las coberturas actuales, permite identificar aquellos humedales de mayor importancia para la retención de sedimentos en toda la cuenca. Esa es la lógica del apartado de análisis de resultados de la modelación.

Dado que en las zonas de alta montaña los procesos de erosión son parte predominante del paisaje, el agua vertida a los cauces desde las laderas suele tener una alta carga de sedimentos que se muestran en la turbiedad de las aguas. Con la información obtenida a través del modelaje se identifican los humedales cuya función de agentes retenedores de la sedimentación que se da en las cuencas arriba es más importante. Los resultados analizados a continuación se enfocan en el resultado de exportación de sedimentos más que de retención ya que representan con mayor preponderancia los procesos que se observan en el paisaje.

No obstante, estos resultados deben ser calibrados en función de datos ahora no disponibles, que se obtengan mediante el monitoreo en terreno de la calidad y cantidad de agua presentes en los cauces del área en estudio, así como de la pérdida y retención de suelo y materiales suspendidos por parte de los humedales. Esto permitirá conocer en detalle la magnitud de la producción de sedimentos en las cuencas y donde deben concentrarse los esfuerzos de restauración de forma costo efectiva en la utilización de los recursos.

Para facilitar el proceso de interpretación de resultados toda la zona de estudio fue dividida en subcuencas hidrográficas, y los resultados y comparaciones siguientes se realizarán con base en este índice de subcuencas.

La modelación se realizó en el área total de estudio, pero dadas las características del paisaje analizamos en este resumen en detalle los resultados obtenidos para los humedales de la zona.

### [Análisis Detallado de Exportación de Sedimentos en Humedales](#)

Posterior a la finalización de la corrida inicial de la herramienta SDR según se presentó en la sección anterior se realizó una visita de campo en el mes de abril del año 2016. Durante la visita de campo se planteó la necesidad de profundizar el trabajo relacionado con los humedales de alta montaña principalmente en dos aspectos: el mapeo de su extensión y estado de conservación y la estimación del servicio ecosistémico de retención de sedimentos que proveen.

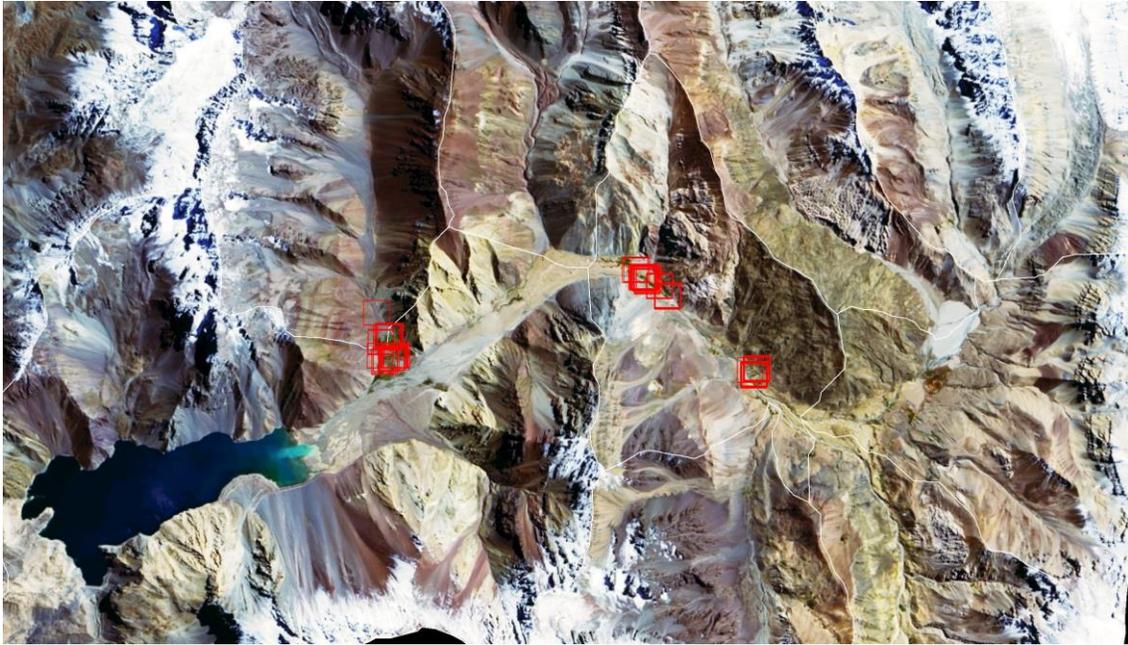


Figura 44: Sitios visitados para obtener muestras de suelo y corroborar información de cobertura durante la visita de campo. Cuenca alta del río Yeso.

Estas dos tareas debido al enfoque de trabajo en investigación de la hidrología de los humedales que se viene adelantando en el proyecto hasta ahora, y las perspectivas futuras de acciones de restauración y conservación de este tipo de coberturas.

La necesidad de entender el beneficio actual de retención de sedimentos que ofrecen los humedales en la cuenca alta del Río Maipo mediante el uso del modelo SDR en conjunto con un enfoque de 3 escenarios como en el primer ejercicio, línea base comparado con 2 escenarios alternativos: uno en estado de degradación y otro en estado de restauración, requería de un mapeo más detallado de la extensión y condición de las coberturas de humedal que lo disponible en la cartografía actualmente disponible. Se planteó así la necesidad de crear un nuevo mapa de coberturas de humedal en toda la cuenca alta. Posterior a la obtención de este mapa de humedales, que sería usado como línea base de coberturas, se podría hacer la generación de escenarios y estimación de beneficios por el método comparativo según lo descrito en la sección anterior.

Este nuevo análisis se focalizó en las microcuencas de alta montaña, equivalentes aproximadamente a la mitad del área de estudio del primer análisis con INVEST-SDR. Esto debido a que siendo las áreas de humedal y sus servicios ecosistémicos el eje actual de todo el trabajo de investigación científica desarrollado hasta ahora, y siendo las actividades de conservación y restauración de estas coberturas las que se vislumbran como los proyectos pilotos del Fondo de Agua de Santiago, no tenía sentido seguir analizando toda el área de la cuenca del Río Maipo ni suponiendo actividades en otros tipos de ecosistemas. Esta re-focalización del área de estudio suponía dos beneficios adicionales: la posibilidad de actualizar todo el análisis de línea base a un fecha aún más reciente (esta parte del estudio se realiza utilizando imágenes satelitales tomadas entre enero y febrero del año 2016) y segundo, la posibilidad de realizar las modelaciones en una escala aún más fina ya que al ser un área menor es posible correr la herramienta SDR con una escala de trabajo

correspondiente a la resolución espacial de las imágenes satelitales Sentinel 2 utilizadas: 10 metros x 10 metros de pixel.

Estos dos análisis posteriores a la corrida inicial de InVEST-SDR para toda la cuenca del Río Maipo se beneficiaron de la oportunidad de visitar la zona de estudio en abril de 2016 en tres aspectos fundamentales respecto a la corrida inicial. Primero, los datos de textura del suelo utilizados en esta segunda corrida del modelo provienen del estudio de las propiedades físicas del suelo realizadas por el laboratorio de suelos de Universidad de Chile con base en muestras de suelo recogidas durante la visita de campo para dos tipos principales de unidades de paisaje presentes en las cuencas altas, las áreas de valle donde se asientan la mayoría de los humedales y su nutrida vegetación, y las áreas de colinas que enmarcan estos valles donde se encuentra muy poca vegetación. Segundo, los valores asignados para el factor C en la ecuación de USLE fueron definidos directamente en terreno utilizando la documentación original del método y de tal manera que representaran la diversidad de humedales y estado de conservación de los mismos. Un tercer aspecto se relaciona con el diseño de los escenarios de intervención, enfocándose esta vez únicamente en actividades de recuperación de áreas de humedal o, por el contrario, en los impactos que las degradaciones de éstos pudiesen tener. Esto permite que los beneficios estimados por el ejercicio de modelación usando SDR sea más cercano a las expectativas en el corto plazo de las actividades en terreno que se esperan iniciar prontamente.

A continuación, se describen estos dos análisis adicionales a la modelación inicial: el mapeo actualizado de las áreas de humedal en la cuenca mediante el uso de la herramienta Maxent, y el análisis del servicio ecosistémico de retención de sedimentos de este ecosistema usando este nuevo mapa de humedales y la herramienta SDR.

### Mapeo del estado de los Humedales

En la primera modelación, antes de la salida de campo, se presentaron dificultades para estimar el beneficio ecosistémico que prestan los humedales en cuanto a retención de sedimentos por tres motivos principalmente: los mapas de humedales disponibles en otras fuentes de información únicamente incluían una fracción de este tipo de coberturas y dejaban gran parte de los ecosistemas de humedal que se evidenciaban en campo por fuera, clasificándolos bajo otras categorías. Un segundo motivo era que no había información sobre las diferencias entre los estados de conservación, expresados en función del grado de cobertura vegetal del suelo y el vigor de la vegetación, que además de evidenciarse en campo eran necesarios para definir una línea base de su estado de conservación y la generación más acertada de posibles escenarios para la modelación con SDR. Un tercer motivo estaba relacionado con la resolución espacial de las imágenes Landsat OLI, cuya resolución nativa es de 30 metros de pixel, la cual aunque suficiente para un análisis de toda la cuenca del Maipo, limitaba análisis más detallados en las áreas de estudio del proyecto, como Casa Piedra y Aparejo, donde no era posible relacionar lo observado en terreno con lo detectado en la imagen satelital.

Con la finalidad de resolver estos dos inconvenientes se realizó un análisis de imágenes satelitales recientes e información topográfica utilizando un método multivariado supervisado de clasificación en el cual se combinó la información espectral de las imágenes

satelitales en las bandas del infrarrojo cercano y la banda roja, de mayor sensibilidad a la vigorosidad de la vegetación y su contenido de clorofila, junto con información sobre la inclinación del terreno y cercanía a cursos de agua propia de los valles y otras áreas planas donde se puede encontrar este tipo de ecosistema.

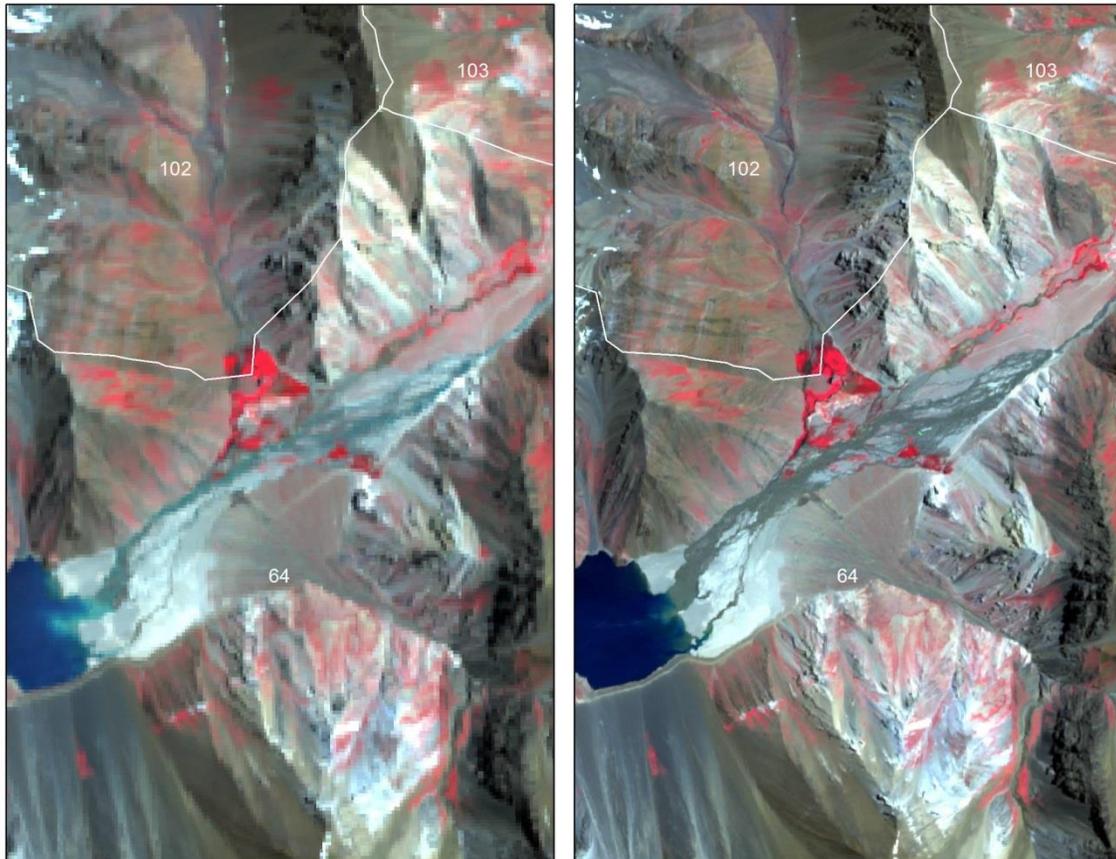


Figura 45: Comparación de la resolución de imágenes Landsat OLI (izquierda) y Sentinel 2 (derecha). La imagen corresponde al sitio Casa Piedra y con fecha de toma en enero de 2016.

Estas variables, topográficas del paisaje y espectrales obtenidas del satélite, fueron procesadas utilizando el software Maxent, entrenado su algoritmo de máxima entropía con una combinación de puntos confirmados de presencia de ecosistemas de humedal verificados en campo y otros extraídos del análisis en el SIG de las demás fuentes de información de mapas de humedales mediante la verificación manual de estos archivos contra imágenes satelitales de alta resolución.

Maxent (<http://www.cs.princeton.edu/~schapire/maxent>) es un programa multiuso basado en una aproximación estadística llamada máxima entropía que permite hacer predicciones utilizando información incompleta, en este caso datos de presencia u ocurrencia de la distribución potencial de una especie (Philips *et al.*, 2006, 2008). Un modelo de distribución de especies es básicamente una caracterización de las condiciones ambientales adecuadas para estas especies o ecosistemas, que ayuda identificar donde están espacialmente ubicados los sitios que cumplen con los requisitos adecuados para las especies en estudio (Pearson, 2007). Esto hace que este método pueda ser utilizado en diversas áreas dentro de una amplia gama de problemáticas. En este caso se buscaron las condiciones topográficas,

altitudinales y de respuesta espectral en las bandas roja e infrarroja cercana del satélite Sentinel 2 que indican la presencia de humedales altoandinos en la zona, conforme a la información de presencia de humedales confirmada en campo y en fuentes secundarias seleccionadas. El análisis se restringe a las microcuencas del Río Maipo que tuviesen la mayor parte de su extensión sobre los 2.450 m.s.n.m.

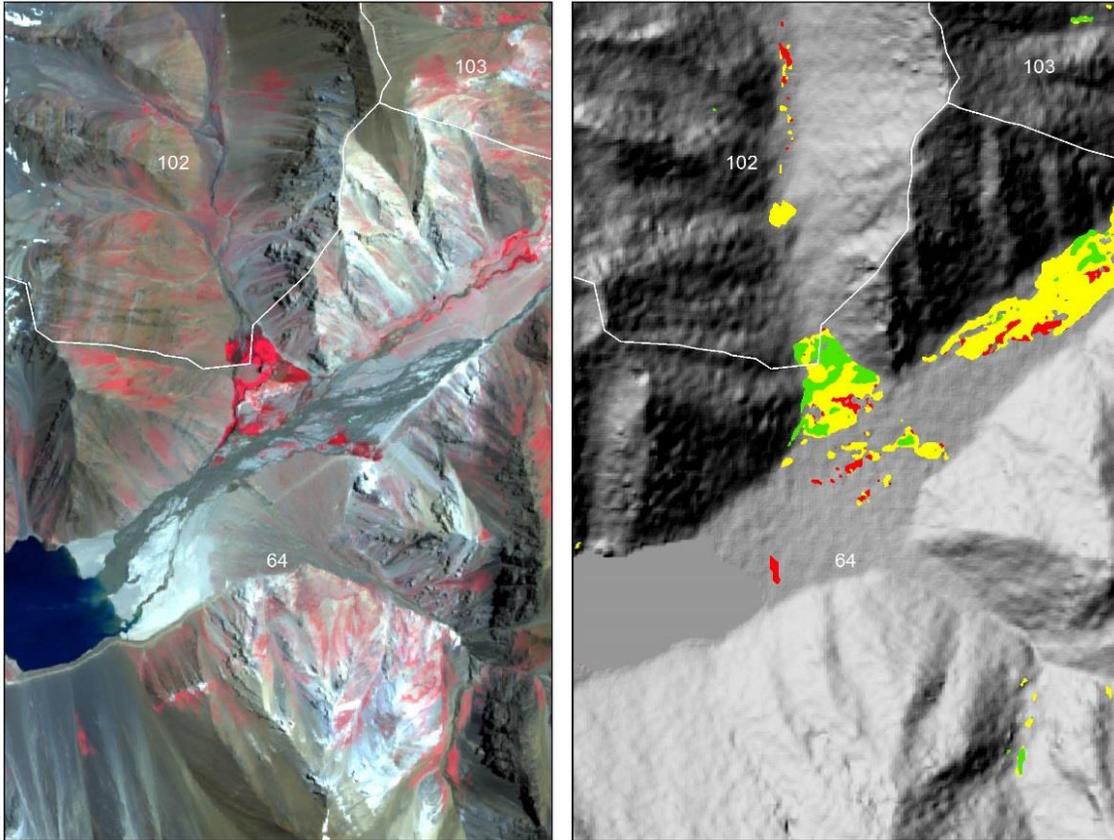


Figura 46: Mapeo de humedales resultante de Maxent (izquierda) y Estado de Conservación del humedal con base al valor de NDVI: Rojo= Pobre; Amarillo= Regular; Verde= Bueno.

Gracias a las bandas infrarrojas del sensor Sentinel 2 se pudo detectar un proxy del estado de conservación de cada humedal, identificándose 4 estados desde Pobre a Muy Bueno. En la zona de la cuenca del Yeso se pudo comprobar en terreno que este análisis tiene una alta correspondencia con lo observado en terreno, pero se debe realizar una campaña de terreno enfocada en este punto, que permita extrapolar y revisar con detalle los resultados de este análisis en otras cuencas adyacentes al río Yeso, sitio único con verificación en terreno hasta ahora.

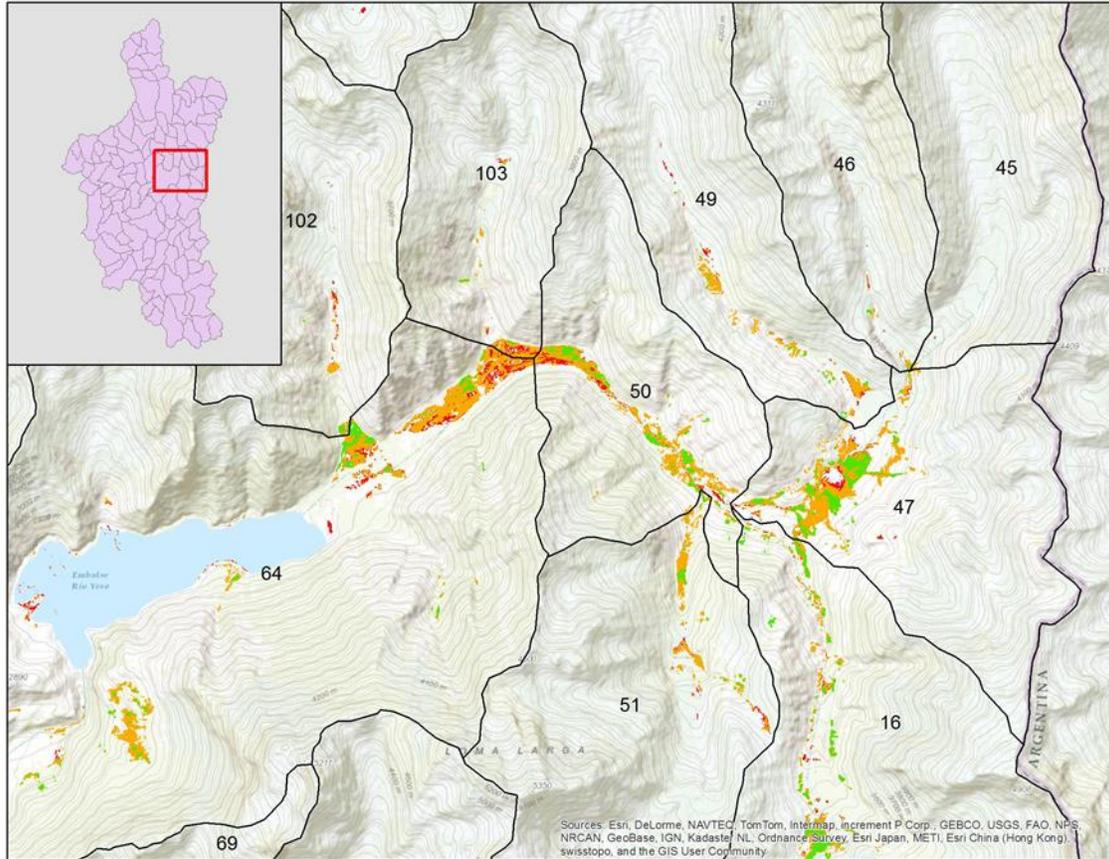


Figura 47: Estado de conservación de humedales en la subcuenca del Yeso, para todos los sitios de trabajo en campo. Estado de Conservación del humedal: Rojo = Pobre; Amarillo = Regular; Verde = Bueno.

Este análisis que identifica todas las áreas de humedales y las diferencia según su valor de NDVI, indicando la vigorosidad de la vegetación, se encuentra disponible para toda la zona alta de la cuenca sobre los 2.450 m.s.n.m. y se presenta en los anexos cartográficos.

### Modelación detallada de la exportación de sedimentos de las áreas de humedal

El principal objetivo de este análisis es conocer la importancia de los humedales en la exportación/retención de sedimentos en las cuencas de interés. Tras la modelación inicial con InVEST-SDR y el posterior mapeo en detalle de las áreas de humedales se planteó la necesidad de rehacer una corrida de InVEST con los nuevos datos obtenidos tras la visita de campo en abril del año 2016 y que se enfocase en el rol de estas coberturas.

Tras la visita en terreno se contaba con dos insumos novedosos que no habían estado disponibles antes en ningún momento o accedidos en ninguna fuente de información secundaria: un mapa de todos los humedales de alta montaña discriminado por su estado actual de conservación en función del vigor de la vegetación del año 2016 en escala 1:35.000, y segundo, datos recolectados en campo de las propiedades físicas de los suelos en la profundidad 0-25 cm. Estos dos datos ahora disponibles permitirían ajustar de mejor manera los factores K y C en la ecuación de USLE que se encuentra en el centro del modelo SDR y que en el ejercicio inicial había estado limitada por falta de información a considerar

extensiones mucho menores de áreas de humedal a las reales y asumir propiedades del suelo provenientes de bases de datos muy generales.

Además de los nuevos datos, que permitirían formular mejor una ecuación USLE, se necesitaba definir escenarios de intervención en estas coberturas que representasen de manera más realista las opciones iniciales de trabajo del Fondo de Agua de Santiago, el cual a la fecha de redacción de este informe se perfila con un énfasis de trabajo en las áreas de ecosistema de humedal de alta montaña principalmente, y no plantea por el momento acciones de conservación/restauración de otros tipos de ecosistemas. Esta realidad no había sido capturada del todo en la generación de los escenarios de la primera corrida del modelo SDR ya que estos suponían intervenciones en todas las áreas susceptibles de ser intervenidas de acuerdo con su uso y vocación. En esta segunda corrida el énfasis estuvo únicamente en el diseño y evaluación comparativa de escenarios de intervención en áreas de humedales de alta montaña únicamente.

Esta segunda modelación comparte el enfoque comparativo de línea base versus. Escenario, y plantea también dos escenarios, uno de restauración en el cual las coberturas de áreas de humedal degradadas, según el mapeo de humedales usando Maxent y caracterizadas por medio del valor de NDVI, son restauradas de tal manera que lleguen a tener el grado de cobertura del suelo y vigor vegetal de las áreas en mejor estado de conservación, y otro escenario de degradación en el cual las áreas de humedal actuales se degradan de manera tal que llegan a tener en su totalidad las condiciones propias de las áreas que actualmente se encuentran en peor estado de conservación. El estado de conservación se mapea en la línea base utilizando la información de NDVI como proxy del vigor y grado de cobertura vegetal actual, clasificándose en 3 clases mediante un método estadístico basado en la mayor disminución posible de la variación estándar al interior de cada categoría de estado de conservación, obteniendo grupos de cobertura que a lo largo y ancho de la zona de estudio comparten valores características similares de cobertura del suelo y vigor vegetal de la vegetación de humedal. Estos grupos fueron contrastados con lo observado en campo en la cuenca del Yeso, pero sobre su capacidad de discriminar el estado de conservación de los humedales en otras cuencas en diferentes latitudes más al norte o al sur, o en humedales a diferentes altitudes se recomienda adicionales verificaciones en terreno.

Entre estas tres categorías de estado de conservación de los humedales obtenidas mediante un análisis estadístico de la distribución de valores de NDVI en las áreas clasificadas como humedales por Maxent se asignaron diferentes valores de factor C de acuerdo a la documentación original del método (Wischmeier, 1978) y los observado durante la visita de campo. A diferencia de la corrida inicial, donde se utilizó un método semi-automatizado para definir los umbrales de cambio entre escenarios mediante el análisis de la variación estándar al interior de cada clase de cobertura vegetal, en esta simulación se generaron los escenarios alternativos con base en las observaciones de campo y su correlación con los valores de NDVI. Esto con el propósito de variar el factor C con mayor control entre escenarios y de manera tal que replicase de la mejor manera posible los principios fundamentales detrás del uso de la ecuación USLE.

Finalmente, en el proceso de análisis de resultados se sigue la misma lógica de la primera corrida, un análisis comparativo entre las subcuencas que permita identificar cuáles de ellas ofrecen el mayor retorno potencial para actividades de conservación/restauración, pero con

la diferencia de solo considerar los valores correspondientes a las áreas de humedales. Los valores presentados en Toneladas por cuenca por año (Ton/Cuenca/Año) corresponden únicamente a lo exportado o retenido en cada escenario únicamente por cuenta las áreas de humedal, lo cual significa que los valores totales de pérdida de suelo en cada cuenca son significativamente mayores pero debido a la ausencia a la fecha de información medida en campo de la pérdida real de suelo anual en parcelas monitoreadas de humedal y de otros tipos de cobertura, y el hecho de que únicamente se plantean actividades de conservación/restauración en áreas de humedal, se han dejado por fuera del análisis los valores de pérdida de suelo en todo lo que no sea un humedal.

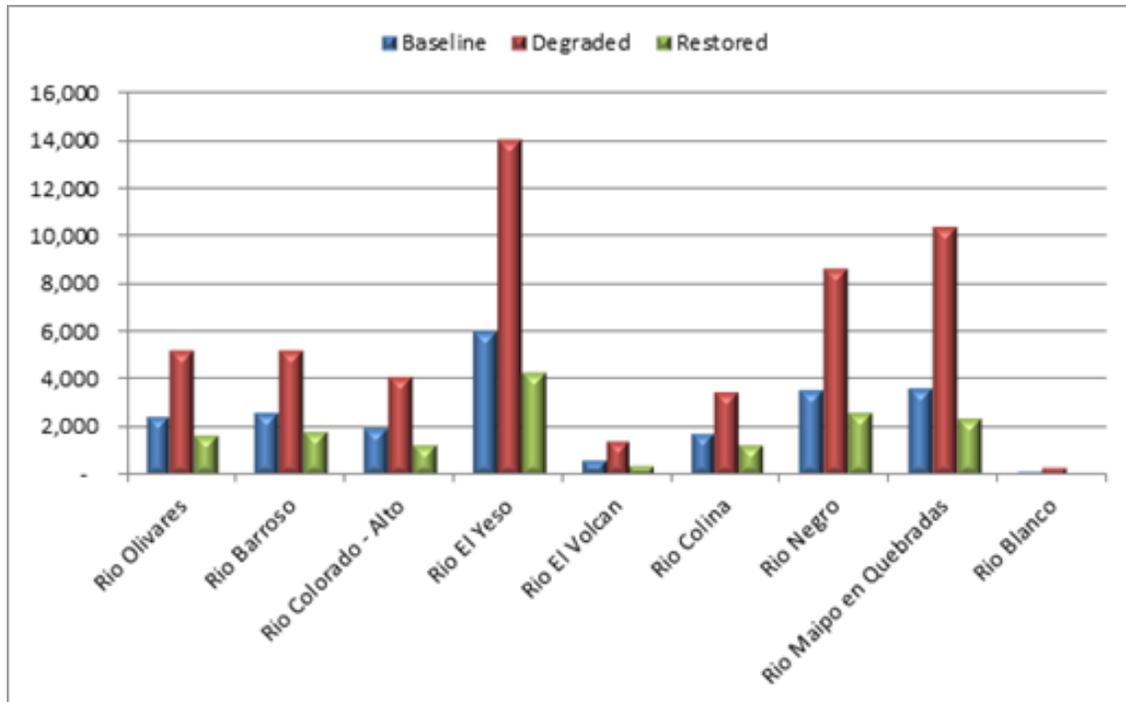


Figura 48: Exportación absoluta de sedimentos en humedales en toneladas/cuenca/año.

Al análisis comparativo absoluto de pérdida de sedimentos arroja diferentes valores de línea base de exportación, influenciados por el área en humedales que tiene cada cuenca y el estado de conservación actual de dichos humedales. Se destacan acá las cuencas del río Yeso, Maipo a la altura de Quebradas y el Río Negro como las principales cuencas con áreas de humedales. Al analizar el valor de exportación de sedimentos entre el escenario de línea base y de degradación se puede suponer que la degradación de estos ecosistemas podría tener efectos negativos mayores si ocurriese en alguna de estas 3 cuencas. En particular en la cuenca del Yeso, la degradación de estos ecosistemas podría suponer un incremento de 6.000 a 14.000 toneladas anuales promedio de pérdida de suelo. La cuenca del río Yeso también ofrece la mejor oportunidad de reducción de carga de sedimentos, ya que la restauración de sus humedales en condición de degradación supondría una reducción cercana a 2.000 toneladas anuales promedio de pérdida de suelos respecto a la línea base.

La misma tendencia se aprecia en las demás cuencas donde se da la misma lógica de aumento considerable de sedimentos al disminuir la cobertura y una disminución al mejorar

y aumentar cobertura existente a nivel de los humedales en proporciones similares al Yeso, pero en magnitudes menores.

Se debe señalar finalmente que estos que arroja el modelo SDR deben ser calibrados con datos de terreno de información medida en campo de la pérdida real de suelo anual en parcelas monitoreadas de humedal que las fechas no están disponibles. No obstante, los valores acá presentados corresponden a la aplicación más rigurosa posible de la herramienta SDR con los datos disponibles en fuentes secundarias de información y capturados durante la visita al terreno.

Los datos analizados para el río Yeso están también disponibles para el resto de las microcuencas, como está consignado en los anexos cartográficos de este informe.

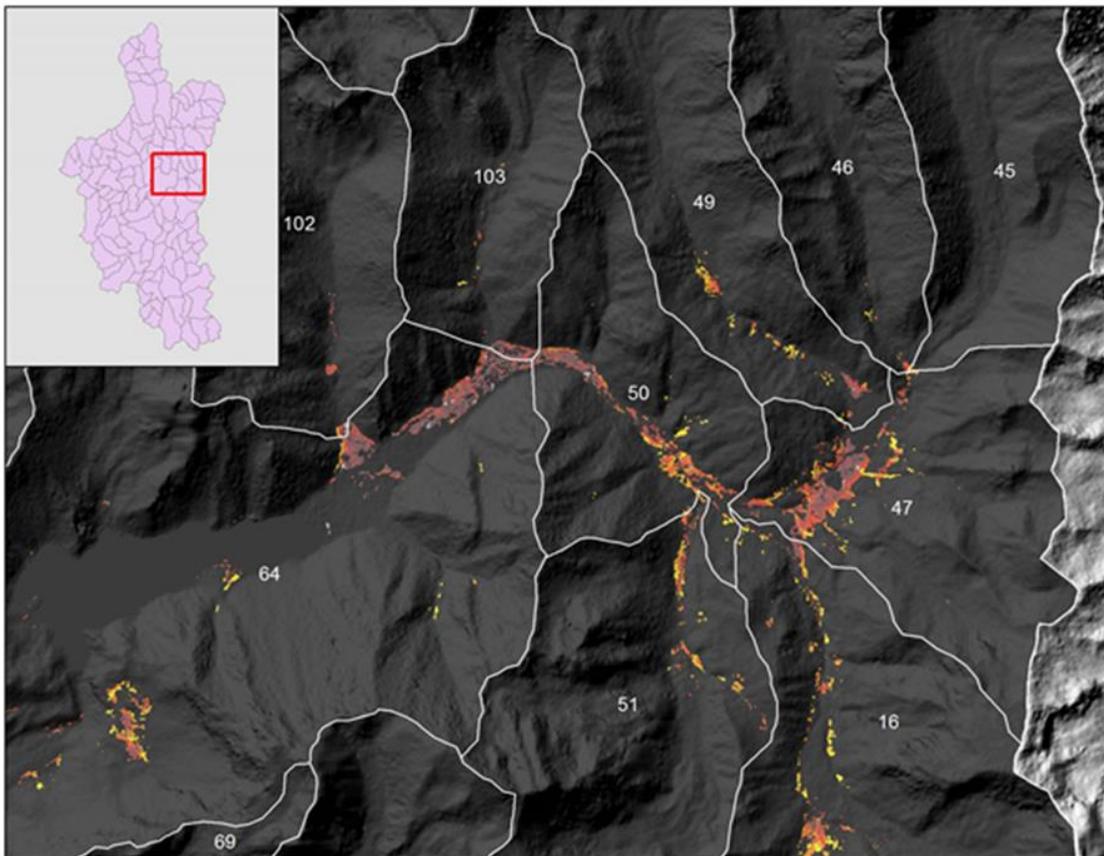


Figura 49: Incremento en exportación de sedimentos en áreas de humedal en el escenario de degradación respecto a la línea base. Los tonos amarillos representan valores potenciales más altos de incremento en pérdida de suelo.

### 2.3 Conclusiones

El modelo SDR permite determinar el valor de la vegetación que actualmente está sobre la cuenca, y verificar los efectos que una potencial restauración podría tener en la misma. De acuerdo a los resultados analizados si existiría un efecto cuantificable en la sedimentación en los drenes de las cuencas.

Para la selección de los sitios donde realizar acciones de conservación, se debe realizar dentro de las subcuencas y microcuencas un análisis de detalle de cada unidad para determinar las áreas de potencial restauración. En ese sentido, el resultado de los raster generados con las áreas de alta exportación para cada escenario por píxeles de 30 x 30 metros permite, en combinación con su cercanía a humedales y su estado de conservación, las pendientes y grado de cobertura vegetal (índices de NDVI), entre otros factores, determinar zonas donde partir con procesos de restauración. La prioridad debería centrarse en los humedales, los que han demostrado tener una alta capacidad de filtrado del agua, lo que, combinado con la oportunidad, la disponibilidad de socios, fondos disponibles entre otros factores habilitantes pueden determinar dónde priorizar el trabajo en esta zona.

Determinar la eficacia de cada humedal en la retención de sedimentos es una tarea compleja ya que el servicio ambiental de cada humedal varía según la cuenca donde se aloja. Sin embargo, su capacidad de decantación de los sedimentos presentes en los ríos y esteros de la zona fue comprobada en terreno y en las mediciones y monitoreo que se está realizando en los humedales.

Las zonas sobre el límite de la vegetación y donde las condiciones geomorfológicas determinan áreas en las que la erosión es el proceso geomorfológico predominante se aprecian como zonas en que se dificulta una restauración tradicional en función de la mejora de la cobertura vegetal. En este sentido, los humedales de las zonas bajas de los valles se transforman en la mejor solución para la retención de estos sedimentos al embalse de El Yeso y al torrente del río Maipo. Potenciar en los humedales mapeados el mejoramiento de las condiciones identificadas como malas y regulares para llegar a ser buenas y muy buenas puede tener un efecto enorme y cuantificable sobre la calidad del agua que reciben los cauces de la cuenca.

El análisis efectuado para la determinación de áreas de humedales y su estado de conservación se presenta como uno de los resultados más valiosos de este estudio. Debido a que se ha verificado en terreno la correspondencia del análisis sólo en el área de los humedales del Yeso, se sugiere continuar este trabajo y generar una capa que determine con precisión los límites de los humedales con imágenes satelitales de alta resolución y una verificación en terreno del estado de conservación identificados a través de las bandas infrarrojas del sensor Sentinel 2.

Por otra parte, una vez que se obtengan resultados de sedimentación en los cauces investigados como parte del proyecto HSBC, modelos como éste podrían ser calibrados para obtener modelamientos precisos que permitan cuantificar de mejor manera los efectos de las acciones sobre la sedimentación en la cuenca. Esta calibración, entre otras cosas, permitiría conocer el valor exacto de toneladas que exporta cada pixel o área de la total de las subcuencas permitiendo utilizar modelos hidrológicos más complejos que incorporen los datos del monitoreo a nivel de parcela y el enfoque de gran cuenca (SWAT, J2000, WEAP, Modflow u otros).

Una de las limitaciones encontradas en el uso del módulo SDR es que usa datos totales anuales de precipitación y su ponderación elimina efectos de la intensidad de la lluvia, crecidas y lluvias inusualmente intensas que sí podrían incluirse en modelos de pase diario como SWAT u otros.

La continuación de este estudio requiere de una base sólida de información en terreno por lo que se requiere continuar el monitoreo de los humedales de la cuenca del Yeso y explorar la replicabilidad y expansión a otras zonas dentro del área de estudio. También profundizar el análisis de la condición de los humedales permitiría de manera más certera destinar los fondos disponibles a la mejora de los sitios más relevantes.

A modo de reflexión final, cabe destacar que las metodologías desarrolladas para la generación de los inputs de este estudio ya han sido utilizadas en otros programas de TNC en Latinoamérica, en los proyectos de Fondos de Agua, debido a que permiten el desarrollo de capas de Uso y Cobertura actuales de suelo, identificación ecosistemas de interés como son los humedales y la obtención de información sobre su estado de conservación zonas donde prácticamente la información era inexistente.

### 3. DIFUSIÓN Y EDUCACIÓN AMBIENTAL

#### 3.1 DIFUSIÓN

El 26 de octubre de 2014 tuvimos una salida a terreno con el Comité de Expertos Asesores del proyecto. Este comité tuvo el primer objetivo de asesorarnos en la identificación de los humedales donde se enfocaría el proyecto y estuvo compuesto por: Mariana Musicante, experta en entomología que nos asesoró en muestreo de macroinvertebrados (Universidad Nacional de Chilecito); Ricardo Grau, nos asesoró en dinámica de humedales (Instituto de Ecología Regional, Universidad Nacional de Tucumán); Alfredo Grau, quien nos apoyó en diseño de instauración (Instituto de Ecología Regional, Universidad Nacional de Tucumán); Craig Saunders, hidrólogo que nos apoyó como voluntario a lo largo del proyecto; Carlos Olmos, investigador independiente; Leonardo Paolini, quien a través de un dron realizó un levantamiento topográfico de la zona de interés (Instituto de Ecología Regional, Universidad Nacional de Tucumán) y Máximo Liberman, Investigador de la Universidad Mayor de San Andrés.



Comité de Expertos Asesores / @TNC.

El lunes 2 de marzo de 2015 se realizó el lanzamiento del proyecto “Los humedales como solución natural para mejorar la seguridad hídrica en la Cuenca del Maipo, Región Metropolitana de Chile”. En esta oportunidad se dio a conocer el proyecto al equipo del Banco HSBC, con invitados internacionales que expusieron sobre la importancia de los humedales y como en conjunto podemos ayudar a cuidarlos. Además, se dio inicio a las actividades de voluntariado (dos a lo largo de todo el proyecto).

En febrero de 2015 se grabó el primer video de difusión del proyecto, con el objetivo de dar a conocer el proyecto e introducir conceptos claves, como “humedales” e “infraestructura verde”. Este video dio el contexto bajo el cual se realiza este proyecto, explicó la importancia de los humedales, la función como reguladores y purificadores del agua que abastece a Santiago y porque es necesario conservarlos, siempre dentro del contexto del Fondo de Agua para Santiago y haciendo énfasis en el trabajo científico de nuestros expertos.

El segundo video de difusión se hizo en septiembre de 2015 y en esta oportunidad se explicó con más profundidad el rol del humedal en la purificación de agua y mostramos el trabajo de los voluntarios del banco y sus familias en la primera salida a terreno, efectuada en marzo de 2015.

En abril de 2016 estuvo listo un video inmersivo de 360° sobre el proyecto de investigación de los humedales altoandinos. Este video se ha convertido en una de nuestras principales herramientas para difundir el trabajo que estamos realizando en la cuenca del río Yeso.

El tercer y último video de difusión del proyecto se grabó en julio de 2016 con un carácter mucho más técnico y educativo, en esta oportunidad, nuestro equipo de conservación mostró en terreno la infraestructura e instrumentos que tenemos instalados en el humedal y cual es la finalidad de cada uno de ellos. El objetivo de este video fue entregar conocimiento técnico del trabajo investigativo y como estamos obteniendo la información que nos permitirá con base científica, determinar la capacidad de purificación y retención de agua de los humedales altoandinos, entre otras cosas.



Sebastián Bonelli, Freshwater Specialist y equipo de grabación / @Daniela Cabezas, TNC.

El 23 de agosto de 2016 en el Hotel Intercontinental, se realizó junto con el Centro de Cambio Global, el seminario “Infraestructura Verde para la Adaptación al Cambio Climático”, donde diferentes expositores abordaron experiencias nacionales e internacionales de la adaptación de las ciudades y cuencas al cambio climático, y que tipo de medidas se pueden implementar para aportar a la seguridad hídrica de nuestras ciudades. Una de las exposiciones fue sobre el estudio en los humedales altoandinos de la cuenca del río Yeso.



De izq., a der.: Sebastián Vicuña, Director del Centro de Cambio Global (PUC); Leonel Sierralta, Ex Director del Programa de Conservación de los Andes del Sur (TNC); Carlos Estévez, Director de la Dirección General de Aguas, Paulo Petry, Science Coordinator-Water Security (TNC), @Eduardo Bustos, PUC.

El 8 de septiembre de 2016 TNC presentó los avances del Fondo de Agua para Santiago y del proyecto de investigación de humedales altoandinos, a la mesa del Acuerdo Voluntario de Gestión de Cuencas, subcuencas Maipo-Clarillo. Este Acuerdo tiene como objetivo contribuir al desarrollo sustentable de las Sub cuencas de los ríos Maipo y Clarillo y está compuestas por representantes de entidades gubernamentales, empresas privadas, organizaciones de la sociedad civil y académicas, todas con injerencia sobre el territorio.

El 24 de noviembre de 2016 se firmó un importante convenio de colaboración entre TNC y la Fundación Caserta, con el objetivo de generar nueva información sobre educación ambiental, seguridad hídrica de la cuenca del Maipo y trabajo con comunidades para guiar políticas y estrategias de conservación de la zona, entre otros. TNC fue contraparte técnica para la creación del “Mundo del Agua” en el Parque Educativo Likandes (propiedad de la Fundación Caserta), que tiene como finalidad educar sobre la importancia del agua, los humedales y su conservación. Con esta colaboración, esperamos llegar a cientos de personas con la importancia del cuidado del agua y los humedales.



Firma del convenio entre TNC y la Fundación Caserta / @Daniela Cabezas, TNC.

### 3.2 EDUCACIÓN AMBIENTAL

Parte de los compromisos con el Banco HSBC fue involucrar a los colaboradores del Banco y a sus familias en el proyecto. Para esto, hicimos dos visitas a técnicas con los voluntarios a los humedales, para explicarles en terreno el objetivo del proyecto y mostrarles como llevamos a cabo la investigación, hicimos un concurso fotográfico donde premiamos las mejores fotografías tomadas esos días en los humedales y generamos 5 boletines electrónicos enfocados en entregar información sobre los humedales, su conservación y avances del proyecto a los ejecutivos del Banco.

La primera salida a terreno con voluntarios del Banco HSBC y sus familias se realizó el 7 de marzo de 2015, día en que 36 personas participaron en actividades de avistamiento e identificación de aves, levantamiento topográfico, observación y registro de flora y reparación de cercas.



Primer grupo de voluntarios y equipo de TNC y Universidad de Chile.  
@Solange Zamorano, TNC.

La segunda actividad de voluntariado con el equipo del Banco HSBC y sus familias, se llevó a cabo el 9 de abril de 2016. En esta oportunidad contamos con la participación de 28 personas y trabajamos en limpiar los pozos y paneles solares, hicimos aforos de caudal y descargamos datos de sensores y cámaras trampa.



Segundo grupo de voluntarios y equipo de TNC y Universidad de Chile / @TNC.

Durante las dos visitas técnicas a los humedales, pedimos a los asistentes que tomaran fotografías y luego las postularan a un concurso fotográfico interno. El 5 de julio en oficinas de HSBC, hicimos entrega de los premios.



Premiación concurso fotográfico / @Felipe Rubio, TNC.

Finalmente, el 8 de noviembre de 2016, fuimos invitados por la Seremi de Medio Ambiente de la Región Metropolitana a participar de la “4ª Feria Regional de Educación para el Desarrollo Sustentable de la Región Metropolitana 2016: ‘Educando comunidades cuidamos el agua, el aire y nuestro entorno’”. Esta feria tuvo como objetivo dar a conocer diferentes experiencias de la incorporación de la sustentabilidad en establecimientos educacionales, municipios, organizaciones o universidades y nosotros participamos en un stand con el video de realidad inmersiva en 360° que muestra el trabajo que estamos realizando en los humedales. Cerca de 120 niños de todas las edades vivieron la experiencia de estar en los humedales altoandinos y aprendieron sobre el proyecto y porque es importante cuidar los humedales. Además, le pedimos a los asistentes escribir sus compromisos para cuidar el planeta y pegarlos en un árbol que instalamos en la Feria.



Stand | Niños viendo videos 360° | Compromisos para cuidar el planeta  
@ David Messutto, TNC. @ Daniela Cabezas, TNC.

## Agradecimientos

The Nature Conservancy desea agradecer a las siguientes personas e instituciones que colaboraron en el marco del presente proyecto:

- Al Banco HSBC a través de su Water Programme, por el financiamiento para este proyecto de investigación.
- A la Familia Cardone, por su apoyo durante la investigación y por facilitar su terreno para la realización del estudio.
- Al Centro de Cambio Global por el apoyo en la organización del Seminario “Infraestructura Verde para la Adaptación al Cambio Climático”.
- A la Fundación Caserta, por apoyar la educación ambiental especialmente del cuidado de los humedales a través de la creación del Mundo del Agua en el Parque Likandes.
- Al Parque Almendro, por facilitarnos la logística de alojamientos y comidas durante todo el proyecto. La buena disposición durante estos dos años nos facilitó enormemente la ejecución de las actividades de campo.