

Modelación no saturada en suelos del Salar de Atacama



Cristian Ortiz

Ponencia realizada durante el Quinto Webinar 2022 de Alhsud Chile.

Cristian Ortiz es ingeniero agrónomo, magíster en Ciencias de la Ingeniería por la Universidad Católica y actual gerente general e hidrogeólogo senior en Hidroestudios.

En el norte de Chile existen una serie de sistemas vegetacionales que dependen de los acuíferos para su aprovisionamiento de agua. El bombeo de agua subterránea genera descensos del nivel de la napa, que pueden provocar cambios en el contenido de humedad en el suelo en la zona radicular de las plantas, lo que puede generar una disminución en el aprovisionamiento de agua de las plantas. El efecto está mediado por las características de la zona no saturada, por lo que requiere ser caracterizada y modelada.

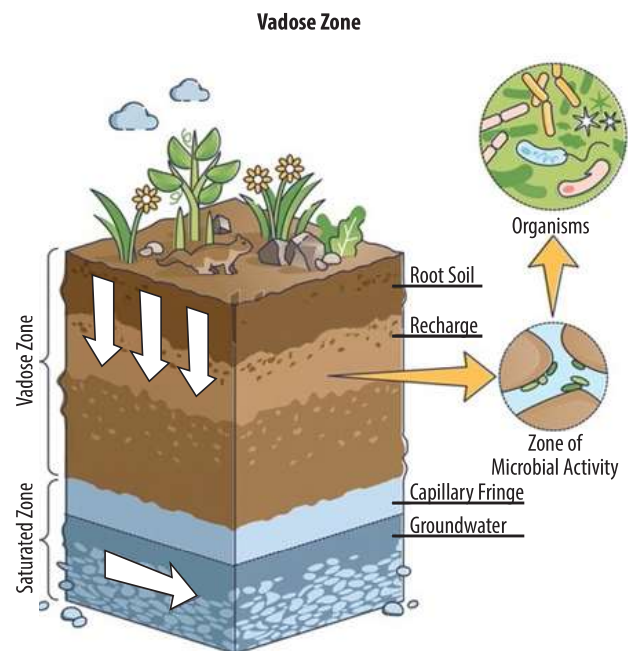
Este artículo muestra los resultados de los trabajos desarrollados para el Estudio de Impacto Ambiental (EIA) "Plan de reducción de extracciones en Salar de Atacama", presentado por SQM Salar, en enero de 2021.

El estudio fue desarrollado por Hidroestudios y Geobiota. El primero desarrolló

modelamientos del flujo de agua en condiciones no saturadas, mientras que Geobiota elaboró los estudios de línea de base de vegetación y fauna, que fueron utilizados para el desarrollo de una metodología para evaluar de los efectos del bombeo de agua

sobre la vegetación y derivados de lo anterior sobre la biodiversidad. La metodología desarrollada también es aplicable a cualquier otra condición que genere una disminución del nivel de la napa, como por ejemplo el efecto del cambio climático.

Figura 1: Zona vadosa o zona no saturada.



Marco teórico

Como se observa en la *Figura 1*, la zona no saturada o zona vadosa es la porción de suelo ubicada entre la superficie del terreno y la superficie del acuífero. Está compuesta por sólidos (partículas de suelo) y por poros. El espacio poroso está compuesto por agua y aire (no saturado), a diferencia del acuífero, donde los poros están completamente saturados con agua.

El comportamiento de estos materiales se caracteriza en términos de su capacidad de retener agua y de su facilidad para transmitirla, lo que se relaciona, a su vez, con la posibilidad de sostener la vegetación. Esta capacidad de retención depende del tamaño de las partículas.

El esquema de la *Figura 2* ilustra el funcionamiento de una zona no saturada. En la parte superior se observa vegetación, en la zona inferior se aprecia la napa freática y sobre esta, una zona que se denomina franja capilar. Entre medio se ubica la zona no saturada del suelo, donde el contenido de humedad dependerá de ciertas características del suelo, que se revisarán más adelante.

El perfil hídrico está asociado al contenido de humedad. En la napa freática todos los poros están completamente saturados con agua y, por lo tanto, el contenido de humedad es equivalente al contenido de humedad saturado o θ_s .

En las zonas vadosas o no saturada existe un ascenso del agua por efecto del fenómeno denominado capilaridad, que depende de la distribución del tamaño de poros, el que está relacionado con la distribución del tamaño de partículas de suelo.

En la medida que se asciende hacia la superficie del suelo, esta zona está expuesta a las condiciones atmosféricas, que puede ser seca o húmeda, en función de fenómenos como la precipitación o la evaporación. Naturalmente, cuando existen períodos de precipitación intensa, el contenido de humedad en ese sector será igual al nivel de humedad saturado; mientras que en períodos sin precipitación y con alta evapora-

ción, la superficie del suelo estará seca.

La vegetación que está en superficie no necesariamente será abastecida desde el acuífero, pues dependerá principalmente de la profundidad de la napa. Es decir, si la profundidad es suficientemente pequeña (metros), la franja capilar asciende hasta la zona donde están las raíces y las plantas pueden ser abastecidas de agua desde el acuífero. Cuando la profundidad es mucho mayor, entonces, esa vegetación se abastece de otra fuente de agua, normalmente proveniente de escurrimientos superficiales y/o precipitación.

En la tabla de la *Figura 3* se observan los tamaños de partículas y el tamaño de la

Figura 2: Funcionamiento de una zona no saturada.

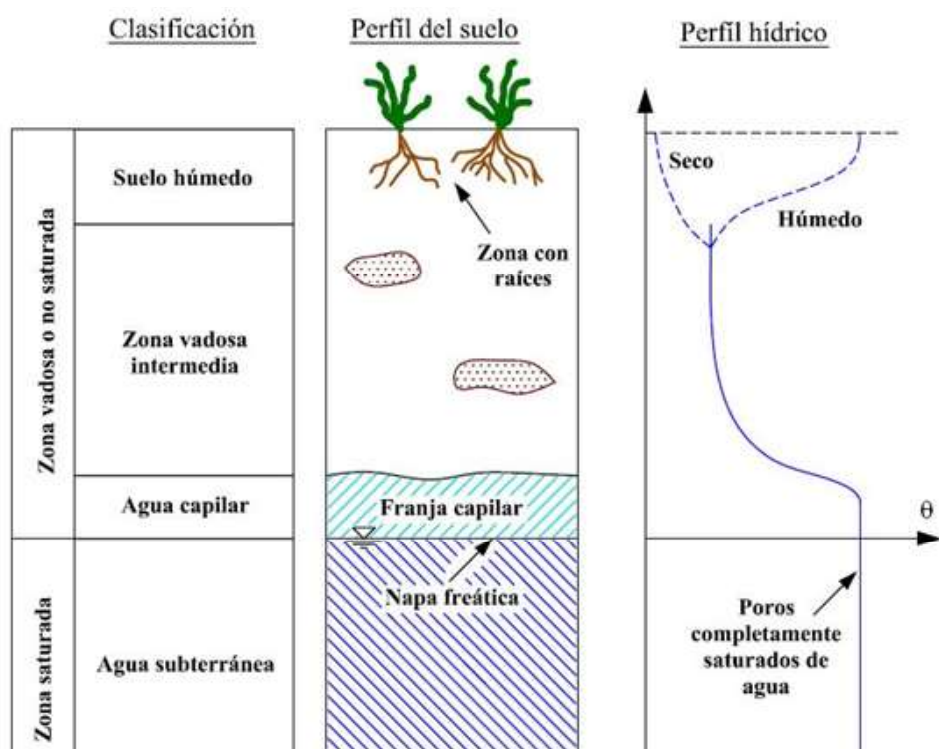


Figura 3: Tamaño de grano y franja capilar del material.

Material	Tamaño de grano (mm)	Franja capilar (cm)
Grava fina	2-5	2,5
Arena muy gruesa	1-2	6,5
Arena gruesa	0,5-1	13,5
Arena mediana	0,2-0,5	24,6
Arena fina	0,1-0,2	42,8
Limo	0,05-0,1	105,5
Limo	0,02-0,05	200*

*Sigue creciendo después de 72 días

franja capilar de materiales que van de la grava fina al limo, pasando por arenas de distinto tamaño (muy gruesa, gruesa, mediana y fina). Se aprecia que el tamaño de la franja capilar está íntimamente ligado al tamaño de partículas. Las gravas finas (2 a 2,5 milímetros) generan franjas capilares del orden de 2,5 centímetros, mientras que los limos (0,02 a 0,05 milímetros) producen franjas capilares casi 100 veces mayores, es decir, 200 centímetros o más.

Tipos de agua

El agua capilar está sometida a distintas fuerzas que la retienen en el suelo. En fun-

ción de su retención se pueden identificar tres tipos de agua que están en contacto con las partículas del suelo: agua absorbida, agua capilar y agua drenable o gravitacional (ver *Figura 4*).

El tipo de agua que acostumbra a tratarse en hidrogeología es el agua drenable o gravitacional, que es agua contenida en los poros más grandes del suelo, los que al ser de mayor tamaño la retienen con menos fuerza y por tanto, el agua se puede mover libremente por gravedad.

El agua gravitacional escurre y normalmente puede ir más lejos de donde están ubicadas las raíces, trans-

formándose en la recarga de los acuíferos. En tanto, el agua capilar es la que queda retenida y que las plantas son capaces de captar desde el suelo. Finalmente, el agua absorbida es la que está más pegada a las partículas y prácticamente no puede extraerse de ninguna manera.

Capacidad de retención de humedad

En la *Figura 5* se observan distintos tamaños de partículas, que van de la arcilla a la grava, donde se presenta la porosidad total, la capacidad de retención y el coeficiente de rendimiento específico. Se entiende que la porosidad total es la suma de la capacidad de retención y del coeficiente de rendimiento específico. De esta forma, suelos más finos, como arcillas, poseen una gran capacidad de retención, debido a la presencia de

poros pequeños y muy bajo coeficiente de rendimiento específico. El agua está retenida en poros muy pequeños y se transforma en agua capilar, que finalmente no es posible de bombear.

Por el contrario, al moverse hacia granulometrías más gruesas, como el limo, arena o grava, ocurre un efecto contrario. La capacidad de retención disminuye hasta prácticamente cero y el coeficiente de rendimiento específico aumenta.

Tamaño de las partículas

Una de las características principales de la capacidad de retención es el tamaño de la partícula, que tradicionalmente se asocia a curvas granulométricas, que representa la proporción en peso de cada tamaño de partícula.

No obstante, para efectos del flujo de agua se utiliza otro tipo de propiedad, que es la textura, una clasifica-

Figura 4: Tipos de agua en contacto con el suelo.

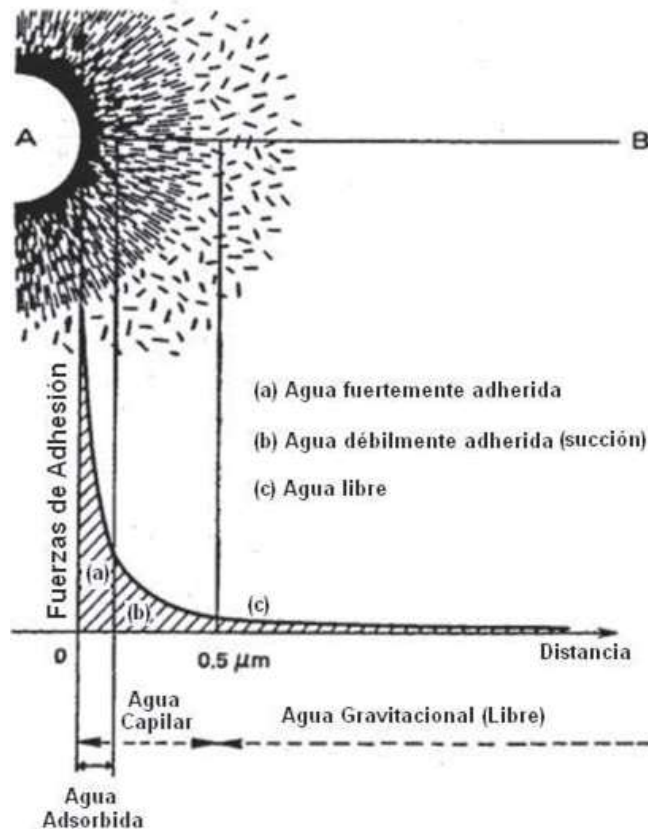


Figura 5: Capacidad de retención de humedad, porosidad y coeficiente de rendimiento específico del material.

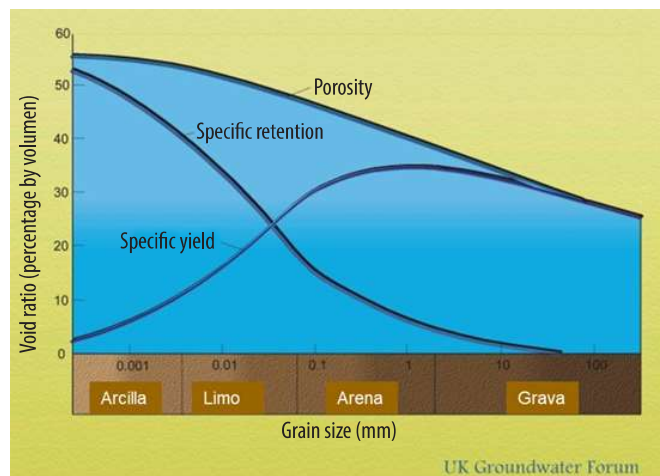
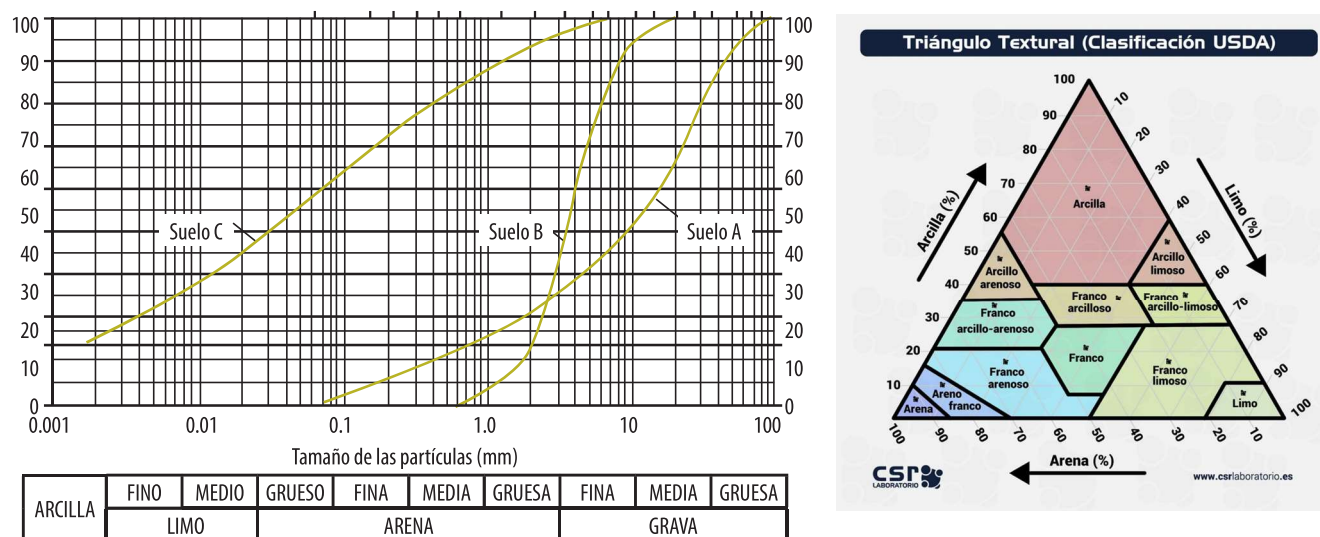


Figura 6: (a) Distribución del tamaño de partículas normalmente descritas a través de curvas granulométricas y (b) triángulo textural.



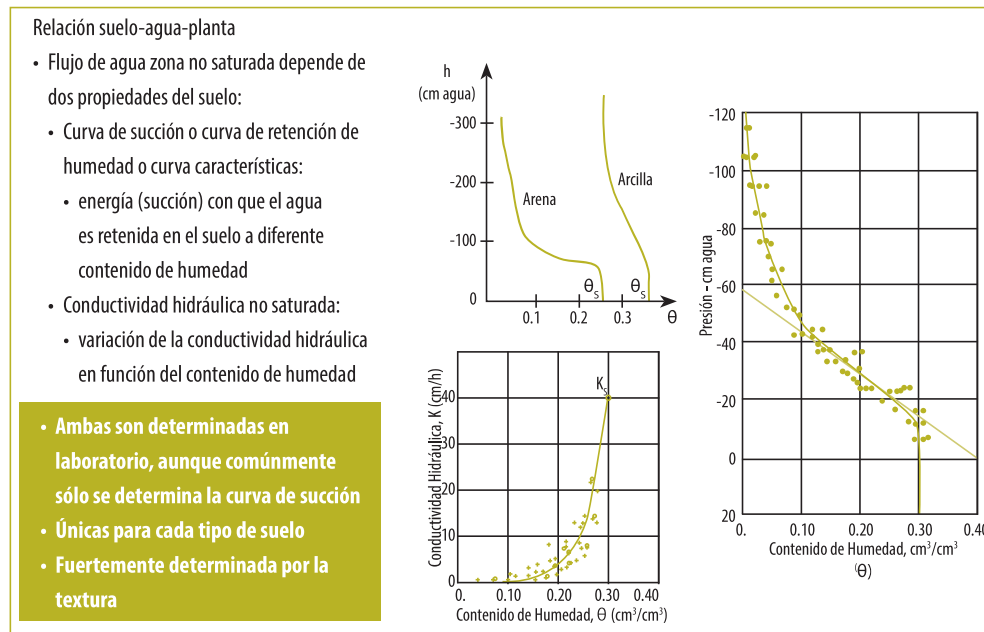
ción asociada al suelo y que está vinculada con otras propiedades agronómicas del suelo. La textura, que en gran medida determina la capacidad de retención de humedad de un suelo, es una propiedad que se define en función de la proporción (%) de arenas, limos y arcillas.

Como se aprecia en el triángulo textural de la *Figura 6* —que contiene porcentajes y define doce clases texturales según la clasificación USDA—, la arcilla, arena y limo se ubican en cada punta de la figura, mientras que al medio se observan suelo franco, franco limoso, franco arcilloso, franco arenoso, y otras distintas combinaciones.

Relación suelo, agua y planta

Existen dos propiedades que se asocian al agua y al tamaño de la partícula: (1) la curva de succión —también conocida como curva

Figura 7: Relación suelo-agua-planta.



de retención de humedad o curva característica—, que representa la fuerza (o succión) con la que es retenida el agua al interior del suelo; y la (2) conductividad hidráulica no saturada, que es la variación de la conductividad hidráulica en función

del contenido de humedad de un suelo.

La curva de succión relaciona el contenido de humedad con la succión que es retenida el agua, en el suelo. En el caso presentado en el gráfico de la *Figura 7*, la succión está expresada en

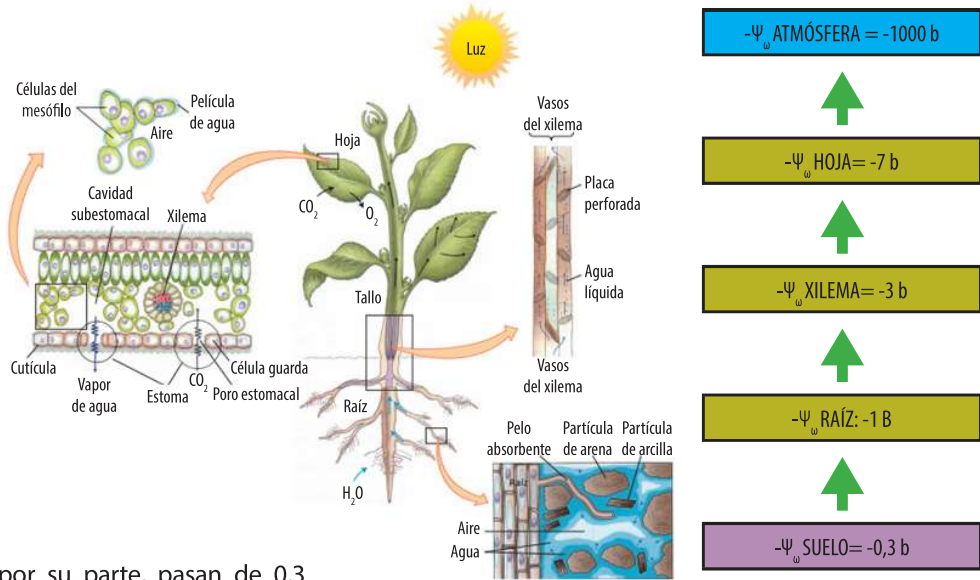
centímetros de agua y en valores negativos. Cabe señalar que cuando un suelo está completamente saturado y no existe succión, es decir, es cero. Como fue mencionado anteriormente, el agua es retenida con menor fuerza o succión cuando se

encuentra alojada en poros más gruesos. En la medida de que un suelo se seca, el agua se quedará retenida en poros cada vez más pequeños y por tanto, retenida con mayor fuerza. Las curvas de succión observadas son únicas para cada tipo de suelo y son determinadas a través de pruebas de laboratorio.

La conductividad hidráulica no saturada, en tanto, que es también una propiedad del suelo, varía en función del contenido de humedad. En la medida que aumenta el contenido de humedad también se incrementa la conductividad hidráulica. En acuíferos, cuando el 100% de los poros están repletos con agua, es decir, con el contenido de humedad saturado, la conductividad hidráulica es igual a la utilizada en la ecuación de flujos en acuíferos.

Respecto del agua al interior de la planta, en la *Figura 8* puede apreciarse una representación del movimiento del agua en la planta, que va desde el suelo hasta la atmósfera, pasando a través de las estructuras de las plantas. Ocurre ciento por ciento por gradientes de energía (succión), es decir, la planta no gasta energía en este proceso físico. En la *figura* se muestra cómo el agua ingresa a la raíz y desde aquí se mueve al tallo y las hojas, para finalmente salir a través de los estomas (pequeñas válvulas ubicadas en la hoja que también son utilizados para la absorción de CO₂). Los gradientes de succión,

Figura 8: Movimiento del agua en la planta.



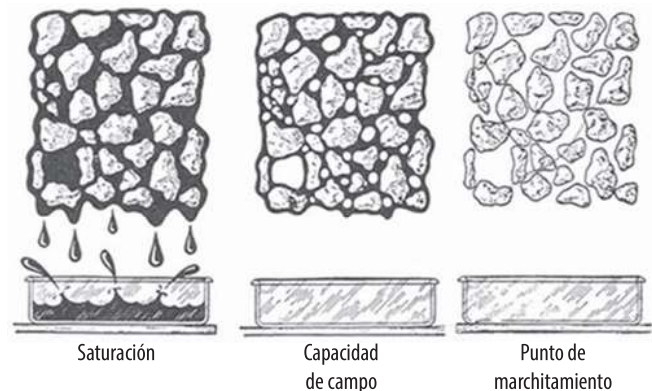
por su parte, pasan de 0,3 bares en el suelo a 1000 o más bares en la atmósfera.

Para efectos del diseño de riego, la agronomía define dos conceptos relevantes: la capacidad de campo (cantidad de agua que queda retenida) y el punto de marchitez permanente (PMP), que es el punto en el cual las plantas no pueden seguir extrayendo agua desde el suelo (ver *Figura 9*).

La capacidad de campo se define como la cantidad de agua que está retenida en el suelo a 0,33 bares o atm o 3,3 MPa. El punto de marchitez permanente, en tanto, es el agua que está retenida a 15 bares o atm o 1,5 MPa (definido para plantas cultivadas).

Dado que la capacidad de campo representa la máxima capacidad de retención de un suelo (si existe más agua esta se moverá por gravedad más debajo de las raíces) y que el punto de

Figura 9: Saturación, capacidad de campo y Punto de Marchitez Permanente (PMP).



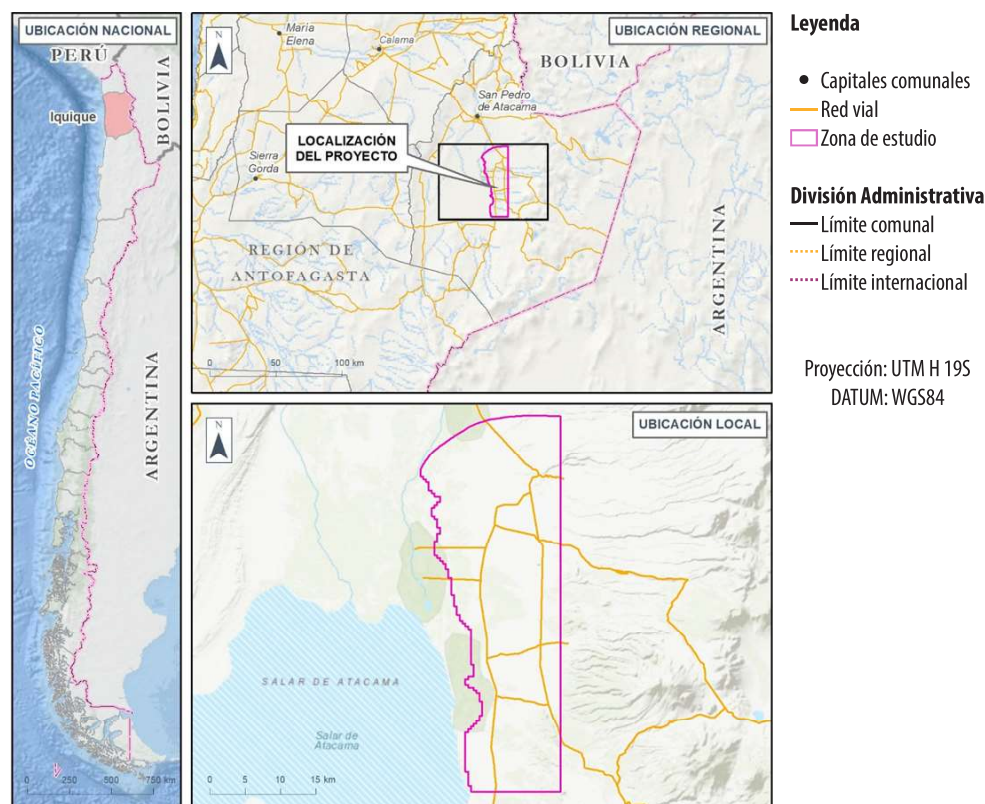
marchitez es la mínima capacidad o agua que puede ser utilizada por una planta, la humedad disponible que queda en un suelo es la diferencia entre el contenido de humedad entre capacidad de campo y punto de marchitez permanente.

Área de estudio

El área de estudio corresponde al Salar de Atacama, específicamente al acuífero

del borde este. Se trata de un acuífero aluvial de agua que, por el oeste limita con la zona marginal conformada por depósitos salinos de sulfatos y carbonatos (ver *Figura 10*), y más al oeste, colinda con el acuífero del núcleo del Salar de Atacama, sector donde se encuentran grandes depósitos de sales, con salmuera ricas en litio (Li), potasio (K) y ácido bórico (H₃BO₃).

Figura 10: Locación del proyecto en el Salar de Atacama.



El acuífero es recargado desde la parte alta de la cuenca, es utilizado como fuente de agua para la producción de la minería no metálica y abastece de agua a amplias zonas de vegetación. Aflora generando cuerpos de agua superficial.

Vegetación

La vegetación está distribuida en sentido este-oeste, siguiendo patrones de profundidad de la napa y gradientes de salinidad. En el mapa de *Figura 11* se pueden observar los distintos tipos de vegetación, donde cada uno de los colores representa las distintas formaciones vegetales, como el matorral de rica rica-

pingo pingo, el matorral de cachiuyo-ojalar, el matorral de breá, el matorral de káuchal, la pradera de lukupa, la pradera de grama salada y la pradera de junquillo-totora-suncho.

En tanto, los puntos azules que allí se aprecian corresponden a los pozos de bombeo de agua, cuyo efecto sobre la vegetación es el que fue evaluado.

A modo de ejemplo, en la *Figura 11* se ilustra el perfil del borde este, donde un sector del acuífero presenta la napa prácticamente superficial, en la zona que se denomina marginal, entre el acuífero aluvial y el núcleo del Salar de Atacama. Yendo en dirección este,

la profundidad de napa comienza a aumentar, observándose en el sector oriental profundidades de la napa superiores a 50 metros de profundidad.

Desde el punto de vista hídrico, las plantas se distribuyen en tres sectores: (1) zona de vegetación hidromorfa (suelos saturados o cercanos a la saturación); (2) zona conectada al acuífero (suelos no saturados); y (3) vegetación desconectada del acuífero (largo raíces).

En general, las plantas no viven con las raíces en el agua, a excepción de la vegetación hidromorfa, ubicada en la parte más baja de la cuenca, donde la napa está más cercana a la superficie.

Hacia el este la profundidad empieza a aumentar en torno a los 2 a 6 metros, donde existe una vegetación que se ha denominado como conectada con el acuífero, donde habitan especies como la breá y el cachiuyo, que corresponden a vegetación arbustiva. Finalmente, en la parte más alta, se observa prácticamente una sola especie, que es la pradera de lukupa. En la zona marginal del Salar de Atacama, en tanto, que es donde se puede advertir que la alta salinidad tiene efectos, se advierten vastos sectores en los cuales no hay vegetación.

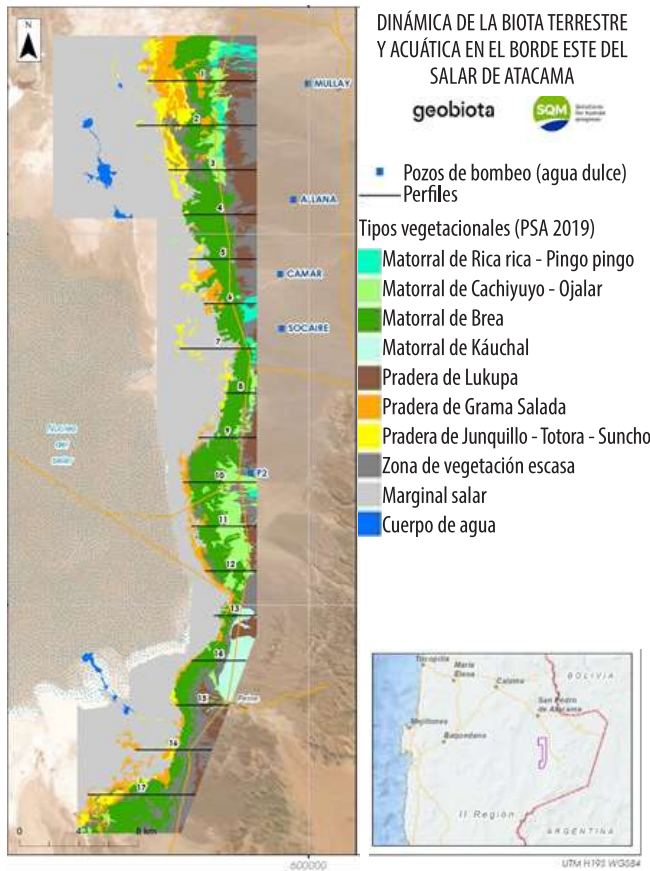
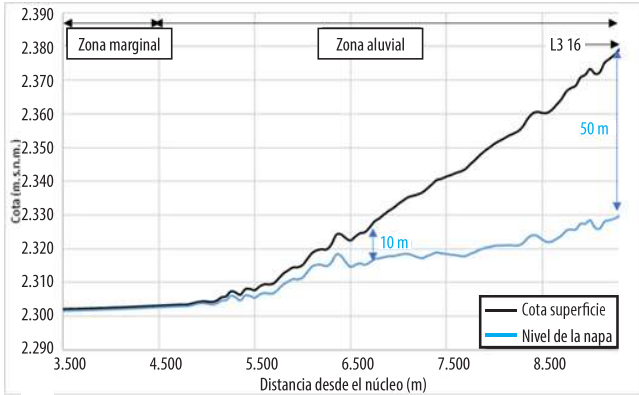
Metodología de trabajo

El diagrama de flujo, disponible en la *Figura 13*, muestra las dos líneas de trabajo que se desarrollaron en paralelo: la hídrica o hidráulica (en azul y gris) y la vegetacional o biológica (en verde y amarillo).

En el plano hidráulico, comienza con un diseño de campaña de muestreo de suelo, para después avanzar a esta última y luego iniciar la etapa de laboratorio, donde se toman las muestras y se mide la curva de succión. Posteriormente, se da paso a la confección del modelo no saturado 1D. La información de la profundidad de la napa actual se realiza en base a mediciones con modelo numérico y a una interpolación.

La línea de trabajo biológica, en tanto, se inicia con el diseño de la campaña

Figura 11: Se observa que la vegetación está distribuida en el sentido este-oeste siguiendo patrones de profundidad de la napa y gradientes de salinidad.



de medición de raíces, que es seguida por la ejecución de campaña y el análisis de resultados. Al cruzar la interpolación de la profundidad actual con las raíces es posible estimar cuál es la vegetación que está conectada con el acuífero y que se abastece de agua, así como determinar cuál cuenta con otras fuentes de abastecimientos, como escurrimientos superficiales que se producen cuando hay precipitaciones.

Cuando se cruza la información del modelo no satu-

rado con la profundidad futura es factible determinar el efecto del bombeo futuro y observar qué ocurre con el punto de marchitez permanente, cómo cambia y cómo se mueve en este perfil de suelo.

Puntos de muestreo

Respecto del diseño de los puntos de muestreo de suelo, el criterio para ello fue representar el borde en toda su extensión —con una ubicación cercana al muestreo de raíces (calicatas)—, considerar el

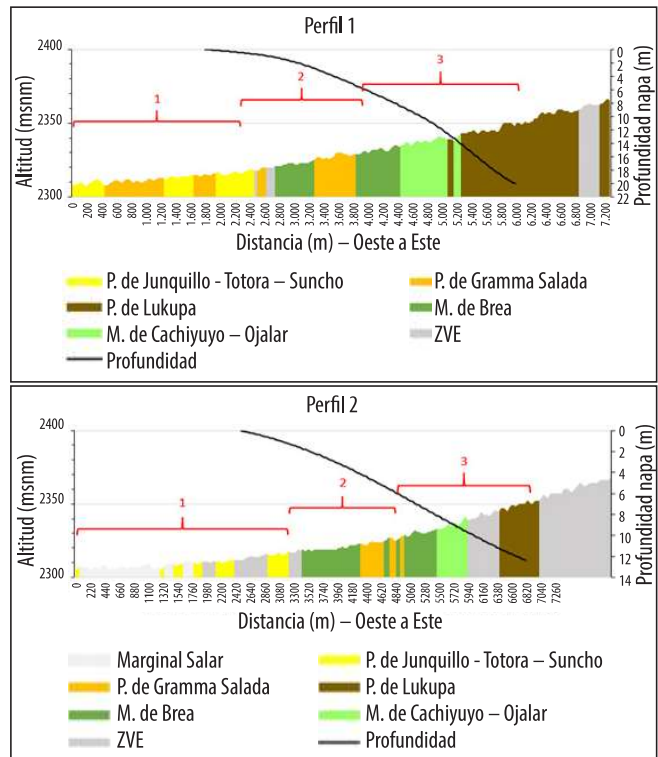


Figura 12: Vegetación hábitat para distintos tipos de fauna.



Figura 13: El diagrama de flujo muestra la metodología de trabajo desarrollada durante la ejecución del proyecto.

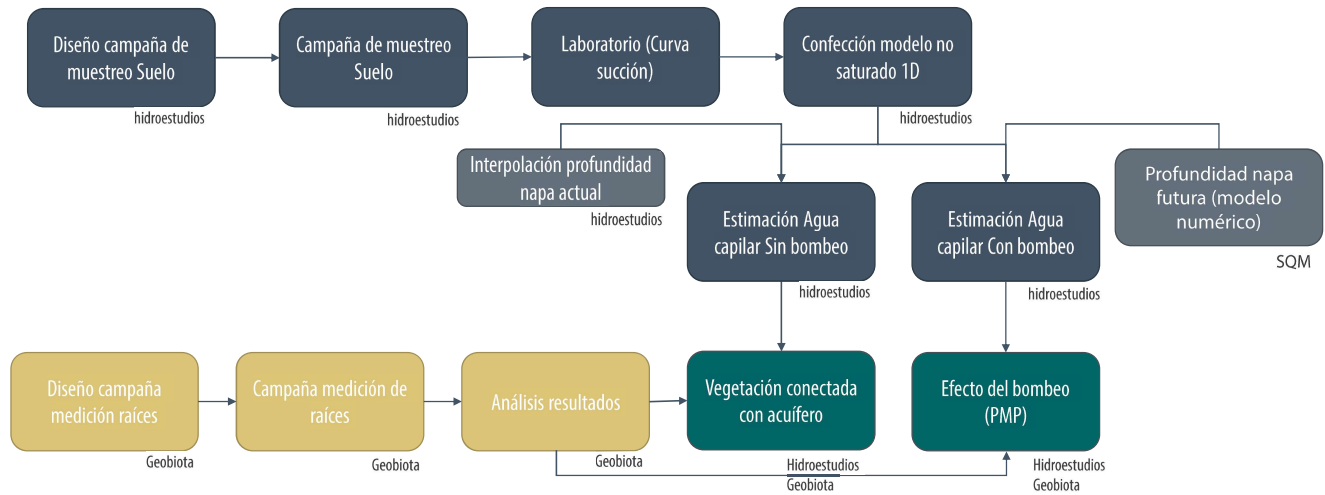
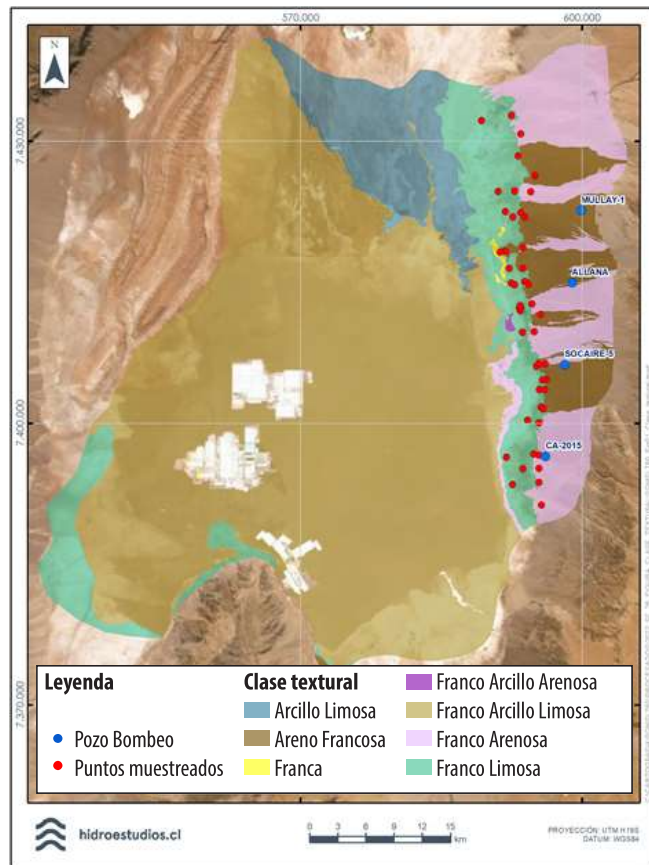


Figura 14: Diseño de puntos de muestreo de suelo.



tipo de vegetación (ubicarlos en zona de vegetación *brea-atriples*) y situarlos fuera de la Reserva Nacional Los Flamencos (RNLF).

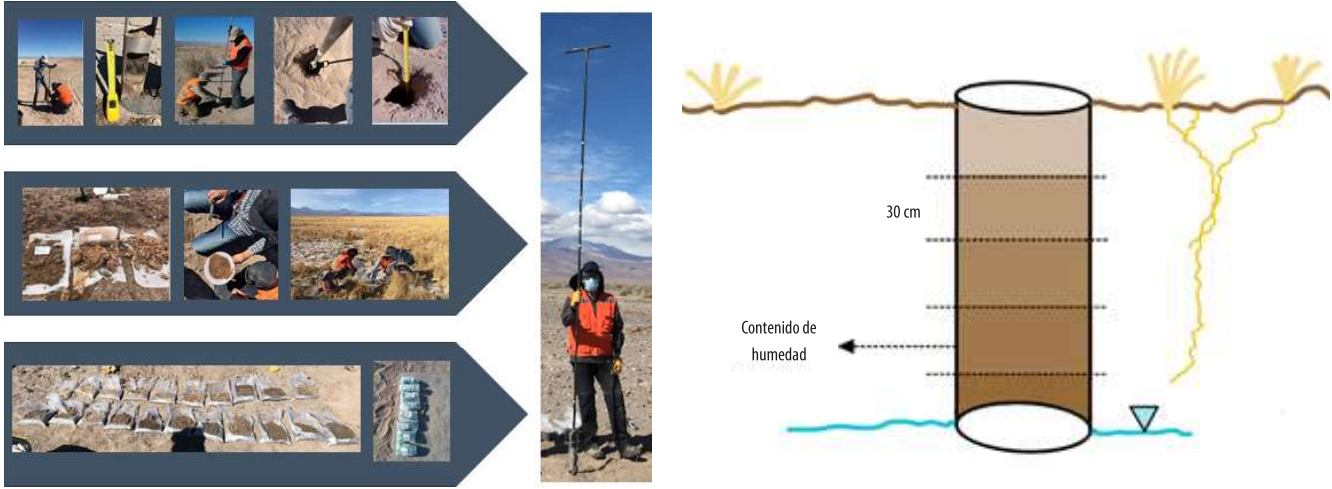
Se confeccionó un mapa (ver Figura 14) con distintos tipos de texturas asociadas al funcionamiento de los escurrimientos y corridas de agua o aluviones que se producen durante la época estival, con texturas normalmente medias a finas, y en la parte más baja (sector verde del mapa), con texturas más

finas, asociadas al limo. Los puntos rojos que se aprecian en el mapa corresponden a los 64 puntos de muestreo en distintas profundidades.

Toma de muestra de suelo

Todas las muestras se tomaron mediante una perforación con un barreno manual y retiro de una porción de suelo cada 30 centímetros hasta llegar al nivel del acuífero (ver Figura 15). Se fue perforando, tomando

Figura 15: Trabajo en terreno para la toma de muestra de suelo.



muestras y realizando una descripción *in situ* del tipo de suelo, procurando identificar los cambios texturales.

Respecto de la profundidad, se tomó una muestra por cada tipo textural que se encontró en profundidad y hubo sectores en los cuales se alcanzó a llegar a la napa, con muestras de 1 a 3 metros y otras más profundas que llegaron hasta los 6 metros.

Es necesario contar con 1 kilo de muestra para el envío a laboratorio y determinación de puntos representativos para toma de muestras en perfil.

Determinación de curvas de succión

Posterior a la etapa de toma de muestra y análisis en laboratorio, el resultado entregó distintos puntos, que se observan en el gráfico de la *Figura 16*, con la succión en centímetros y el contenido de humedad volumétrica. Se midieron 0,05; 0,5; 1; 5; 15 bares, de-

Figura 16: Determinación de curvas de succión.

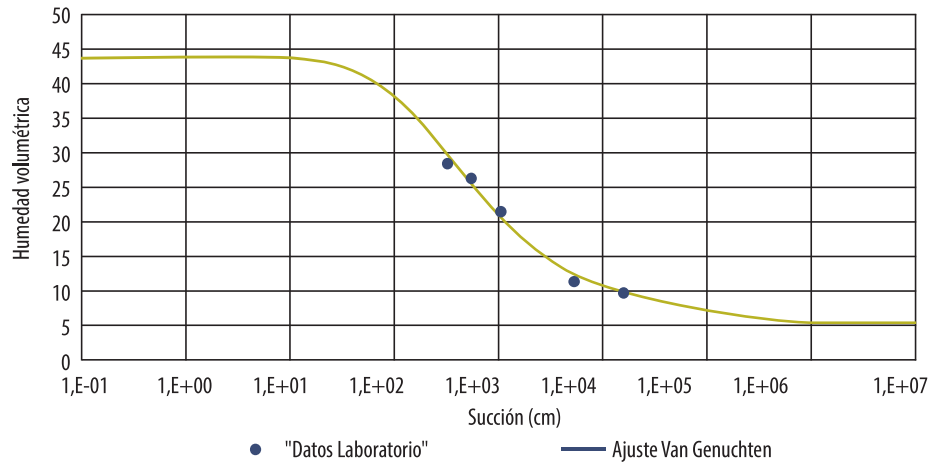
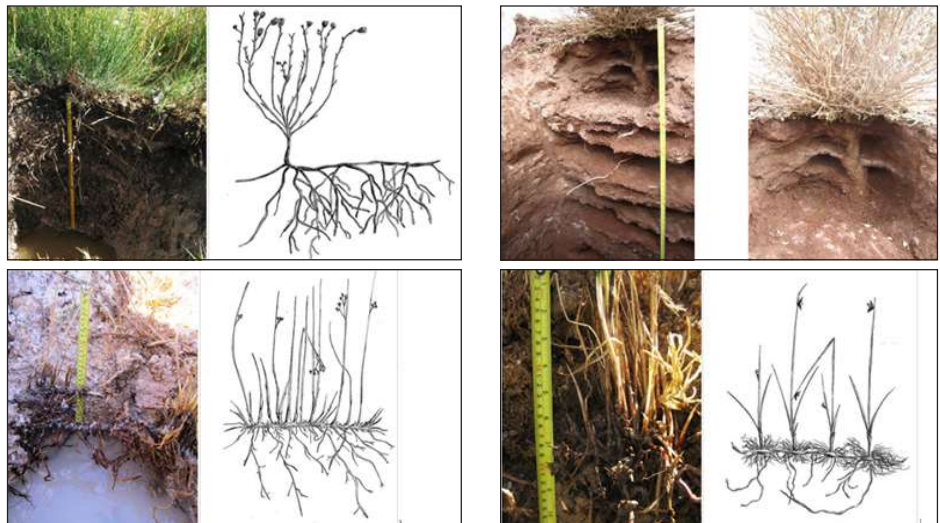


Figura 17: Excavación y medición de largo de raíces en vertical.



terminados en laboratorio, para luego parametrizar con software RETC.

Trabajos de terreno

Respecto de la medición del largo de raíces, se trató de un trabajo muy meticuloso, ya que implicó realizar una excavación al lado de las raíces, procurando no destruirlas en la medida que se realizaba el trabajo de excavación (ver *Figura 17*).

Se buscó medir la extensión de la raíz en vertical y contar con repeticiones por cada especie y tipo vegetacional, además de disponer de cada una de las clases texturales y muestras en cada sector.

Modelo hidrogeológico

El modelo numérico del borde este, construido en Modflow-USG, entregó los descensos del nivel del acuífero producto del bombeo del agua, donde lo más relevante fue determinar la profundidad de la napa, más que el descenso en sí mismo, que posteriormente puede relacionarse con la vegetación.

Modelo no saturado 1D

Se construyeron modelos no saturados 1D (Hydrus-1D) con las curvas de succión determinadas en laboratorio para cada estrato de suelo. Se incorporó la profundidad de la napa asumiendo una succión igual a cero (0) y se construyeron sin precipitación, para que fuera más conservador.

Se consideró la evaporación mensual y al menos se elaboró un modelo por cada polígono de textura.

Entonces, se observaron distintas clases texturales y profundidades en la zona en que se conecta la vegetación con el acuífero. En el cuadro que se observa en la *Figura 18* puede apreciarse una imagen del modelo Hydrus-1D referido.

Resultados

Todas las curvas de succión se parametrizaron utilizando el software RETC y se obtuvieron valores de Ks y algunos parámetros se recabaron desde las bases de datos del mismo software.

Para cada punto de muestreo hubo distintas curvas de succión a distintas profundidades. Utilizando RETC se parametrizaron los datos de las curvas de succión medidas en laboratorio, considerando los siguientes parámetros: θ_s (%), θ_r (%), α (1/cm), n y K_s (cm/día). Estos parámetros fueron revisados de manera que fueran consistentes con el mapa de textura disponible en planta, lo que en la gran mayoría de los casos ocurrió.

Contenidos de humedad

La *Figura 19* ilustra los puntos donde se realizó el perfil de humedad. Se tomaron muestras de hasta 3,5 me-

tros y desde el punto de vista del contenido de humedad, se observó cierto aumento al acercarse a la napa.

Para texturas como el franco limoso hay en torno a un 40% de humedad, sin embargo, para otras más gruesas, como el franco arenoso, los contenidos de humedad observados son bastante menores, en torno al 15%.

La información del contenido de humedad es difícil de interpretar, ya que estos son muy variables dependiendo del tipo de textura del suelo. Sin embargo, cuando se observa en términos de succión, los datos se alinean perfectamente siguiendo un gradiente que es más fácil de interpretar.

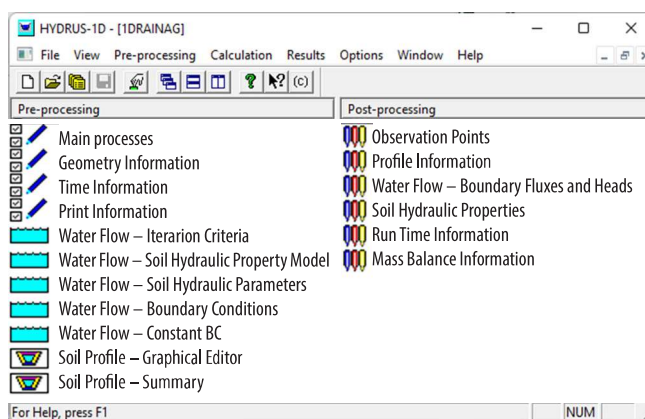
Largo de raíces

Se determinó la profundidad promedio, mínima y máxima por cada una de las especies presentes en el borde este, pudiendo determinar la información de largo de raíces, altura promedio, desviación estándar de la altura, profundidad de raíces promedio y las profundidades radicular mínima y radicular máxima, con el hábito de crecimiento y nombres científicos (ver *Figura 20*).

Descensos del nivel de la napa

En la zona de vegetación hidromorfa se definió como sin descenso, considerando como isodescenso 0 la zona con descensos iguales o menores a 5 centímetros (ver *Figura 21*).

Figura 18: Modelo Hydrus 1D.



Zona de modelación	Punto característico	Profundidad de la napa actual zona de conexión (m)
A	P6	3
B	P14B	10
C	P10	10
D	P15B	8
E	P18B	10
F	P17B	6
G	P22B	4,5
H	P20B	10

En la zona de vegetación *brea atriplex*, en tanto, los descensos observados van desde los 5 a los 100 centímetros, aproximadamente.

Estos resultados del modelo numérico fueron transferidos al modelo no saturado, de manera que se pudiera analizar la situación con el proyecto actual y con el proyecto futuro.

Situación sin proyecto

Los puntos negros que se observan en el gráfico b de la Figura 22 corresponden a valores del contenido de humedad medidos en laboratorio, mientras que la línea azul corresponde al contenido de humedad calculado por el modelo Hydrus-1D. Se aprecia que, en términos generales, el valor calculado por el modelo se aproxima bastante a la realidad, mostrando, en general, que el contenido de humedad del suelo aumenta al acercarse a la napa (recordar que depende del tipo de suelo, lo que explica que no vaya aumentando).

Al analizar la succión que calcula el modelo (ver el gráfico a de la Figura 22), puede observarse que en este caso todo es lineal, sin saltos como en el contenido de humedad, con un gradiente de succión que va desde 0 hasta valores en torno a los 10 MPa en la superficie. Prácticamente no se advierten quiebres y, en general, hay continuidad y un gradiente.

Ambas representaciones grafican la capacidad de

Figura 19: Contenidos de humedad.

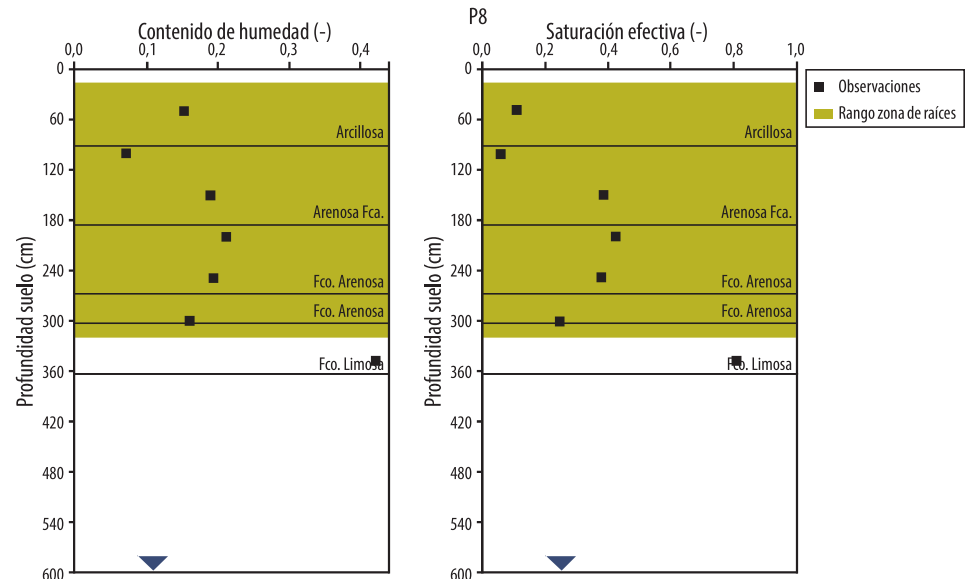


Figura 20: En la tabla se observa la profundidad promedio, mínima y máxima, por cada una de las especies presentes en el borde este.

Hábito	Nombre científico	Altura promedio (cm)	Desviación estándar de la altura (cm)	Profundidad de raíces promedio (cm)	Profundidad radicular mínima (cm)	Profundidad radicular máxima (cm)
Arbusto	<i>Aloysia deserticola</i>	73	34	154	83	250
Arbusto	<i>Atriplex atacamensis</i>	125	45	133	19	320
Arbusto	<i>Atriplex imbricata</i>	46	6	203	127	251
Hierba perenne	<i>Baccharis juncea</i>	66	27	38	20	55
Hierba perenne	<i>Distichlis spicata</i>	28	19	31	3	150
Arbusto	<i>Ephedra multiflora</i>	67	36	197	81	313
Hierba perenne	<i>Festuca rigescens</i>	85	26	28	4	41
Hierba perenne	<i>Juncus balticus</i>	66	16	50	15	95
Arbusto bajo suculento	<i>Lycium humile</i>	27	21	30	22	40
Hierba anual	<i>Nitrophila atacamensis</i>	7	1	30	20	42
Arbusto bajo suculento	<i>Sarcocoma andina</i>	32	6	33	12	87
Hierba perenne	<i>Schoenoplectus americanus</i>	49	17	31	11	100
Arbusto	<i>Tessaria absinthioides</i>	104	29	160	26	330
Hierba perenne	<i>Triglochin concinna</i>	16	6	32	6	50

Figura 21: En el mapa se observa que en la zona de vegetación hidromorfa no existen descensos y que en la zona de vegetación Brea-Atriplex es de 5 a 100 centímetros.

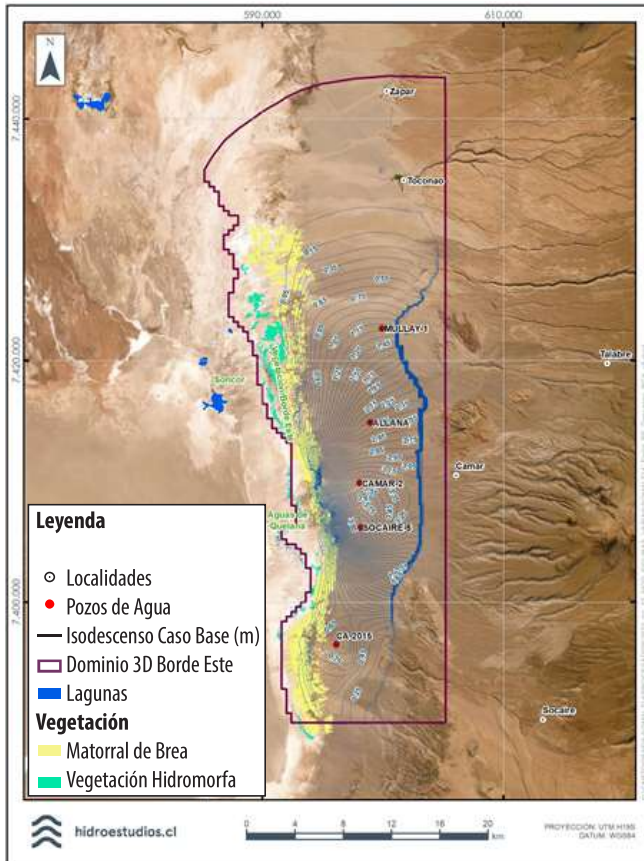
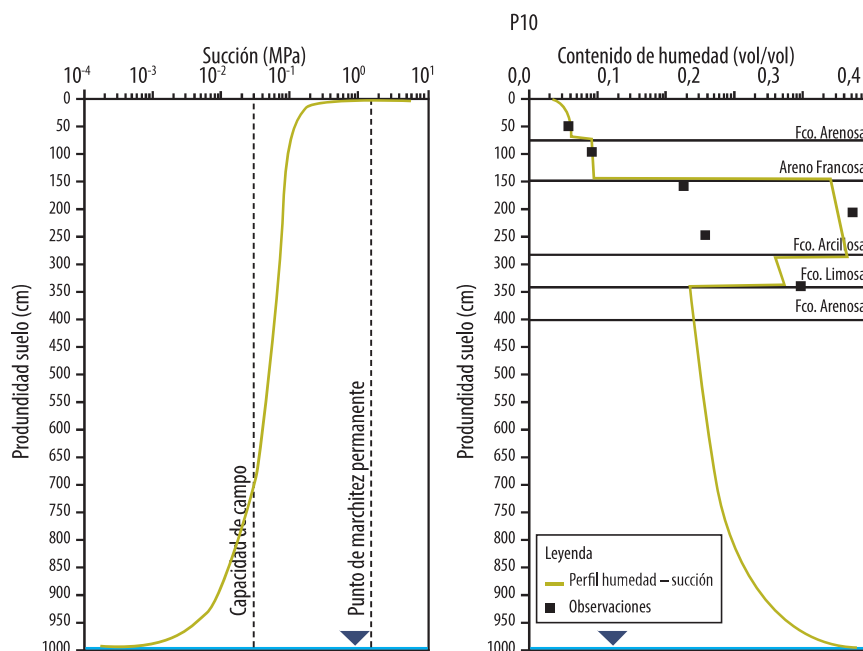


Figura 22: Zona de vegetación conectada con acuífero.



campo y el punto de marchitez permanente. Si la curva que se observa en la *figura (a)* se mueve a donde están las raíces (a la derecha de la línea) el efecto es que en la práctica la planta no sobrevive.

En la zona de vegetación hidromorfa, con napa a 50 centímetros de profundidad, los contenidos de humedad son altísimos, en torno a un 60% y con texturas relativamente finas. Las mediciones que se grafican en la *Figura 23* ilustran la profundidad de las raíces (línea verde), pudiendo advertirse que las plantas están sometidas a un alto contenido de humedad, lo que en la práctica es saturación.

Situación con proyecto

El proyecto en evaluación considera como acción principal una disminución del caudal de bombeo de agua y salmuera. La tabla

de la *Figura 24* presenta los resultados de la modelación, donde se observa para todos los polígonos de textura un aumento en el contenido de humedad y una disminución en la succión, que es lo esperable, dado que al disminuir el caudal de bombeo, la napa estará un poco más arriba.

La *Figura 25* muestra la succión y el contenido de humedad proyectado, la línea azul ilustra la profundidad de la napa para el caso actual (año 2022) línea más arriba y con proyecto línea de más abajo. La línea café representa el caso actual (año 2022) y la línea roja con proyecto al 2030. El contenido de humedad varía mucho en profundidad, producto de los cambios texturales del suelo, lo que hace difícil su interpretación. Sin embargo, la succión se puede apreciar mejor y advertir el efecto del proyecto sobre la napa, y esta, a su vez, en la succión. Se observa que existe un ligero corrimiento hacia el punto de marchitez permanente, debido a que la napa estará más profunda. En el sector donde las plantas normalmente viven, si bien hay efectos, estos son relativamente pequeños, con succiones menores al punto de marchitez permanente, y por lo tanto, se mantienen las condiciones de humedad para que las plantas sigan viviendo.

En el caso de la vegetación hidromorfa ocurre algo similar y de acuerdo con el modelo numérico no existen

descensos. Se realizó simulación para ver comportamiento del suelo, suponiendo que la napa se ubicará a 200 centímetros de profundidad, y se observa el efecto del descenso del nivel, con cambio en la succión, siempre menor a la capacidad de campo, pero se mantiene bajo el punto de marchitez permanente e incluso bajo la capacidad de campo (ver Figura 26).

Evaluación de efectos

Tal como lo ilustra el mapa de la Figura 27, se definieron cuatro zonas: (1) zona sin descensos (hidromorfa), (2) zonas conectadas con el acuífero (descenso de nivel del acuífero, *brea-atrilex* y evaluación con modelo no saturado), (3) zona no conectada con el acuífero (depende la textura, desconexión entre 6 a 8 metros de profundidad, vegetación muy escasa y otras fuentes de abastecimiento); y (4) vegetación de quebradas (suministro de agua relacionado con crecidas y flujos superficiales).

Las zonas en verde corresponden a la vegetación hidromorfa, donde no se observan efectos del proyecto, porque no hay descenso del nivel del acuífero. Luego, en la zona amarilla, de vegetación conectada, existe vegetación asociada principalmente a quebrada o a conos aluvionales. Y por último, la zona gris corresponde a un sector de vegetación muy escasa, que solamente se abastece desde las precipitaciones.

Figura 23: Las mediciones expresadas en el gráfico ilustran la profundidad de las raíces (línea verde), pudiendo advertirse que las plantas están sometidas a un alto contenido de humedad.

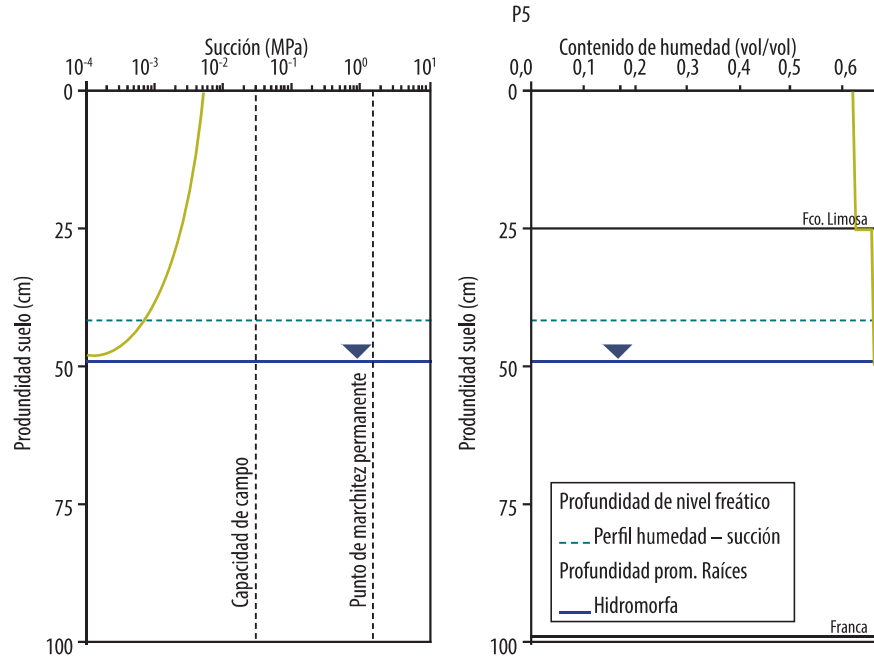


Figura 24: Descenso máximo y profundidad de la napa proyectada; y contenido de humedad y succión evaluada a profundidad promedio de las raíces.

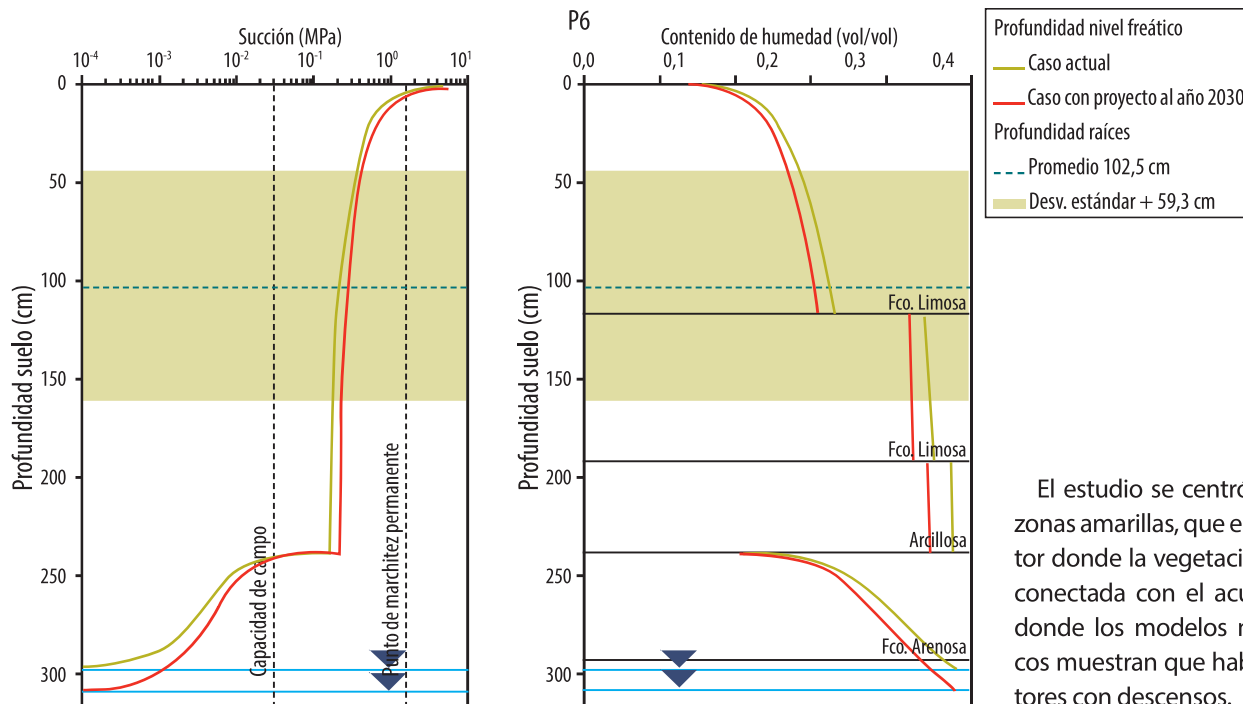
Descenso máximo y profundidad de la napa proyectada

Zona de modelación	Punto característico	Caso base		Caso con proyecto	
		Descenso máximo (m)	Profundidad de la napa proyectada (m)	Descenso máximo (m)	Profundidad de la napa proyectada (m)
A	P6	0,16	3,16	0,12	3,12
B	P14B	0,89	10,89	0,19	10,19
C	P10	0,91	10,91	0,20	10,20
D	P15B	0,50	8,50	0,15	8,15
E	P18B	0,56	10,56	0,30	10,30
F	P17B	0,39	6,39	0,25	6,15
G	P22B	0,14	4,64	0,14	4,64
H	P20B	0,21	10,21	0,19	10,19

Contenido de humedad y succión evaluada a la profundidad promedio de las raíces, vegetación tipo matorral

Zona de modelación	Punto característico	Condición actual		Condición con proyecto	
		Contenido de humedad (%)	Succión (MPa)	Contenido de humedad (%)	Succión (MPa)
A	P6	27	0,206	25	0,263
B	P14B	4	0,092	4	0,094
C	P10	8	0,087	8	0,088
D	P15B	14	0,319	14	0,333
E	P18B	20	0,098	19	0,102
F	P17B	31	0,463	30	0,507
G	P22B	24	0,291	23	0,34
H	P20B	17	0,111	17	0,114

Figura 25: Caso actual y con proyecto al año 2030.



El estudio se centró en las zonas amarillas, que es el sector donde la vegetación está conectada con el acuífero y donde los modelos numéricos muestran que habrá sectores con descensos.

hidroestudios

Nuestra visión
permite diseñar
soluciones
integradoras para
disminuir los riesgos
asociados a los
recursos hídricos.

- ◆ Asesoría estratégica
- ◆ Insumos para estudios ambientales
- ◆ Consultoría y estudios
- ◆ Modelación hidrológica e hidrogeológica
- ◆ Trabajos de terreno



Figura 26: Se observa efecto del descenso del nivel, cambio en la succión pero se mantiene bajo PMP incluso bajo CC.

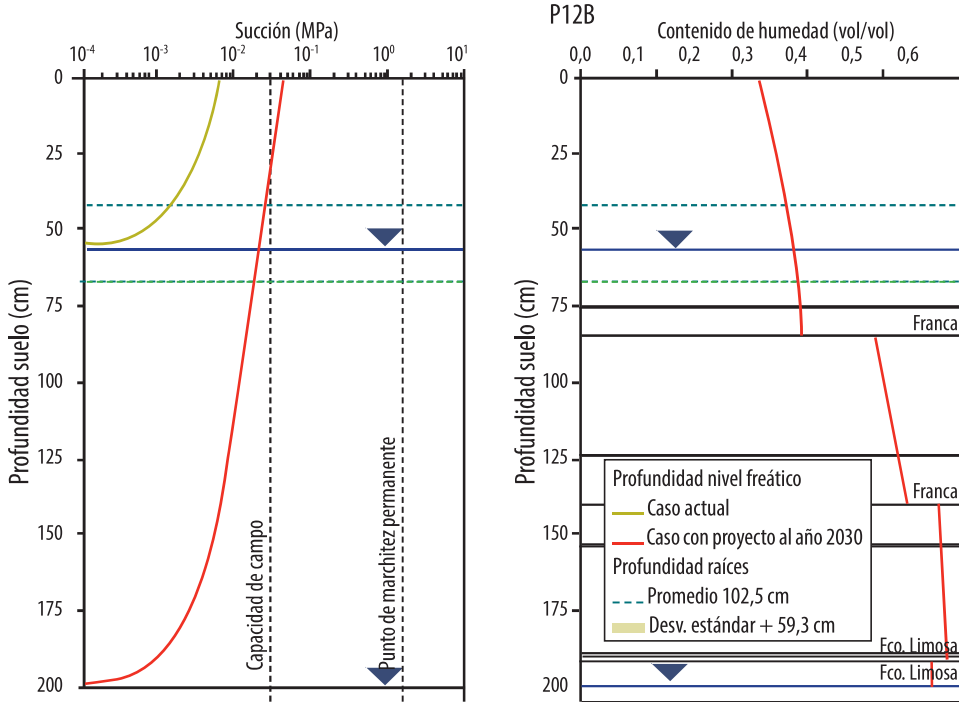
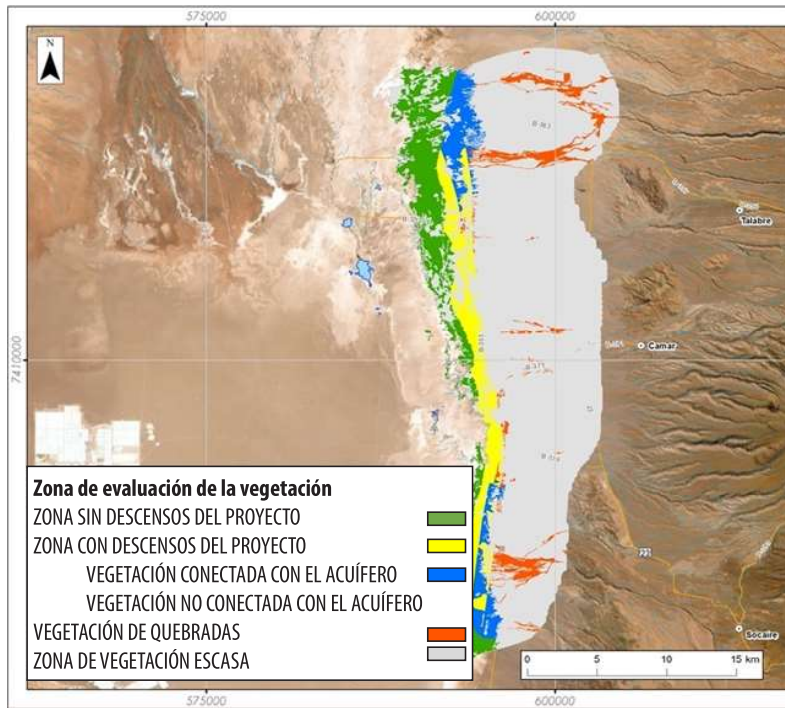


Figura 27: Zonas de evaluación de la vegetación.



Comentarios finales

Se desarrolló una metodología que permite evaluar el efecto de la disminución del nivel de la napa sobre la vegetación y, derivado de lo anterior, el efecto en la biodiversidad.

Se trató de un trabajo multidisciplinario que se desarrolló entre biólogos, agrónomos e hidrogeólogos.

Los resultados muestran que la humedad del suelo no responde lineal con el descenso del acuífero y, por tanto, requiere ser evaluada la respuesta en la zona no saturada.

La metodología requiere una caracterización exhaustiva del suelo, en términos de sus curvas de succión.

En el caso particular de este proyecto, los resultados muestran que no hay efecto del bombeo sobre la vegetación. Estos resultados son consistentes con lo observado en el monitoreo ambiental realizado, que incluso muestran una tendencia al aumento en la cobertura de la vegetación, a pesar del bombeo realizado por más de 15 años.

Respecto de los próximos pasos, se prevé incorporar información de nuevas muestras obtenidas (de 2021 y 2022), confeccionar perfiles 2D para mejorar la representación y también facilitar el entendimiento.

Agradecimientos: A SQM Salar por la disposición para compartir información y desarrollos metodológicos para este artículo.