

Diagnóstico y estrategias para el manejo de los suelos salino-bóricos en huertos agrícolas de las localidades de Calama y San Pedro de Atacama



La agricultura en la región de Antofagasta enfrenta dos problemas principales: el alto contenido de sales solubles en los suelos y el exceso de boro en el agua de riego. Estas condiciones son comunes en zonas semiáridas o áridas, donde la falta de lluvias impide el lavado natural de los suelos salinizados. Además, la baja calidad del agua de riego y el manejo inadecuado de los suelos agrícolas contribuyen a la acumulación de sales en el perfil del suelo, provocando efectos osmóticos y tóxicos que afectan el crecimiento y desarrollo de los cultivos.

Una de las soluciones al problema del agua de riego es la desalación. Sin embargo, esta opción implica altos costos de

inversión y mantenimiento, lo que la hace poco viable para la agricultura familiar campesina de pequeña escala, típica de este territorio. Alternativamente, se pueden adoptar prácticas de manejo de suelos, como el lavado¹ y el uso de enmiendas, que ayudan a mitigar el problema en suelos salino-sódicos. Además, la selección de especies y portainjertos con mayor tolerancia a la salinidad es otra opción para mejorar la rentabilidad y sostenibilidad de los cultivos en la región.

Sin embargo, antes de implementar cualquier estrategia de manejo, es fundamental realizar un diagnóstico integral del predio, ya que este permitirá identificar las condiciones específicas del suelo y definir las intervenciones más efectivas.



1. Diagnóstico de suelos con condiciones salinas, sódicas y bóricas

Un diagnóstico adecuado de la calidad de los suelos del predio incluye diferentes métodos que permiten dimensionar sus limitantes y definir estrategias viables para mejorar tanto las condiciones del suelo como la salud de los cultivos.

¹ El **lavado de suelos o lixiviación** es la principal medida para mitigar la salinidad, y consiste en aplicar un volumen de agua superior a la evapotranspiración, con el fin de lixiviar las sales, es decir, arrastrarlas fuera de la zona de raíces. La cantidad de agua necesaria depende de la calidad del agua de riego y de la tolerancia a la salinidad del cultivo. Para calcular el volumen se utiliza la siguiente fórmula: Lavado de suelos (LR) = $EC_w / ((5 \times 0,4) - EC_w)$. Donde EC_w corresponde a la CE del agua de riego disponible en el predio (ver [link de referencia](#)).

Material elaborado en el marco del proyecto “**MODELO DE GESTIÓN HÍDRICA PARA DETERMINAR DISPONIBILIDAD Y REQUERIMIENTOS AGRÍCOLAS DE ANTOFAGASTA**”, código 23BP-246782. Esta iniciativa es impulsada por el Comité Corfo Antofagasta, a través del instrumento Bienes Públicos.

PROYECTO APOYADO POR



EJECUTA:







Desarrollado por:

Olivia Valdes, UC Davis Chile
Mark Battany, UC Davis

Apoyo metodológico:

Natalia Díaz,
UC Davis Chile

Tabla 1: Métodos utilizados para la diagnosticar la calidad de suelos

Métodos	Utilidad
 <p>Análisis químicos de extracto saturado de suelo para las diferentes estratas identificadas en el perfil de suelo.</p>	<p>Permite obtener indicadores analíticos clave, como:</p> <ul style="list-style-type: none"> > Conductividad Eléctrica (CE): Indica el total de sales solubles en el suelo. > PSI (Porcentaje de Sodio Intercambiable): Mide el porcentaje de sodio intercambiable en el suelo. > pH: Indica el nivel de acidez o alcalinidad del suelo. > RAS (Relación de Adsorción de Sodio): Un indicador que muestra la relación de sodio respecto al calcio y magnesio solubles. <p>En base a estos indicadores, se puede clasificar el suelo en relación con su problemática de sales: salino, sódico o salino-sódico.</p> <p>La concentración de boro en el suelo también es fundamental y junto con los otros indicadores, servirá para evaluar el movimiento de sales en el perfil del suelo y su capacidad de lavado.</p>
 <p>Caracterización visual de los perfiles de suelos</p>	<p>Mediante el uso de barreno o calicatas se pueden identificar las diferentes estratas de suelos visualizando cambios de textura, color, presencia de gravilla o piedras, humedad, raíces, biodiversidad, entre otros.</p> <p>Estas características son relevantes para determinar la capacidad y/o limitantes para el drenaje en el perfil de suelo.</p>
 <p>Análisis textural para estratas en el perfil de suelos</p>	<p>Estas características son relevantes para determinar la capacidad de lavado de los suelos.</p>
 <p>Análisis de calidad de agua de riego</p>	<p>La calidad de agua disponible para riego va a determinar el límite de las mejoras que se podrán alcanzar mediante las prácticas de lavado de sales en el suelo.</p>



2. Clasificación de suelos en relación a las problemáticas de sales

Como se indicó previamente, existen tres tipos de suelos afectados por sales: salinos, sódicos y salino-sódicos. Cada tipo de suelo impacta de manera distinta en el crecimiento de los cultivos y requiere estrategias específicas de recuperación, por lo que es fundamental identificar el tipo de suelo afectado antes de iniciar cualquier cultivo o proceso de recuperación².

² La **recuperación de suelos**, también conocida como **reclamación de suelos**, es el proceso de restaurar la productividad de suelos degradados, especialmente aquellos afectados por salinidad o sodicidad. Esto se logra mediante la eliminación de sales solubles, la mejora de la estructura, el drenaje y la capacidad de retención de agua y nutrientes del suelo. La recuperación se enfoca en reducir la salinidad a niveles adecuados y en corregir la estructura del suelo mediante enmiendas como el yeso, para mejorar la infiltración y permeabilidad. Este es un proceso continuo y a largo plazo que requiere la implementación de diversas estrategias de manejo para restaurar y mantener la salud del suelo.

Material elaborado en el marco del proyecto “**MODELO DE GESTIÓN HÍDRICA PARA DETERMINAR DISPONIBILIDAD Y REQUERIMIENTOS AGRÍCOLAS DE ANTOFAGASTA**”, código 23BP-246782. Esta iniciativa es impulsada por el Comité Corfo Antofagasta, a través del instrumento Bienes Públicos.

PROYECTO APOYADO POR



EJECUTA:



Desarrollado por:

Olivia Valdes, UC Davis Chile
Mark Battany, UC Davis

Apoyo metodológico:

Natalia Díaz,
UC Davis Chile

Para clasificar los suelos, se pueden analizar los valores obtenidos en los indicadores mencionados en los análisis químicos de extracto saturado de suelo (ver tabla 2).

Tabla 2: Clasificación de tipos de suelos en base a indicadores de análisis químicos

Tipo de Suelo	Conductividad Eléctrica (CE)	% Intercambiable de Sodio (PSI)	Relación de Adsorción de Sodio (RAS)	pH	Condición física
Suelo agrícola común	< 4	< 15	< 13	< 8	Buena
Salino	> 4	< 15	< 13	< 8,5	Buena
Sódico	< 4	> 15	> 15	> 8,5	Pobre
Salino - Sódico	> 4	> 15	> 15	< 8,5	Pobre a Buena

Fuente: Elaboración propia en base a O'Geen, A., 2015 y Sierra, C., 1999.

✓ Los **suelos salinos** se caracterizan por una alta concentración de sales solubles, evidenciada por una conductividad eléctrica (CE) superior a 4. Suelen presentar depósitos o costras de sal blanca visibles en la superficie. Aunque no poseen una estructura deficiente y permiten una adecuada infiltración de agua, la alta salinidad generalmente se debe a la combinación de un contenido salino elevado en el material parental del suelo y a un drenaje ineficiente. Las sales se acumulan progresivamente en el perfil del suelo cuando no pueden ser lixiviadas.

✓ Los **suelos sódicos**: Estos suelos contienen una alta cantidad de sodio intercambiable en sus sitios de intercambio catiónico. Este exceso de sodio puede resultar tóxico para algunos cultivos, especialmente cuando la exposición es prolongada, ya que el sodio compite con otros cationes esenciales como potasio, calcio y magnesio, lo que puede llevar a deficiencias de estos nutrientes en las plantas.

Además, los suelos sódicos presentan una estructura física desfavorable: el sodio intercambiable dispersa los minerales de arcilla, degradando la estructura del suelo. Los minerales de arcilla dispersos se movilizan con el agua percolante, obstruyendo eventualmente los poros grandes, fundamentales para la aireación y el movimiento del agua. Esto disminuye tanto la tasa de infiltración como la permeabilidad del suelo, creando capas impermeables que suelen encontrarse cerca de la superficie.

✓ Los **suelos salino - sódicos**: se caracterizan por altos niveles de sodio intercambiable (PSI > 15%) y alta salinidad (CE > 4). A diferencia de los suelos sódicos no salinos, los salino-sódicos presentan mejores condiciones físicas, ya que las altas concentraciones de sales solubles mantienen los minerales de arcilla floculados, lo cual estabiliza la estructura del suelo y amortigua el pH a valores de 8,5 o menos. Para la recuperación de estos suelos, es necesario tratar tanto la salinidad como el sodio intercambiable. Sin embargo, pueden experimentar una reducción en la infiltración cuando se riegan con agua de baja salinidad.

Material elaborado en el marco del proyecto “**MODELO DE GESTIÓN HÍDRICA PARA DETERMINAR DISPONIBILIDAD Y REQUERIMIENTOS AGRÍCOLAS DE ANTOFAGASTA**”, código 23BP-246782. Esta iniciativa es impulsada por el Comité Corfo Antofagasta, a través del instrumento Bienes Públicos.

PROYECTO APOYADO POR



EJECUTA:



Desarrollado por:

Olivia Valdes, UC Davis Chile
Mark Battany, UC Davis

Apoyo metodológico:

Natalia Díaz,
UC Davis Chile

Además de la clasificación general de suelos salinos y sódicos, en la macrozona norte de Chile, se presenta un problema adicional debido a la alta concentración de **boro** en las fuentes de agua, lo cual ha llevado a una acumulación de este elemento en el perfil del suelo, generando **suelos con exceso de boro**. Si bien el boro es esencial para el crecimiento de las plantas, solo se requiere en pequeñas cantidades, y en niveles superiores a los necesarios puede ser tóxico. La clasificación de la toxicidad del suelo según la concentración de boro varía en función del tipo de cultivo y de su sensibilidad o tolerancia específica a este elemento (ver tabla 3).



Figura 1: Cultivo de maíz local, Lasana, Calama.



Figura 2: Maíz local ancestral cosechado en Lasana, Calama

Tabla 3: Tolerancia de cultivos agrícolas al boro

Tolerancia a boro	Cultivos agrícolas	Concentración de boro en agua de riego (mg/l)
Muy Sensible	Mora	< 0,5
	Limón	< 0,5
	Arándanos	< 0,5
Sensible	Higuera	0,5 - 0,75
	Naranja	0,5 - 0,75
	Cebolla	0,5 - 0,75
	Pera	0,75 - 1,0
	Paltos	0,5 - 0,75
	Cerezos	0,5 - 0,75
	Tolerancia intermedia	Alfalfa
Olivo		2,0 - 4,0
Avena		2,0 - 4,0
Maíz		2,0 - 4,0
Tomate		4,0 - 6,0
Tolerante	Espárrago	6,0 - 15,0

Fuente: Elaboración propia en base a Ayers, et al, 1985.

Material elaborado en el marco del proyecto **“MODELO DE GESTIÓN HÍDRICA PARA DETERMINAR DISPONIBILIDAD Y REQUERIMIENTOS AGRÍCOLAS DE ANTOFAGASTA”**, código 23BP-246782. Esta iniciativa es impulsada por el Comité Corfo Antofagasta, a través del instrumento Bienes Públicos.

PROYECTO APOYADO POR



EJECUTA:



Desarrollado por:

Olivia Valdes, UC Davis Chile
Mark Battany, UC Davis

Apoyo metodológico:

Natalia Díaz,
UC Davis Chile



3. Catastro de calidad de suelo y agua en las localidades de Calama y San Pedro de Atacama

En marzo 2024, se llevó a cabo un levantamiento de calidad de suelo y agua en cinco predios representativos de las comunas de San Pedro de Atacama (Checar, Solor y Séquitor) y Calama (Dupont y Yalquincha). Los objetivos de este levantamiento fueron identificar la variabilidad de tipos de suelo en la zona y sus limitaciones, así como también establecer estrategias para reducir el exceso de sales y boro, minimizando el riesgo de fitotoxicidad en los cultivos (ver figura 3 para la localización de puntos de muestreo).



Figura 3: Localización de puntos de muestreo en comuna de Calama y San Pedro de Atacama.

Los resultados mostraron altos niveles de sodio y boro en los predios muestreados, confirmando las condiciones limitantes que enfrentan los productores locales para la actividad agrícola. Se observó una predominancia de suelos con condiciones salino-sódicas y sódicas, además de condiciones levemente alcalinas.

Material elaborado en el marco del proyecto “**MODELO DE GESTIÓN HÍDRICA PARA DETERMINAR DISPONIBILIDAD Y REQUERIMIENTOS AGRÍCOLAS DE ANTOFAGASTA**”, código 23BP-246782. Esta iniciativa es impulsada por el Comité Corfo Antofagasta, a través del instrumento Bienes Públicos.

PROYECTO APOYADO POR



EJECUTA:



Desarrollado por:

Olivia Valdes, UC Davis Chile
Mark Battany, UC Davis

Apoyo metodológico:

Natalia Díaz,
UC Davis Chile

La tabla 4 resume los indicadores más relevantes de los sitios muestreados, incluyendo la clasificación de suelos según problemáticas de salinidad y boro, así como recomendaciones de lavado basadas en la calidad de agua de riego disponible en cada localidad.

Tabla 4: Indicadores más relevantes de los sitios muestreados en el levantamiento

	Localidad	Concentración boro (Mg/L)	CE suelo (dS/m)	% PSI	RAS	pH	Tipo de suelos	Problema infiltración	Toxicidad por boro	Textura (Perfiles superficiales/ inferiores)	CE agua de riego	Lavado de sales (*)
Calama	Canal Dupont	19,95	10,14	23%	20,1	8,54	Salino-Sódico	Severo	Severo	Franco/ Franco-Arenoso	7,08	238%
	Yalquincha	11,60	6,78	20%	16,8	8,66	Salino-Sódico	Severo	Severo	Franco- Arenoso/ Franco- Limoso	5,98	201%
San Pedro de Atacama	Checar	7,61	4,09	20%	17,2	8,83	Salino-Sódico	Severo	Severo	Franco Limoso/ Arenoso Franco	2,72	92%
	Solor	10,80	3,01	22%	19,3	9,32	Sódico	Severo	Severo	Franco-Arenoso/ Franco-Limoso	2,72	92%
	Sequitur	10,73	4,44	30%	27,2	9,13	Salino-Sódico	Severo	Severo	Franco/ Franco-Arenoso	2,72	92%

(*) El volumen de Lavado se expresa en % de exceso de agua respecto de la evapotranspiración.



Figura 4: Salinidad evidente en suelos, localidad de Yalquincha, Calama.

Material elaborado en el marco del proyecto “**MODELO DE GESTIÓN HÍDRICA PARA DETERMINAR DISPONIBILIDAD Y REQUERIMIENTOS AGRÍCOLAS DE ANTOFAGASTA**”, código 23BP-246782. Esta iniciativa es impulsada por el Comité Corfo Antofagasta, a través del instrumento Bienes Públicos.

En el marco de este levantamiento, se destacan algunas observaciones relevantes en cuanto a la **importancia de las prácticas culturales y el manejo del riego**, tales como:

- ✓ En las predios muestreados, que reciben aguas del río Loa, se observaron diferencias significativas en el movimiento de sales. Esto resalta la importancia de las prácticas culturales y del manejo adecuado del riego para favorecer el lavado de sales.
- ✓ Se evidenció que los predios que han adoptado prácticas regenerativas, como la incorporación de materia orgánica, presentan mejoras significativas en los indicadores de fertilidad y contenido de materia orgánica.
- ✓ En los predios que debieron restringir el consumo de agua, se detectó una sobreacumulación de sales y boro. Este último es especialmente relevante, ya que su lixiviación es más difícil en comparación con el cloruro y el sodio. El boro se desplaza lentamente en el suelo y requiere aproximadamente tres veces más agua de lixiviación que la necesaria para reducir una cantidad equivalente de cloruro o salinidad.

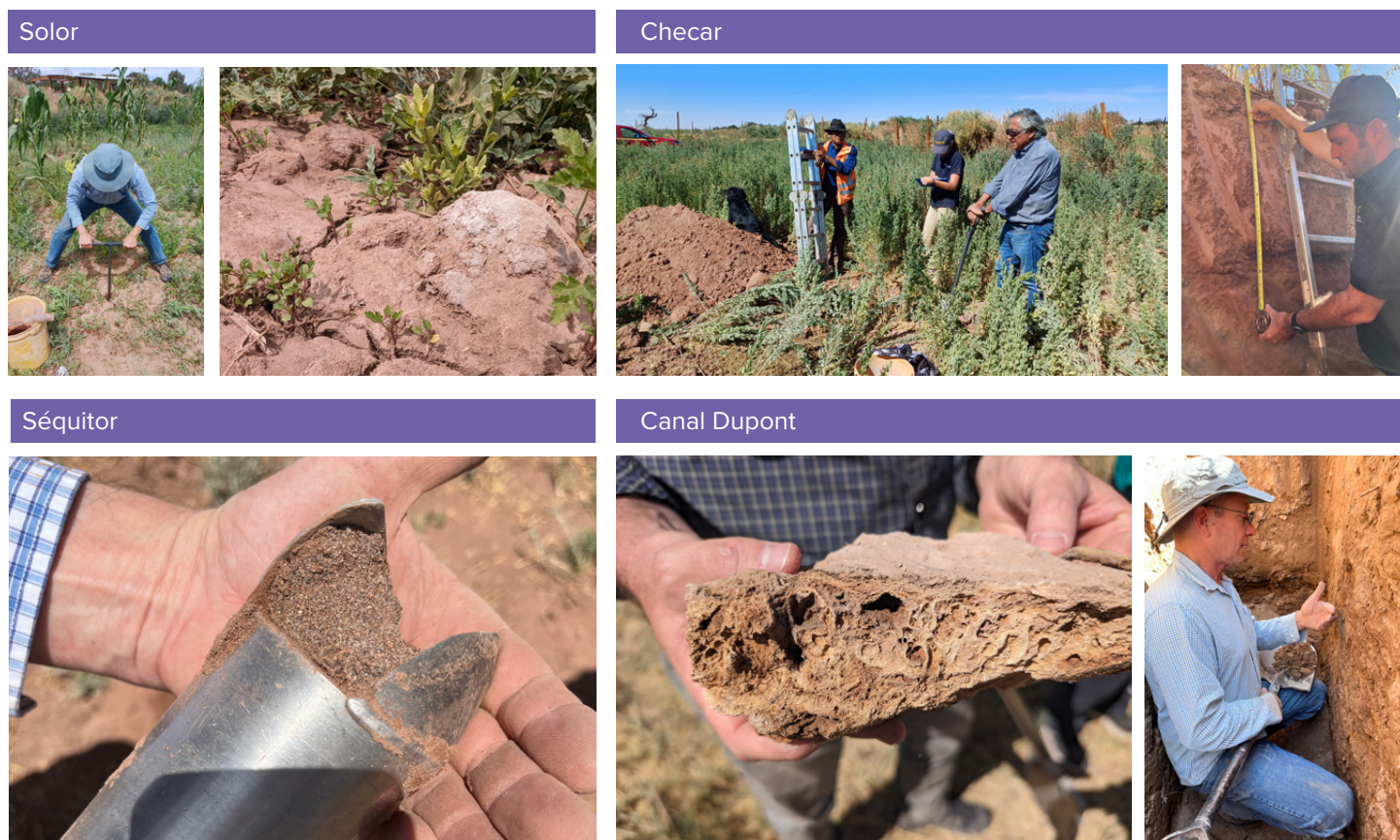


Figura 5: Toma de muestras en las localidades donde se desarrolló el levantamiento.

Material elaborado en el marco del proyecto **“MODELO DE GESTIÓN HÍDRICA PARA DETERMINAR DISPONIBILIDAD Y REQUERIMIENTOS AGRÍCOLAS DE ANTOFAGASTA”**, código 23BP-246782. Esta iniciativa es impulsada por el Comité Corfo Antofagasta, a través del instrumento Bienes Públicos.

PROYECTO APOYADO POR



EJECUTA:



Desarrollado por:

Olivia Valdes, UC Davis Chile
Mark Battany, UC Davis

Apoyo metodológico:

Natalia Díaz,
UC Davis Chile



4. Recomendaciones para la recuperación y manejos según tipo de suelos

Estrategia de manejo para suelos salinos:

La estrategia más común para la recuperación de suelos salinos consiste en eliminar las sales de la zona radicular mediante el uso de agua de buena calidad. Los manejos para lograr esto incluyen:



Encharcamiento continuo: Este manejo consiste en aplicar grandes volúmenes de agua hasta eliminar suficiente sal de la zona radicular. La cantidad de agua necesaria varía según el tipo de suelo y la salinidad inicial, y se determina mediante una fórmula específica³. Este método requiere monitorear la salinidad del suelo tanto durante como después del proceso de recuperación, permitiendo hacer ajustes adicionales si es necesario.



Encharcamiento intermitente o riego por aspersión: Estos manejos permiten ahorrar agua durante la recuperación de suelos salinos al aplicar pequeñas cantidades de agua seguidas de períodos de secado. Este ciclo permite eliminar las sales de los poros del suelo con menos agua en comparación con el encharcamiento continuo, aunque requiere más tiempo para completar los ciclos de humectación y secado. Sin embargo, en áreas con alta evaporación, estos métodos pueden resultar problemáticos, ya que las sales tienden a ascender nuevamente hacia la superficie durante los períodos de secado. Por ello, el lavado de sales es más efectivo en invierno, cuando la evaporación es mínima.

Ambos manejos requieren un drenaje adecuado del suelo para facilitar el flujo de agua y el movimiento de sales. En suelos con un nivel freático superficial, es necesario implementar un sistema de drenaje subterráneo para evacuar el agua fuera del campo. En estas condiciones, el riego por aspersión suele ser el método preferido, ya que mejora el lavado de sales en áreas distantes de los sistemas de drenaje.

³ El **volumen de recuperación (o reclamación)** se determina según la siguiente fórmula $D_w \text{ (pies)} = (k \times D_s \times EC_i) / EC_f$. Donde: D_w = Profundidad de agua infiltrada; k = constante textura (0,1 para suelos arenosos, 0,3 suelos arcillosos, 0,4 suelos orgánicos). D_s : Profundidad a reclamar; EC_i = Salinidad Suelo Inicial; EC_f = Salinidad Suelo Final.

Estrategia de manejo para suelos sódicos y salino-sódicos:



La recuperación de los suelos sódicos y salino-sódicos es un proceso que se basa en reemplazar el sodio intercambiable del suelo por calcio, generalmente mediante la adición de yeso, un mineral relativamente soluble y económico. En suelos naturalmente ricos en carbonato de calcio, se puede aplicar azufre elemental finamente molido o ácido sulfúrico, sin necesidad de agregar calcio directamente al suelo. En suelos húmedos, el azufre se oxida con la ayuda de microorganismos, formando ácido sulfúrico, que disuelve el carbonato de calcio y libera calcio en solución, reemplazando así el sodio en los sitios de intercambio del suelo. Este proceso es lento y depende de la superficie de contacto de las partículas de azufre, por lo que este elemento debe mezclarse en la capa superficial del suelo. El ácido sulfúrico también puede aplicarse directamente al suelo o inyectarse en el agua de riego.



Después del tratamiento con enmiendas de calcio o azufre, los suelos salino-sódicos deben ser lixiviados con agua de buena calidad (bajo contenido de sodio) para eliminar el sodio del sistema. Al igual que en la recuperación de suelos salinos, es fundamental mantener un drenaje adecuado en suelos sódicos y salino-sódicos (Horneck et al., 2007). Las dosis recomendadas de enmiendas se pueden consultar en O'Geen, A. (2015).



La restauración de suelos sódicos y salino-sódicos es un proceso gradual que avanza en profundidad a medida que el calcio satura los sitios de intercambio catiónico y desciende en el perfil del suelo. Para lograr una recuperación más profunda, se debe aplicar suficiente yeso para asegurar que el proceso abarque toda la profundidad deseada. Sin embargo, no es recomendable aplicar todo el yeso de una sola vez; es más efectivo añadirlo en incrementos anuales hasta alcanzar el porcentaje de sodio intercambiable (PSI) requerido en la profundidad deseada.



Los materiales orgánicos como compost y estiércol, así como cultivos de cobertura tolerantes a la sal, pueden ser útiles para mantener la estructura/agregación superficial del suelo y asegurar una infiltración adecuada y la finalización del proceso de recuperación. También se recomienda el monitoreo continuo de la salinidad y la sodicidad (Davis et al., 2014).

Material elaborado en el marco del proyecto “**MODELO DE GESTIÓN HÍDRICA PARA DETERMINAR DISPONIBILIDAD Y REQUERIMIENTOS AGRÍCOLAS DE ANTOFAGASTA**”, código 23BP-246782. Esta iniciativa es impulsada por el Comité Corfo Antofagasta, a través del instrumento Bienes Públicos.

PROYECTO APOYADO POR



EJECUTA:



Desarrollado por:

Olivia Valdes, UC Davis Chile
Mark Battany, UC Davis

Apoyo metodológico:

Natalia Díaz,
UC Davis Chile

Referencias bibliográficas:

Ayers, Robert S., and Dennis W. Westcot. *Water quality for agriculture*. Vol. 29. Rome: Food and agriculture organization of the United Nations, FAO, 1985.

Davis, R.M. Waskom, and T.A. Bauder. 2014. *Managing Sodic Soils*. Colorado State University Extension Publication N° 0.504. <https://extension.colostate.edu/publications-2/#>

Hanson, B.R., S.R. Grattan, and A. Fulton. 2006. *Agricultural salinity and drainage*.

Horneck, D. A., J. W. Ellsworth, B.G. Hopkins, D. M. Sullivan, and R.G. Stevens. 2027. *Managing salt-affected soils for crop production*. A Pacific Northwest Extension Publication: Oregon State University of Idaho, and Washington State University PNW 601.E. et al., 2007

O'Geen, Anthony. 2015. *Drought Tip: Reclaiming Saline, Sodic, and Saline-Sodic Soils*. UC ANR Publication 8519. <https://anrcatalog.ucanr.edu/>

Sierra, Carlos. 1999. *Salinidad, origen y su efecto sobre suelo y plantas*. INIA. <https://biblioteca.inia.cl/items/def30111-8f0f-410e-8241-379f10a45a6b>

Material elaborado en el marco del proyecto “**MODELO DE GESTIÓN HÍDRICA PARA DETERMINAR DISPONIBILIDAD Y REQUERIMIENTOS AGRÍCOLAS DE ANTOFAGASTA**”, código 23BP-246782. Esta iniciativa es impulsada por el Comité Corfo Antofagasta, a través del instrumento Bienes Públicos.

PROYECTO APOYADO POR



EJECUTA:



Desarrollado por:

Olivia Valdes, UC Davis Chile
Mark Battany, UC Davis

Apoyo metodológico:

Natalia Díaz,
UC Davis Chile