



Fundación para la
Innovación Agraria
MINISTERIO DE AGRICULTURA

RESULTADOS Y LECCIONES EN
**Sistema Vetiver para
Descontaminación
de Agua**

AGRICULTURA SUSTENTABLE



Proyecto de Innovación en
Región de Arica y Parinacota





1 3 3



Fundación para la
Innovación Agraria

RESULTADOS Y LECCIONES EN

Sistema Vetiver para Descontaminación de Agua y Mayor Disponibilidad para Riego



Proyecto de Innovación en
Región de Arica y Parinacota

Valorización a octubre 2017



Agradecimientos

En la realización de este trabajo, agradecemos sinceramente la colaboración de los productores, técnicos y profesionales vinculados al proyecto “Aumento y disponibilidad de la eficiencia en el uso del agua de riego a través de la adaptación del Sistema Vetiver para potenciar la agricultura sustentable en la Región de Arica y Parinacota”. En especial a los profesionales Sandra Ugalde y Vitelio Goykovic, académicos de la Facultad de Ciencias Agronómicas de la Universidad de Tarapacá, y a quienes participaron en los talleres de levantamiento de información y validación de resultados, identificados en el segundo anexo de este documento.

Extendemos además los agradecimientos a los profesionales de FIA, Loreto Burgos y Carolina Oyarce, por su acompañamiento técnico, financiero y administrativo durante el desarrollo del proyecto.

A todos ellos un reconocimiento por su valioso aporte en la ejecución y análisis de esta experiencia.

Resultados y Lecciones en

Sistema Vetiver para descontaminación de agua y aumento de su disponibilidad para riego

Proyecto de Innovación en Región de Arica y Parinacota

Serie **Experiencias de Innovación para el Emprendimiento Agrario**
FUNDACIÓN PARA LA INNOVACIÓN AGRARIA

Registro de Propiedad Intelectual N° 285.944
ISBN 978-956-328-213-9

ELABORACIÓN DEL DOCUMENTO

Sergio Lara Pulgar, Biotecnología Agropecuaria S.A. (BTA)
Rodrigo Navarro Silva, Biotecnología Agropecuaria S.A. (BTA)

REVISIÓN DEL DOCUMENTO Y APORTES TÉCNICOS

Rodrigo Gallardo y Gabriela Casanova, Fundación para la Innovación Agraria

EDICIÓN DE TEXTOS

Amy Bardi Pineda

DISEÑO GRÁFICO

Guillermo Feuerhake

IMPRESIÓN

Ograma

Se autoriza la reproducción parcial de la información aquí contenida, siempre y cuando se cite esta publicación como fuente.

Presentación

La Fundación para la Innovación Agraria (FIA) dispone de un relevante y considerable conocimiento e información relativa a los resultados generados tras la ejecución de las distintas iniciativas de innovación agraria que ha apoyado. La valorización o puesta en valor de los resultados más promisorios de los proyectos permite facilitar la difusión, transferencia y su adopción por parte del sector productivo para emprender nuevos negocios, implementar alternativas productivas y consolidar aquellas que están en desarrollo, a través de mejoras en materia tecnológica, comercial, de gestión y asociatividad.

FIA también incorpora aquellas experiencias que por distintas razones no obtuvieron los resultados esperados y aquellas que, a pesar de tener perspectivas de mercado interesantes, deben abordar aún algunas etapas fundamentales para llevar a cabo con éxito su desarrollo y consolidación a nivel comercial. Estos resultados son parte del riesgo que conlleva el financiamiento de proyectos de innovación agraria y también deben ser transferidos como un aprendizaje que sirve para nuevos emprendimientos o nuevas iniciativas de innovación que se quiera desarrollar.

Para abordar este desafío, FIA desarrolló una metodología de valorización de resultados orientada a analizar la validez y potencial de aplicación de las experiencias, lecciones aprendidas y resultados de los proyectos al momento de su cierre. Es una metodología cercana a la de un estudio de viabilidad, compuesta de distintos análisis en los ámbitos comerciales, técnicos, de gestión, legal y/o financieros, dependiendo de la naturaleza del proyecto.

En este marco, el presente documento tiene el propósito de compartir con los actores del sector los resultados, experiencias y lecciones aprendidas del proyecto **“Aumento y disponibilidad de la eficiencia en el uso del agua de riego a través de la adaptación del Sistema Vetiver para potenciar la agricultura sustentable en la Región de Arica y Parinacota”**. Este tuvo como objetivo recuperar aguas contaminadas a través de la adaptación del Sistema Vetiver para optimizar el uso del agua de riego y aumentar la productividad en la Región de Arica y Parinacota.

María José Etchegaray Espinosa
Directora Ejecutiva FIA

Contenidos

Presentación	5
Introducción	9

Sección 1. Resultados y lecciones aprendidas.....	13
1. Antecedentes	13
2. Base conceptual de la tecnología	14
3. Valor de la herramienta desarrollada.....	18
4. La innovación tecnológica.....	20
5. Conveniencia económica para el productor.....	21
6. Claves de viabilidad.....	26
7. Asuntos por resolver	27

Sección 2. El proyecto precursor.....	29
1. El entorno productivo	29
2. El proyecto	33
2.1. Características generales.....	33
2.2. Validación del proceso	35
2.3. Estado de ejecución actual.....	40

Sección 3. El valor del proyecto	43
---	-----------

Sección 4. Anexos	
1. Taller de validación.....	47
2. Bibliografía	48

Introducción

La presente publicación pone en valor los resultados del proyecto “**Aumento y disponibilidad de la eficiencia en el uso del agua de riego a través de la adaptación del Sistema Vetiver para potenciar la agricultura sustentable en la Región de Arica y Parinacota**”, iniciativa que fue apoyada y financiada por FIA con la finalidad de contribuir con una solución innovadora para enfrentar la problemática de escasez, sequías y uso poco eficiente del recurso hídrico en el sector.

Cabe señalar que la Región de Arica y Parinacota en general presenta importantes problemas en la calidad y caudal de aguas de riego. Su alta salinidad, sumado a la alta carga de contaminantes (metales pesados, boro y arsénico) de algunas localidades, disminuyen los rendimientos, acotan la producción a algunos cultivos tolerantes y obligan al agricultor a usar altas cargas de agua en la fracción de lavado para el riego. En consecuencia, la mala calidad del agua conlleva inevitablemente a una disminución de la eficiencia en su uso.

Un análisis de la situación actual del recurso hídrico en la región revela que las napas de agua en el Valle de Azapa han disminuido un 30% el último año, encontrándose el espejo de agua a 80 metros aproximadamente.¹ De seguir así esta tendencia, podría reducir drásticamente la producción agrícola en pocos años. Por otra parte, se debe considerar que el uso del suelo agrícola aumenta rápidamente; hoy se cultivan 840 ha de tomate de alto rendimiento, por lo que la producción sobrepasará la disponibilidad del recurso hídrico en pocos años.²

En consecuencia, es necesario introducir innovaciones que mejoren la calidad del agua de riego y que permitan utilizar menos cargas del recurso, siendo una de esas innovaciones la fitorremediación³ de las aguas de riego a través de la adaptación, uso y mantención del Sistema Vetiver.⁴

El documento está estructurado en tres secciones principales. La primera de ellas, **Resultados y Lecciones Aprendidas**, tiene como finalidad proveer una visión sistematizada del nuevo servicio o herramienta tecnológica que derivó de los resultados y aprendizajes generados en el proyecto. En su desarrollo, esta visión contiene los elementos que permiten a los productores interesados apreciar si la opción responde a sus necesidades y permite mejorar o hacer más eficientes sus procesos productivos y de gestión.

¹ Información levantada en terreno por el equipo técnico del proyecto, con agricultores de la zona, año 2012.

² Información entregada en el proyecto al momento de su postulación.

³ La fitorremediación aprovecha la capacidad de ciertas plantas para absorber, acumular, metabolizar, volatilizar o estabilizar contaminantes presentes en el suelo, aire, agua o sedimentos como: metales pesados, metales radioactivos, compuestos orgánicos y compuestos derivados del petróleo.

⁴ Vetiver es una planta perenne de la familia de las gramíneas, nativa de la India.



La segunda sección consiste en la descripción de los Proyectos Precusores, donde se ilustran las experiencias que condujeron a la validación y sistematización de la herramienta tecnológica evaluada, como una forma de exponer el entorno, metodologías y aplicaciones prácticas que le dieron origen.

Finalmente, considerando el análisis realizado en la primera y segunda sección del documento, en una tercera, denominada Valor del Proyecto, se resumen los aspectos más relevantes y determinantes del aprendizaje para la viabilidad futura de la innovación realizada.

Se espera que esta información, sistematizada en la forma de una “innovación aprendida”,⁵ aporte a los interesados elementos clave respecto de los beneficios del uso o incorporación de nuevos servicios y herramientas tecnológicas desarrolladas.

⁵ “**Innovación aprendida**”: análisis de los resultados de proyectos orientados a generar un nuevo servicio o herramienta tecnológica. Este análisis incorpora la información validada del proyecto precursor, las lecciones aprendidas durante su desarrollo, los aspectos que quedan por resolver y una evaluación de los beneficios económicos de su utilización en el sector.

Resultados y lecciones aprendidas

► 1. Antecedentes

Los análisis y resultados que se presentan en este documento han sido desarrollados a partir de las experiencias y lecciones aprendidas en la ejecución del proyecto precursor⁶ denominado “Aumento y disponibilidad de la eficiencia en el uso del agua de riego a través de la adaptación del Sistema Vetiver para potenciar la agricultura sustentable en la Región de Arica y Parinacota”.

El proyecto fue financiado por FIA y ejecutado por la Universidad de Tarapacá entre los años 2012 y 2014, en asociación con dos agricultores del Valle de Lluta, María Bernardita Alonso y Pedro Madrid. Colaboraron también en el proyecto Luis González y Leonel Guarachi (Valle de Lluta), cuyos predios participaron como unidades piloto.

La finalidad de esta iniciativa fue adaptar e implementar el Sistema Vetiver como una nueva herramienta tecnológica para recuperar aguas y suelos contaminados, optimizando el uso del agua de riego y con ello aumentar y/o diversificar la productividad agrícola en la región.

⁶ “Proyecto precursor”: proyecto de innovación a escala piloto financiado e impulsado por FIA, cuyos resultados fueron evaluados a través de la metodología de valorización de resultados desarrollada por la Fundación, análisis que permite configurar la innovación aprendida que se da a conocer en el presente documento. Los antecedentes del proyecto precursor se detallan en la Sección 2 de este documento

► 2. Base conceptual de la tecnología

En el marco de la presencia de elementos fitotóxicos en el agua de riego y los suelos de los valles agrícolas, es necesario aplicar técnicas de remediación para reducir estos contaminantes.

El concepto de remediación hace referencia a la aplicación de estrategias físico-químicas para evitar el daño y la contaminación en suelos, aguas superficiales y aguas subterráneas. Si bien cada medio tiene particularidades, frecuentemente se encuentran íntimamente relacionados por lo cual se puede abordar el sistema como un todo.

Las tecnologías de remediación pueden clasificarse según distintos criterios, los que se describen a continuación:

Según estrategia de remediación

- Destrucción o modificación química de los contaminantes.
- Extracción o separación de los contaminantes aprovechando sus propiedades físicas o químicas (volatilización, solubilidad y carga eléctrica).
- Aislamiento o inmovilización del contaminante con el uso de métodos físicos o químicos.

Según tipo de tratamiento

- Tratamientos biológicos o biorremediación utilizan actividades metabólicas de ciertos organismos (plantas, hongos, bacterias) para degradar, transformar o remover los contaminantes a productos metabólicos inocuos.
- Tratamientos fisicoquímicos utilizan las propiedades físicas y/o químicas de los contaminantes o del medio contaminado para destruir, separar o contener la contaminación.
- Tratamientos térmicos utilizan calor para incrementar la volatilización, quemar, descomponer o fundir los contaminantes en un suelo.

Según lugar de realización del proceso de remediación

- *In situ*,⁷ aplicaciones en las que los contaminantes son removidos en el mismo sitio donde se encuentran.
- *Ex situ*,⁸ tecnologías que requieren de excavación, dragado o cualquier otro proceso de remoción antes del tratamiento.

⁷ *In situ* es una expresión latina que significa “en el sitio” o “en el lugar”.

⁸ *Ex situ* es una expresión latina que significa “fuera del lugar” o “fuera de sus hábitats naturales”.

Las técnicas de remediación *in situ*, de carácter biológico, son la biorremediación y fitorremediación. La fitorremediación aprovecha la capacidad de ciertas plantas para absorber, acumular, metabolizar, volatilizar o estabilizar contaminantes presentes en el suelo, aire, agua o sedimentos como: metales pesados, metales radioactivos, compuestos orgánicos y compuestos derivados del petróleo. Estas fitotecnologías ofrecen numerosas ventajas en relación con los métodos fisicoquímicos que se usan en la actualidad, por ejemplo, su amplia aplicabilidad y bajo costo.

Existen diversos mecanismos por los cuales las plantas pueden reducir los contaminantes, siendo el más relevante en el caso en estudio el de fitoextracción o fitoacumulación, que explota la capacidad de algunas plantas para acumular contaminantes en sus raíces, tallos o follaje. Los contaminantes extraídos son principalmente metales pesados, aunque también puede extraerse cierto tipo de contaminantes orgánicos y elementos e isótopos radiactivos. Generalmente, los sistemas de fitoextracción se implementan para extraer metales de suelos contaminados, por medio de plantas conocidas como metalófitas, es decir, acumuladoras de metales; sin embargo, también pueden implementarse para tratar aguas residuales.

En el ámbito de la fitorremediación, el vetiver (*Chrysopogon zizanioides* (L.) Roberty) se ha identificado como la planta con mayores capacidades fitorremediadoras de suelos y aguas dentro de las 400 especies estudiadas a nivel mundial. Sus raíces de 5 m y su rápido crecimiento, además de su adaptabilidad a todo tipo de climas y suelos, la convierten en la estrella de la fitorremediación. Su rango fitorremediador abarca todos los metales pesados y metaloides. En el caso del arsénico, por ejemplo, el umbral de toxicidad de las demás plantas estudiadas está entre 1 a 10 mg/kg, mientras que el vetiver acumula niveles de hasta 72 mg/kg. La absorción de herbicidas y pesticidas, tales como paratión, endosulfán, clorpirifos, también es una resultante exitosa, al igual que los hidrocarburos, y últimamente la aplicación en la descontaminación de radioactividad.

Como antecedente que refuerza esta opción frente a otras especies fitorremediadoras, se puede decir que la mayoría de las especies hiperacumulan principalmente en las hojas, además presentan baja biomasa, crecimiento lento y baja densidad de raíces, por lo que son lentas en el proceso de acumulación, abarcando solo el área superficial del suelo; tampoco son adaptables a todo tipo de suelos y/o climas. Por ello, el vetiver es adecuado para la fitorremediación de cualquier sitio, ya que su capacidad acumuladora se concentra en la raíz, dejando la parte aérea sin toxicidad.

La planta tiene un sistema de raíces finas y compactas que crecen muy rápido, alcanzando entre 3 y 4 metros de profundidad el primer año. Este sistema de raíces hace al vetiver extremadamente tolerante a la sequía y difícil de arrancar por fuertes corrientes; presenta tallos firmes y erguidos que pueden soportar flujos de agua relativamente profundos.

Foto 1. Planta de vetiver.



Fuente: FIA, proyecto precursor

Es muy resistente a plagas, enfermedades, fuego, heladas, tráfico y alta presión de pastoreo. Tolera variaciones climáticas intensas como sequía prolongada, inundaciones, sumersión y temperaturas extremas de $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$ a $+55\text{ }^{\circ}\text{C}$; puede rebrotar rápidamente después de haber sido afectada por sequías, heladas, salinidad y otras condiciones adversas al mejorar las condiciones ambientales o al añadir correctivos al suelo.

Es altamente eficiente en absorber nutrientes tales como nitrógeno, fósforo, y metales pesados en aguas contaminadas. Tolera un amplio rango de pH, desde 3.3 a 12.5 sin enmiendas del suelo; y tiene alta capacidad de resistir y desarrollarse en medios con herbicidas, plaguicidas, aluminio, magnesio y metales pesados como arsénico, cadmio, cromo, níquel, plomo, mercurio, selenio y zinc en los suelos.

Es un mejorador natural de la calidad de los suelos; reduce la erosión y salinidad, mejora la estructura, estabiliza el terreno, conserva la humedad del suelo y los nutrientes, y crea un microambiente favorable para el desarrollo de microorganismos antagónicos. Por lo anterior, es considerada una planta nodriza en tierras degradadas, sin embargo, por su característica de pasto tropical es muy intolerante a la sombra porque reduce su crecimiento y puede incluso eliminarlo en el largo plazo.

Las líneas genéticas que se utilizan en protección ambiental son estériles, por lo cual no existe riesgo de enmalezamiento o invasión, lo que implica que debe ser reproducida solo vegetativamente. Otra característica del vetiver es su largo período de vida, habiendo reportes de hasta 150 años, por lo cual puede utilizarse para tratamientos de largo plazo.



Foto 2. Planta de vetiver en distintos medios y estados.

Fuente: www.vetiver.cl

Tecnológicamente existen otras técnicas de remediación de minerales; específicamente para el caso del boro, podemos mencionar:

- Lixiviación: el boro puede ser lavado o lixiviado del suelo, para lo cual se requiere disponer de agua con un contenido de boro inferior del que se quiere dejar el suelo. Se requiere una cantidad tres veces mayor de agua que la necesaria para lixiviar la misma cantidad de sodio o cloruro, ya que el boro se mueve lentamente con la solución suelo, al encontrarse altamente adsorbido a los minerales de arcilla. Por otra parte, la mala condición de drenaje de los suelos del Valle de Lluta dificultaría el proceso de lavado.
- Osmosis inversa: mediante la aplicación de presión, el agua pasa a través de una membrana semipermeable que, de acuerdo al diámetro de sus poros, filtra las moléculas de mayor tamaño. Su eficiencia para el tratamiento del boro es de alrededor de un 50% (lo que puede ser insuficiente dependiendo de su concentración inicial, y considerando la Norma Chilena (Nch) 1333 que indica que el agua de riego puede contener como máximo 0,75 mg/l), tiene un gran consumo de energía, genera entre un 30 y 60% de agua de rechazo por lavado de las membranas. Tiene costos de inversión que no la hacen viable a pequeña escala.
- Resinas de intercambio iónico: tecnología basada en el uso de materiales específicos de intercambio, capaces de separar y concentrar elementos. Es altamente eficiente para la reducción de boro, aunque requiere permanentemente de reactivos químicos (ácido sulfúrico y soda cáustica) para la regeneración de la resina, presencia de altas concentraciones de boro en el líquido residual y tiene costos asociados relativamente altos. Además del costo implicado, actualmente el acceso a ácido sulfúrico se encuentra fuertemente restringido por las autoridades, existiendo casos de agricultores en la Región de Arica y Parinacota que han implementado estas plantas, pero no pueden ser operadas al no contar con este elemento.

► 3. El valor de la herramienta desarrollada

El Sistema Vetiver constituye una herramienta tecnológica de alto valor, principalmente para zonas productivas que sufren los efectos de la contaminación de aguas y suelos, tanto de origen natural como antrópico, razón por la cual fue evaluado en agricultores de los valles de la Región de Arica y Parinacota.

Tal como se describió en el punto anterior, existen diversas alternativas tecnológicas para la descontaminación de aguas y suelos, sin embargo, el Sistema Vetiver presenta ventajas desde el punto de vista ambiental ya que no utiliza reactivos químicos y no genera residuos con altas concentraciones de tóxicos. Por lo tanto, es compatible con una producción limpia u orgánica, contribuyendo a darle un valor agregado a los productos cultivados bajo este sistema.

En el caso de la Región de Arica y Parinacota, el desarrollo de su actividad agrícola depende, entre otros factores, de la cantidad y calidad del agua disponible para riego; la calidad varía ampliamente de acuerdo a la cantidad y tipo de sales que contenga, ya que algunos compuestos salinos son tóxicos para las plantas, entre ellos los cloruros, el sodio y el boro. Cabe destacar que la mala calidad del agua de los valles de Lluta y Camarones supone actualmente el subdesarrollo de al menos 3.000 ha de suelo agrícola. Una mejora en la calidad del agua y el suelo a través de un sistema de fitorremediación permitiría el desarrollo de una mayor variedad de cultivos, con mejores rendimientos y mayor rentabilidad.

En consecuencia, la fitorremediación a través del uso de vetiver podría dinamizar zonas deprimidas de la región, diversificando la matriz productiva, generando empleos, nuevos negocios y productos de mejor calidad para el consumo de la población regional y nacional. En el siguiente cuadro se describen las ventajas que ofrece esta tecnología respecto de las convencionales.



Cuadro 1. Ventajas y desventajas de la fitorremediación respecto a medios convencionales

Ventajas	Desventajas
<ul style="list-style-type: none"> • Es una tecnología sustentable y amigable • Es eficiente para tratar diversos tipos de contaminantes <i>in situ</i>. • Es aplicable en ambientes con concentraciones de contaminantes bajos a moderados. • Es de bajo costo, no requiere personal especializado para su manejo ni consumo de energía. • No produce contaminantes secundarios y por lo mismo no hay necesidad de lugares para desecho. • Tiene una alta probabilidad de ser aceptada por el público ya que es estéticamente agradable. • Evita la excavación y el tráfico pesado. • Tiene versatilidad potencial para tratar una gama diversa de materiales peligrosos. • Se puede reciclar recursos (agua, biomasa, metales). 	<ul style="list-style-type: none"> • Es un proceso relativamente lento (cuando las especies son de vida larga, como árboles o arbustos). • Es dependiente de las estaciones. El crecimiento de la vegetación puede estar limitado por extremos de la toxicidad ambiental. • Los contaminantes acumulados en las hojas pueden ser liberados nuevamente al ambiente durante el otoño (especies perennes). • Los contaminantes pueden acumularse en maderas para combustión. • No todas las plantas son tolerantes o acumuladoras. • La solubilidad de algunos contaminantes puede incrementarse, resultando en un mayor daño ambiental o migración de contaminantes. • Se requiere áreas relativamente grandes. • Pudiera favorecer el desarrollo de mosquitos (en sistemas acuáticos).

Fuente: http://www.revistaciencia.amc.edu.mx/images/revista/55_3/Fitorremediacion.pdf

En el marco de los efectos del cambio climático, cabe mencionar que el Sistema Vetiver presenta ventajas en su capacidad de adaptación por su posibilidad de sobrevivir en los dos extremos de los gradientes de temperatura y precipitación, y colabora en la mitigación de estos efectos dado que⁹:

- Reduce el daño potencial de desastres y eventos extremos, estabiliza tierras y controla la erosión e inundaciones.
- Reduce la intensidad de las inundaciones al disminuir el flujo de aguas lluvia en las pendientes y mejorar la recarga del agua en el subsuelo.
- Mejora la calidad del agua al evitar el flujo de sedimentos y contaminantes hacia los ríos.
- Protege y reduce los costos de mantenimiento de estructuras como represas, canales, obras viables, etc., todos vulnerables al cambio climático.
- Reduce la erosión y conserva la humedad del suelo, lo que resulta en cosechas mejoradas.
- Capta grandes volúmenes del carbono atmosférico.

⁹ El Sistema Vetiver y El Cambio Climático. Dick Grimshaw - presidente de la Red Vetiver Internacional. 12 marzo 2011. www.vetiver.org.

► 4. La innovación tecnológica

Aunque la tecnología del Sistema Vetiver fue introducida y evaluada en la Región de Arica y Parinacota a través del proyecto precursor, no constituye una nueva herramienta *per se* ya que ha sido probada y usada ampliamente en otros países, particularmente en las regiones tropicales y subtropicales. Dado que las temperaturas globales se están incrementando, las zonas de aplicación se están extendiendo hacia las regiones con climas más templados.

En consecuencia, la innovación se refiere a su adaptación y evaluación en condiciones locales, especialmente en el Valle de Lluta, donde la diferencia de productividad respecto del Valle de Azapa se debe fundamentalmente a la calidad del agua de riego, siendo para el Valle de Lluta el alto contenido de boro la principal limitante (Torres A. y E. Acevedo. 2008). Una herramienta tecnológica, como el Sistema Vetiver, exige la determinación de la técnica y métodos que permitan obtener altas tasas de descontaminación del agua en las condiciones de los valles agrícolas de la región (Lluta, Azapa y Camarones), así como la validación de la reducción de sus contaminantes (sales, boro, arsénico y metales pesados), y la transferencia del sistema al sector productivo para su adecuada adopción.

Debido a sus extraordinarias características morfológicas y fisiológicas, el pasto vetiver ha sido usado exitosamente en Australia, China, Sudáfrica, Tailandia y algunos países latinoamericanos para la rehabilitación de áreas degradadas como rellenos sanitarios, rehabilitación de desechos mineros, fitorremediación de escombreras y desechos rocosos en minas de carbón, oro, plomo, zinc, cobre, bentonita, bauxita y platino.

Foto 3. Aplicación del Sistema Vetiver en el tratamiento de aguas residuales en China.¹⁰



¹⁰ Fuente: http://www.vetiver.org/COL_TRATAMIENTO%20DE%20AGUAS%20RESIDUALES%20MEDIANTE%20FILTROS.pdf

► 5. Conveniencia económica para el productor

El mejoramiento de la calidad de agua y suelo tiene una repercusión directa sobre la productividad y calidad de los cultivos. Por lo tanto, la reducción de contaminantes críticos, bajo el umbral de toxicidad de cada especie, puede permitir la introducción de cultivares en zonas donde tradicionalmente no habían tenido éxito.

Respecto del proceso de fitorremediación en agua, ensayos realizados en contenedores con agua proveniente de Lluta y Camarones, con adición de metales pesados, mostraron una eficiencia de remediación de 98% para el plomo en diez días de permanencia y de 75% para el manganeso en quince días. Ambos ensayos se realizaron con una biomasa vegetal equivalente a 8,7 kg por cada 1.000 litros de agua.

En el caso del boro, los ensayos mostraron niveles de remediación que van desde 19% a 32% de eficiencia en cinco días, ocupando 5 kg de biomasa vegetal cada 1.000 litros de agua. Se constató que los niveles de remediación no se mantienen constantes en el tiempo, ya que el boro es inicialmente absorbido por las raíces y luego exudado nuevamente al agua, por lo cual los mayores niveles de remediación se verifican dentro de los primeros cinco días.

Esto fue corroborado en otro set de ensayos con mayores niveles iniciales de boro, donde se alcanzaron eficiencias de remediación de 14% a 20% en cinco días. En todos los casos mencionados, independiente del nivel inicial, se observaron reducciones en el nivel de boro de 1,5 a 2,5 mg/l.



En el proyecto precursor se realizó un ensayo de campo con cultivos calificados como sensibles al boro, utilizando agua de riego previamente tratada con el Sistema Vetiver. Si bien la reducción del nivel de boro no fue tan significativa, se lograron producciones bastante prometedoras respecto a las experiencias previas en el Valle de Lluta.

- Maíz híbrido cv. *Prays*: se alcanzó rendimiento de una mazorca de calibre extra por planta, con un 100% de la cosecha calibre extra. El rendimiento observado en el Valle de Azapa de este maíz alcanza una mazorca por planta de calibre primera. El resultado es relevante ya que el maíz dulce prácticamente no se cultiva en Lluta, precisamente por su baja tolerancia al boro.
- Lechuga cv. *Batavia*: se logró un rendimiento de 4 cajas por cada 10 metros lineales; mientras que en otros valles de la región el rendimiento promedio es de 3 cajas por cada 10 metros.
- Melón: se obtuvo un rendimiento promedio de 3 melones calibre segunda por mata, con un 10% de la producción de primera calidad; mientras que en Azapa el promedio es de 3 melones por mata, con un 30% calidad extra y 30% calidad primera. En este caso, hubo problemas de manejo que no permitieron una mejor expresión productiva. En sectores del Valle de Lluta donde se han cultivado melones, se reportan rendimientos de 3 frutos por planta, 40% primera, 30% segunda y 25% tercera-cuarta, para la variedad Arava (melón Galia). Otro reporte señala rendimiento de 2 frutos por planta, con 5% extra, 50% primera, 20% segunda y 20% tercera-cuarta, variedad Dream Dew (melón tuna).
- Ají cristal: se alcanzó un rendimiento promedio de 80 frutos por mata, con 90% de calibre primera y 10% calibre segunda. Este es un cultivo muy poco explotado en la región, solo hay referencias de un productor en el Valle de Azapa que alcanza rendimientos de 70-80 frutos por mata de primera calidad. En este ensayo el cultivo no presentó daños por salinidad o boro durante todo su ciclo.



Foto 4. Cultivo de maíz dulce regado con agua tratada con Sistema Vetiver en Valle de Lluta.

Fuente: Proyecto precursor.



Foto 5. Cultivo de ají cristal regado con agua tratada con Sistema Vetiver en Valle de Lluta.

Fuente: Proyecto precursor.

Si bien no se ha logrado parametrizar una estructura de costos estándar para el proceso de fitorremediación, se estima que el costo de tratar agua para el riego de una hectárea de suelo alcanza aproximadamente \$6.000.000 por concepto de inversión y asesoría (compra de plantas, propagación, materiales, insumos, mano de obra). En el cuadro siguiente se presenta una estimación de las inversiones necesarias para un estanque de 25 por 15 metros de superficie, el cual requiere un total de 3.750 plantas (a una densidad de 6 plantas por bandeja), con lo cual en ciclos constantes se puede alimentar un estanque de acumulación para regar una hectárea.

Cuadro 2. Inversiones para el establecimiento de vetiver en estanque de riego				
Ítem	Unidad	N° unidades	Valor unitario (\$)	Valor total (\$)
Adquisición plantas				
Plantas vetiver	Planta	250	1.000	250.000
Flete plantas	Global	1	200.000	200.000
Propagación plantas				
Asesoría	Global	1	400.000	400.000
Mano de obra	Jornadas	80	15.000	1.200.000
Compost	Sacos	2	7.000	14.000
Implementos y otros	Global	1	200.000	200.000
Implementación en estanque				
Bandejas Plumavit	Unidad	625	1.500	937.500
Esponja	Unidad	3.750	25	93.750
Mantenimiento primer año				
Fertilizante (té de compost)	Litro	15.000	100	1.500.000
Mano de obra poda	Jornadas	78	15.000	1.170.000
Implementos y otros	Global	1	100.000	100.000
			Total	6.065.250

Fuente: Proyecto precursor y estimaciones equipo consultor.



Los costos de mantención en los años posteriores corresponden principalmente a la mano de obra de poda de las plantas, medida que promueve el desarrollo de nuevos brotes y reduce el volumen de hojas secas que pueden sombrear brotes jóvenes. El otro ítem de costo relevante es el de fertilización, que debe ser continua pues al estar en un medio líquido la planta no puede obtener todos los nutrientes para su desarrollo.

Cuadro 3. Costo de mantención anual del vetiver en estanque de riego

Ítem	Unidad	Nº unidades	Valor unitario (\$)	Valor total
Fertilizante (té de compost)	Litro	11.250	100	1.125.000
Mano de obra poda (2)	Jornadas	156	15.000	2.340.000
Implementos y otros	Global	1	100.000	100.000
			Total	3.565.000

Fuente: Proyecto precursor y estimaciones del equipo consultor.

De acuerdo a la empresa Bioingeniería Vetiver Chile SpA,¹¹ que produce, comercializa las plantas y presta servicio de asesoría para el desarrollo de proyectos para conocer la cantidad de material vegetal a utilizar, se debe diseñar un pequeño piloto para calibrar el sistema. Esto se realiza construyendo dos piscinas pequeñas; una es la testigo, y en la otra se coloca un total de 10 balsas flotantes con 16 plantas de vetiver cada una. Después de tres meses de crecimiento se realiza análisis de agua en ambas piscinas para obtener los resultados, repitiendo la medición

¹¹ Comunicación personal con Pablo Molina, Bioingeniería Vetiver Chile SpA.



a los seis meses, cuando las plantas están más desarrolladas; con las diferencias obtenidas se puede extrapolar los resultados a una escala mayor. Debido a que en la descontaminación con vetiver existen muchas variables a considerar, el método de calibración es el que ha dado mejores resultados para una correcta cubicación de la cantidad de balsas que se necesitan, por lo tanto, existe coincidencia en la dificultad de establecer a priori un valor de la inversión.

Dentro de los costos del sistema debe considerarse que el crecimiento de las raíces de las plantas en agua se limita a aproximadamente un metro, por lo cual el estanque de remediación debe tener esa profundidad para obtener el nivel de remediación esperado, con la densidad recomendada de plantas. Por lo tanto, para construir un estanque de remediación de igual volumen que el estanque de acopio tradicional, que tiene una profundidad superior a los 2 metros, se requiere utilizar una superficie aún mayor. Dado el aumento del valor de la tierra en los valles de Arica, cada metro cuadrado de superficie tiene un costo de oportunidad equivalente de \$20 a \$50 mensual, según el valor de arriendo de los terrenos.

La rentabilidad del sistema dependerá del nivel inicial del elemento contaminante, de la sensibilidad del cultivo a las variaciones de ese elemento y a la competitividad del cultivo. Es decir, un cultivo que presenta una elevada rentabilidad permite hacer más viable la inversión en comparación con otros cultivos de márgenes más estrechos. Por otra parte, en condiciones en que el nivel de contaminación sea superior al margen de toxicidad del cultivo, y la tecnología sea capaz de reducir el elemento contaminante bajo ese umbral, se obtendrá un alto impacto en el rendimiento y calidad del producto.



► 6. Claves de viabilidad

Uno de los factores clave para la implementación efectiva de este sistema es diseñar un modelo productivo que sea práctico de implementar, lo cual no se desarrolló a cabalidad en el proyecto precursor dado su carácter experimental. La estrategia de contar con un estanque adicional para remediar el agua de riego supone una alta inversión en su construcción, la reducción de la superficie productiva, y un permanente trabajo de rotación de plantas y traspaso de agua de un estanque a otro.

Dado el costo de las plantas y la escasa oferta de proveedores a nivel nacional, es clave desarrollar un método económico y eficiente para multiplicar y obtener grandes cantidades de plantas a un costo significativamente menor al precio de compra. En este sentido, la utilización de platabandas resultó ser el más sencillo y eficaz de implementar.

Si bien los resultados de reducción del boro en agua de riego no fueron tan significativos, una disminución de 1,5 a 2,5 mg por litro puede tener un impacto positivo en la productividad si se maneja adecuadamente.

Los mejores resultados se observaron en remediación de suelos, sistema que presenta menores costos de mantención y puede sostenerse por muchos años realizando medidas de manejo básicas como poda y fertilización. Esta línea de trabajo se encuentra en desarrollo mediante otro proyecto apoyado por FIA, por lo cual se espera contar con información más acabada para una propuesta de manejo integral.

Por otra parte, la tendencia a la producción de alimentos más inocuos, la eficiencia en el uso del agua y la utilización de prácticas ambientalmente amigables, tanto en el mercado externo como interno, puede ser una fuerza que estimule el uso de tecnologías alternativas, como es el Sistema Vetiver.

Foto 6. Capacitación de agricultores en preparación de platabanda para trasplante de vetiver.



Fuente: Proyecto precursor.

► 7. Asuntos por resolver

Para que la tecnología evaluada pueda ser transferida al sector productivo, deben desarrollarse paquetes tecnológicos concretos a partir de la realidad local, tanto en términos de nivel de contaminación inicial, como cultivos seleccionados y condiciones particulares.

En la remediación de aguas, el sistema demostró resultados positivos a escala experimental, pero no se ha desarrollado un modelo operativo replicable en el corto plazo. En cuanto a los suelos, los resultados son bastante prometedores, lo que sustentó una segunda iniciativa postulada por la Universidad de Tarapacá y financiada por FIA, que se encuentra actualmente en ejecución: “Validación del Sistema Vetiver en zonas áridas para la recuperación, remediación y protección de suelos agrícolas en la Región de Arica y Parinacota”.

A través de esta segunda iniciativa se busca validar los resultados obtenidos en el proyecto precursor, determinando los niveles de remediación de boro en los suelos del Valle de Lluta y cuantificando el aumento de fertilidad de los suelos remediados con parámetros físicos, químicos y biológicos. Esta última línea de trabajo es clave para contrastar los resultados de la remediación con la productividad de los cultivos, lo cual sustentará la decisión de implementar el sistema con criterios objetivos de costo/beneficio.

Para evaluar el potencial del Sistema Vetiver desde el punto de vista de los beneficios, es necesario realizar experiencias de cultivos utilizando testigos o controles, que se sometan al mismo sistema de manejo, en el mismo sitio, con la misma variedad, aislando únicamente



el efecto del tipo de agua de riego utilizada. De este modo, se podrá cuantificar el efecto directo sobre el rendimiento comercial de los cultivos en relación a la situación base.

Contar con cultivos más sanos y vigorosos, gracias a una mejor calidad de agua de riego, permitiría también reducir el uso de algunos insumos, disminuyendo los costos respecto al sistema tradicional en una magnitud que debe ser estudiada.

En un sistema de vetiver hidropónico se estima que el 90% del peso fresco en una planta es agua, la cual extrae del estanque; es decir, hay una proporción de agua del estanque que es absorbida por la planta y no puede ser utilizada para los cultivos. Sin embargo, la cobertura de la superficie del estanque reduce la evaporación, dejando más agua disponible para los cultivos. Por lo tanto, es necesario estudiar en detalle esta relación para cuantificar el consumo hídrico de las plantas de vetiver.

Por último, es clave optimizar el proceso de propagación de plantas para obtener gran número de unidades a bajo costo. Existen otras técnicas, como la micropropagación, que pueden utilizarse a gran escala aunque son más complejas de implementar y requieren laboratorios y personal especializado.

El proyecto precursor

► 1. El entorno productivo

El proyecto precursor desarrolló sus actividades en la Región de Arica y Parinacota, lugar donde la Universidad de Tarapacá tiene sus oficinas centrales y se ubica la Facultad de Ciencias Agronómicas, unidad técnica ejecutora del proyecto.

La Región de Arica y Parinacota se caracteriza por la aridez de su clima y una economía tradicionalmente basada en la extracción de recursos mineros, pesqueros y en la actividad



comercial por su carácter de región fronteriza con Perú y Bolivia. Las actividades agropecuarias¹² se ven limitadas por las condiciones ambientales, sin embargo, la existencia de valles costeros con disponibilidad de agua de riego ha permitido el desarrollo de una pujante actividad agrícola, especialmente orientada hacia la producción de hortalizas, olivos y de la industria semillera. Destaca especialmente el Valle de Azapa, cuya producción se orienta a los mercados de la zona central, alcanzando altos niveles de desarrollo tecnológico y elevados rendimientos productivos. Los valles de Lluta, Camarones y Codpa logran un menor desarrollo, aunque la superficie agrícola se encuentra en permanente expansión gracias a la implementación de diversas tecnologías.

Las hortalizas con mayor superficie sembrada en la región son choclo, tomate consumo fresco, cebolla y pimiento. La importancia de esta zona como proveedor puede graficarse indicando que, de acuerdo a los registros de ODEPA, en el año 2015 el 34% del tomate comercializado en el Terminal Lo Valledor de Santiago (principal feria mayorista del país) provino de la Región de Arica y Parinacota. El rendimiento promedio regional de tomates y pimientos supera significativamente la media nacional y alcanza los niveles más altos entre todas las regiones, con un alto valor comercial por la condición de “primor”, que hace de la agricultura regional una actividad muy competitiva y en permanente expansión.

La agricultura del Valle de Lluta está orientada principalmente al cultivo de maíz choclero y alfalfa y, en menor proporción, de cebolla, ajo, betarraga y otras hortalizas tolerantes a la presencia de boro en el agua de riego. En general, se utiliza material genético endémico, adaptado a las condiciones de boro del valle, cuyos rendimientos son inferiores a los esperables en condiciones de riego con menores contenidos de boro. Esto, sumado a que los intentos por introducir otras especies y variedades más rentables no han dado los resultados esperados, ha contribuido a que la agricultura del valle no tenga un despegue relevante.

En consecuencia, el principal factor limitante para el desarrollo agrícola de la región es el volumen y calidad del recurso hídrico. Los principales valles de la región, Azapa y Lluta, son regados por aguas cuyo origen principal son los ríos San José y Lluta, respectivamente, que se caracterizan por su salinidad y alta conductividad eléctrica, con presencia de algunos elementos tóxicos para las plantas (Torres y Acevedo, 2008).

Los fenómenos tóxicos ocurren cuando ciertos compuestos químicos, tomados por la planta desde el suelo o el agua de riego, se acumulan en las hojas durante el proceso de transpiración, hasta el punto que pueden provocarle daños. El grado de deterioro depende del tiempo de exposición, así como de la concentración del compuesto tóxico, sensibilidad del cultivo al compuesto y requerimientos hídricos de la planta.

¹² La actividad silvoagropecuaria de la Región de Arica y Parinacota aporta un 3% del PIB regional y un 0,7% del PIB silvoagropecuario nacional.

Los ríos del norte de nuestro país suelen presentar altas concentraciones de minerales, especialmente boro, lo cual origina que existan valles de uso agrícola con altos niveles tanto en aguas como en suelos. El contenido de boro alcanza concentraciones de hasta 16 mg/l en el río Lluta y de 29 mg/l en el río Camarones, limitando fuertemente la productividad agrícola de estos valles.



Foto 7. Imagen del Valle de Lluta.

Fuente: Dreamstime en: <https://es.dreamstime.com/photos-images/ciudad-de-arica-en-chile-septentrional.html>

Condiciones similares de contaminación natural se observan en otros ríos del norte grande de nuestro país, los que se originan en salares andinos del altiplano y arrastran diversos minerales de carácter nocivo para la actividad agrícola. Existe también contaminación por boro en aguas subterráneas, el cual puede ascender por capilaridad y penetrar los suelos.

En general, la calidad natural del río Lluta es clasificada como de regular a mala, con altos niveles de boro, arsénico, oxígeno disuelto, pH, cobre, aluminio, hierro, cromo, manganeso, conductividad eléctrica, sulfatos, zinc, cloruros y plomo. Los altos valores de boro en el agua superficial son atribuibles esencialmente a la existencia de depósitos de evaporitas de boratos existentes en los salares altiplánicos y en el suelo, donde los boratos forman parte de la costra salina. Esta fuente natural de contaminantes, unido a las bajas precipitaciones que no permiten una dilución de los contaminantes aguas abajo, permiten la concentración de sales debido a la alta evaporación sufrida en el trayecto.

En relación al riego agrícola, los niveles de boro observados en el río Lluta exceden los límites máximos señalados por la Norma Chilena “Requisitos de calidad del agua para diferentes usos” (NCh 1.333), que indica que el agua de regadío puede contener como máximo 0,75 mg/l.

En cantidades adecuadas el boro es uno de los micronutrientes esenciales para el desarrollo de las plantas superiores, está involucrado en procesos como la formación de la pared celular, elongación del tubo polínico y transporte de azúcares, entre otros. Sin embargo, el rango



entre déficit y toxicidad al boro es muy estrecho, por lo que la regulación entre la absorción y exclusión en la célula son fundamentales para mantener el equilibrio interno.

Por estas razones, el desarrollo de herramientas tecnológicas que permitan reducir la presencia de boro y otros componentes tóxicos posibilitan mejorar la calidad del agua de riego, mejorando con ello la productividad y calidad de los cultivos regados. También facilitan la incorporación de nuevos cultivos y variedades más rentables que por su sensibilidad al boro no pueden ser cultivados con éxito en la actualidad.

Si bien existen diversos minerales y sustancias de carácter contaminante, el boro resulta un componente de especial importancia para la agricultura del extremo norte, por lo que el análisis de la problemática y la solución propuesta se concentran principalmente en el control de este elemento, aunque sin excluir su aplicación para la reducción de otras sustancias.

► 2. El proyecto

2.1. Características generales

El desarrollo y validación de esta investigación surge de la ejecución de un proyecto financiado por la Fundación para la Innovación Agraria, FIA, ejecutado entre los años 2012 y 2014. Sus actividades se desarrollaron en la Región de Arica y Parinacota.

El proyecto, denominado “Aumento y disponibilidad de la eficiencia en el uso del agua de riego a través de la adaptación del Sistema Vetiver para potenciar la agricultura sustentable en la Región de Arica y Parinacota”, fue desarrollado por la Universidad de Tarapacá en asociación con dos agricultores de los valles de Lluta y Azapa donde se implementaron los ensayos y piloto.

El objetivo del proyecto fue desarrollar un sistema de bajo costo basado en la planta tropical vetiver, que permitiera reducir la concentración de boro, arsénico y metales pesados presentes en el agua de riego de los valles de la región, para ser utilizada en una mayor diversidad de cultivos y con mejores resultados productivos.

Se implementó un piloto en el Valle de Lluta para la remediación de aguas contaminadas a través de la aplicación del Sistema Vetiver, y se realizaron diversos ensayos que permitieran desarrollar la técnica, testear sus resultados de descontaminación de agua y suelos, y evaluar sus resultados en cultivos piloto regados con agua descontaminada.

A través de este proyecto se buscó optimizar el uso del recurso hídrico, que es un factor escaso en la región, y con ello contribuir a la productividad y sustentabilidad de la producción agrícola, utilizando un sistema económico y amigable con el medio ambiente.

El proyecto se llevó a cabo a través de las siguientes fases:

- **Obtención de plantas de vetiver:** para desarrollar el Sistema Vetiver se adquirieron plantas en un vivero comercial de Chile, se implementó un vivero a nivel regional para multiplicar las plantas y obtener mayor cantidad de material para su posterior utilización en agua o en suelo.
- **Pretesteo de fitorremediación de agua:** set de ensayos en contenedores con diferentes concentraciones de contaminantes, volumen de agua, tiempos de residencia y biomasa vegetal, con el fin de obtener parámetros de funcionamiento antes de pasar al ensayo piloto. Los ensayos incluyeron fitorremediación de aguas de los ríos Lluta y Camarones, analizando boro, arsénico, manganeso y plomo, utilizando vetiver en balsas hidropónicas.

- Ensayo de campo fitorremediación de boro en agua: se realizó fitorremediación en estanque de agua para riego en el Valle de Lluta, mediante plantas de vetiver en balsas hidropónicas. El agua descontaminada se utilizó para regar un policultivo de lechuga, maíz dulce, ají cristal y melón, especies de baja tolerancia al boro, razón por la cual no se cultivan habitualmente en el Valle de Lluta.
- Ensayo de fitorremediación de boro en suelo a nivel de maceta: se realizaron análisis de fitorremediación de boro en macetas con plantas de vetiver, regadas con agua con concentraciones variables de boro, determinando posteriormente la concentración final de boro en el suelo.
- Ensayo de campo fitorremediación de boro y cloruros en suelo: se establecieron plantas de vetiver bajo dos modalidades. En un caso se alternaron hileras de vetiver con cultivo de lechuga y melón; y en otro caso se establecieron únicamente plantas de vetiver, las cuales fueron arrancadas posterior a su desarrollo y así dejar el paño disponible para otro cultivo.

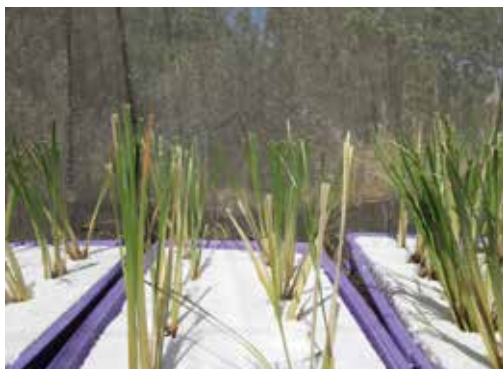


Foto 8. Balsas hidropónicas vetiver en bateas
Fuente: Proyecto precursor.



Foto 9. Balsas hidropónicas vetiver en piscina
Fuente: Proyecto precursor.

La investigación realizada aporta información técnica fundamental para la multiplicación de la planta a nivel local, y de su uso en condiciones controladas para la remediación de suelos y aguas con elevados niveles de elementos nocivos para los cultivos, propios de la Región de Arica y Parinacota. En particular, no existen reportes a nivel mundial del uso de vetiver para la remediación específica de boro, y por tanto se trata de una experiencia pionera para este elemento. Esta herramienta podría ser provechosa para cualquier agricultor que se enfrenta a una mala calidad de su agua de riego, siendo esperable la obtención de mejores rendimientos en los cultivos y la posibilidad de ampliar el rango de ellos.



Foto 10. Balsas hidropónicas vetiver en estanque de riego. .

Fuente: Proyecto precursor



Foto 11. Balsas hidropónicas vetiver en estanque de riego.

Fuente: Proyecto precursor.

2.2 Validación del proceso

El modelo de utilización del vetiver para fitorremediación de agua de riego y suelos se implementó y validó a través de cuatro etapas, que se describen a continuación.

a. Obtención y multiplicación del material a utilizar

Dado que se requiere un gran número de plantas para implementar el sistema de forma exitosa, se requieren viveros capaces de producir grandes cantidades de plantas de alta calidad y bajo precio. En Chile existen viveros comerciales de vetiver, pero dado su costo y de acuerdo a la necesidad de plantas, puede ser necesario propagar el material adquirido.

Existen distintos métodos de propagación de vetiver, con diversos grados de complejidad. En el proyecto se utilizó con éxito la separación de brotes para producir hijuelos. Para ello se separan brotes maduros de plantas madre, obteniendo hijuelos que deben ser cortados de 20 cm de largo la hoja, y la raíz a 5 cm. Los hijuelos deben ser sumergidos en agua con fertilizante, como estiércol líquido, lodo de arcilla, aloe vera, urea y/o té de compost, y expuestos a la luz hasta el crecimiento de raíces nuevas al cabo de algunos días.



Foto 12. Hijuelos a raíz desnuda listos para plantar, sumergidos en té de estiércol y licuado de aloe vera. Fuente: Proyecto precursor.



Foto 13. Hijuelos trasplantados en platabanda. Fuente: Proyecto precursor.



Luego, se plantan en bolsas plásticas de 30 cm de largo que contengan una mezcla mitad suelo y mitad compost, o mezcla de sustrato, y mantenerse dos meses hasta que tengan raíces de 30 cm. Este método permite obtener plantas fuertes, con buenas tasas de establecimiento y desarrollo después del trasplante.

Otra alternativa es trasplantar los hijuelos a platabandas de 1 m de ancho y 30 cm de profundidad de suelo, cubiertas con polietileno perforado cada 20 cm sobre y entre hileras. Se recomienda aplicar una cama de 3 a 4 kg de compost o estiércol por m^2 , y fertilizar con fosfato diamónico o NPK (nitrógeno, fósforo y potasio) a razón de 30 g por m^2 . Las malezas deben controlarse durante la etapa de establecimiento, aunque en ningún caso debe utilizarse glifosato. Las dos primeras semanas el riego debe ser diario, las cuatro semanas siguientes día por medio y posteriormente cada tres a cuatro días.

b. Aclimatación de la planta al medio acuático (fitorremediación en agua)

Aproximadamente a los tres meses, cuando las plantas tengan unos 6 hijuelos y 30 cm de raíz, deben traspasarse a bandejas flotantes y ubicarse en estanques con agua. En el momento de pasarlas al agua se deben podar las hojas a 20-30 cm, aplicar té de estiércol u otro fertilizante al agua y mantenerlas hasta que alcancen unos 40 cm de raíz.

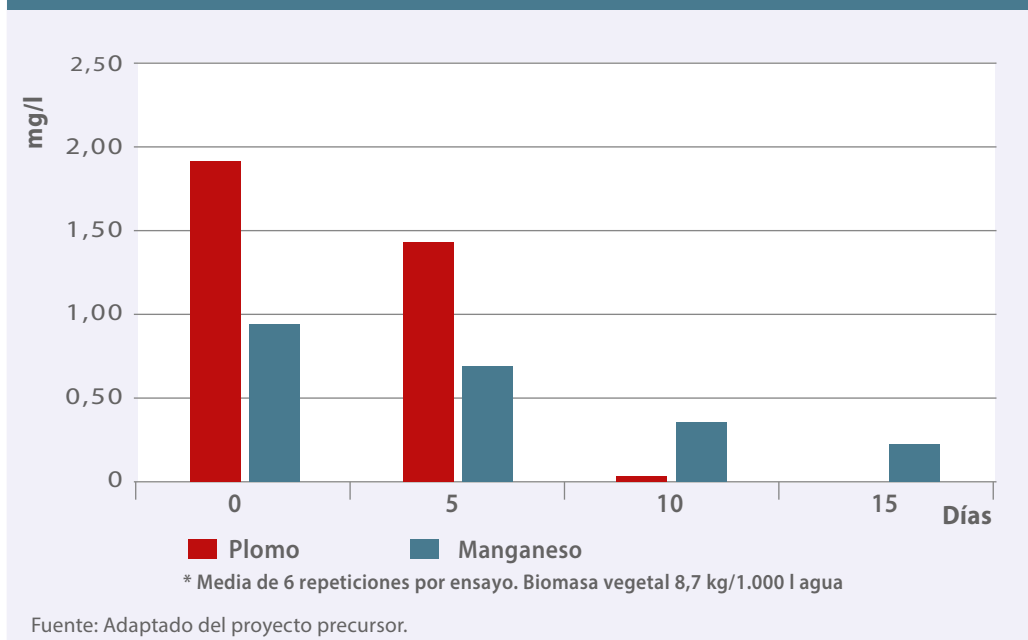
c. Proceso de fitorremediación en agua

Una vez que las plantas alcanzan unos 40 cm de largo de raíz, están en condiciones de ser trasladadas al agua que desea depurarse. Para ello se debe disponer de un estanque donde el volumen de agua permanecerá durante el tiempo necesario para lograr la reducción del elemento requerido hasta el nivel buscado. Luego debe ser trasvasijada a un estanque de acumulación para realizar el riego de los cultivos según necesidad.

La cantidad de plantas a utilizar y el tiempo de permanencia del agua depende del tipo y nivel de contaminantes, pH del agua, entre otras variables. A continuación se presenta una síntesis de los resultados obtenidos en el desarrollo del proyecto.

En el caso de los metales pesados, ensayos realizados en bateas con agua proveniente de Lluta y Camarones, con adición de metales pesados, mostraron una eficiencia de remediación de 98% para el plomo en diez días de permanencia y de 75% para el manganeso en quince días. Ambos ensayos se realizaron con una biomasa vegetal equivalente a 8,7 kg por cada 1.000 litros de agua.

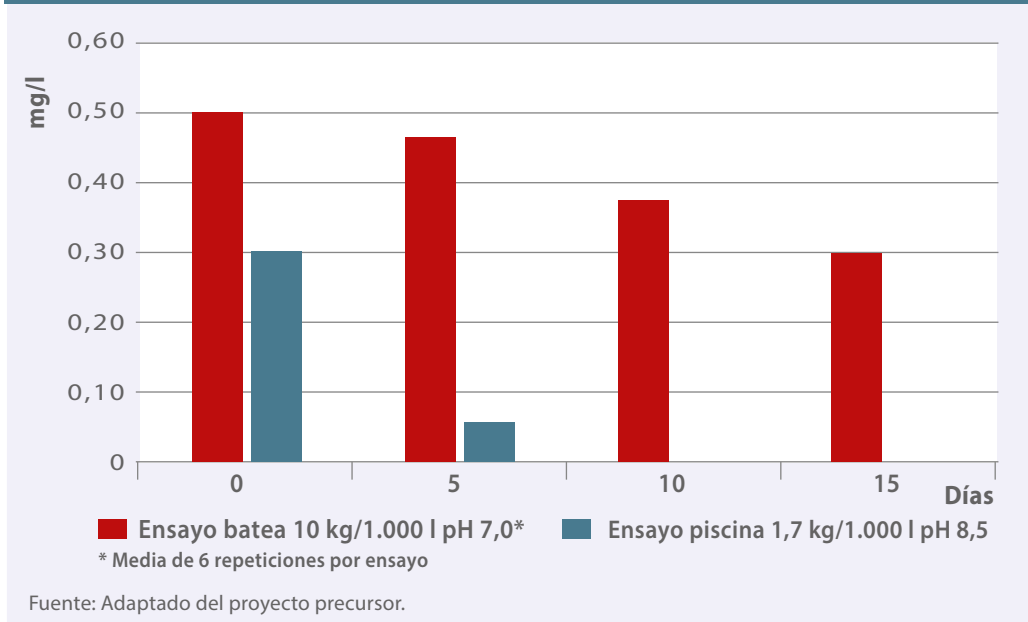
Figura 1. Niveles de metales pesados en agua de riego, utilizando vetiver en balsas hidropónicas



Para el metaloide arsénico se hicieron distintos ensayos, obteniéndose resultados variables según las condiciones de pH inicial del agua, distintos niveles de biomasa y distintos niveles iniciales del contaminante. La eficiencia de remediación varió de 80% en cinco días a 35% en quince días.

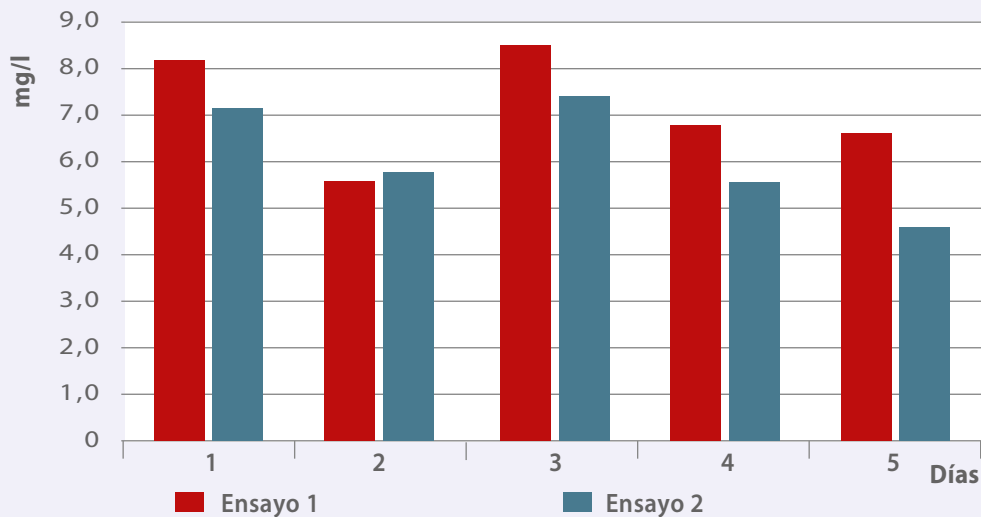


Figura 2. Niveles de arsénico en agua de riego, utilizando vetiver en balsas hidropónicas



En el caso del boro, los ensayos mostraron niveles de remediación que van desde 19% a 32% de eficiencia en cinco días, ocupando 5 kg de biomasa vegetal cada 1.000 litros de agua. Como se observa en el siguiente cuadro, se constató que los niveles de remediación no se mantienen constantes en el tiempo, ya que el boro es inicialmente absorbido por las raíces y luego exudado nuevamente al agua, por lo que los mayores niveles de remediación se verifican dentro de los primeros cinco días.

Figura 3. Niveles de boro en agua de riego, utilizando vetiver en balsas hidropónicas (ensayos en piscina)

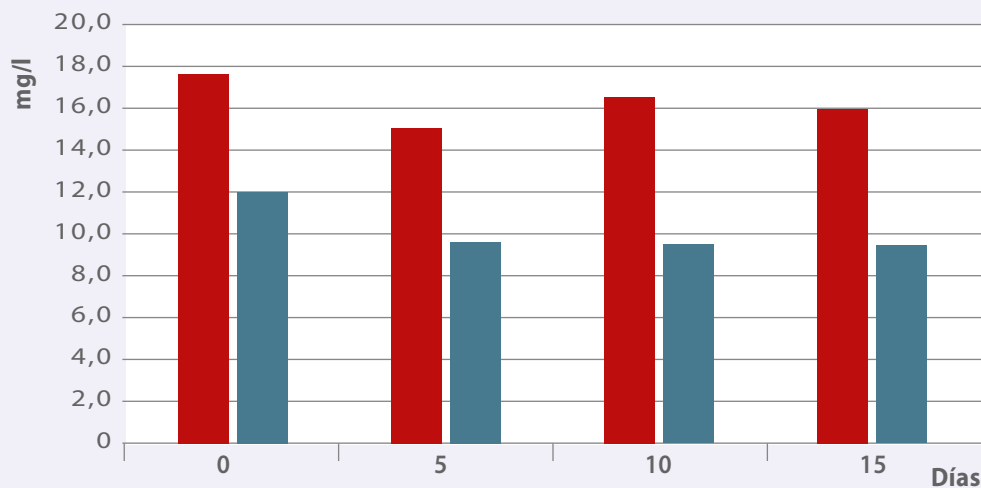


Media de 3 repeticiones por ensayo. Biomasa vegetal 5 kg/1.000 l agua

Fuente: Adaptado del proyecto precursor.

Esto fue corroborado en otro set de ensayos con mayores niveles iniciales de boro, donde se alcanzaron eficiencias de remediación de 14% a 20% en cinco días. En todos los casos mencionados, independiente del nivel inicial, se observaron reducciones en el nivel de boro de 1,5 a 2,5 mg/l.

Figura 4. Niveles de boro en agua de riego, utilizando vetiver en balsas hidropónicas (ensayos en contenedor)



■ Biomasa 25,7 kg/1.000 l*
* Media de 4 repeticiones por ensayo

■ Biomasa 20,9 kg/1.000 l**
** Media de 3 repeticiones por ensayo

Fuente: Adaptado de proyecto precursor

d. Proceso de fitorremediación en suelos

Respecto al boro en los suelos, se utilizaron macetas con plantas de vetiver en un suelo alto en boro (8,65 mg/l), regadas con niveles variables de boro en el agua. Al cabo de tres meses se alcanzaron altos niveles de remediación, incluso en aquellas con los más altos grados de contaminación en el agua de riego, superando largamente los valores observados en las aguas de la región.

Cuadro 4. Niveles de boro en suelo utilizando plantas de vetiver (ensayos en macetas)

Boro en agua de riego (mg/l)	Boro inicial suelo (mg/l)	Boro aplicado por riego mes 1 (mg/l)	Concentración total mes 1 boro en suelo (mg/l)	Concentración mes 3 boro en suelo (mg/l)	% de eficiencia
1,00	8,65	4,00	12,65	4,27	66,25
20,00	8,65	80,00	88,65	7,98	91,00
50,00	8,65	200,00	208,65	10,43	95,00
100,00	8,65	400,00	408,65	14,43	96,50

Fuente: Adaptado del proyecto precursor.

Foto 14. Establecimiento de vetiver para remediación de suelos en el Valle de Lluta.



Fuente: Proyecto precursor.

2.3. Estado de ejecución actual

Actualmente, el ejecutor del proyecto se encuentra desarrollando un segundo proyecto en la misma línea, cuyo objetivo general es validar el Sistema Vetiver en zonas áridas para la recuperación, remediación y protección de suelos agrícolas en la Región de Arica y Parinacota; y sus objetivos específicos son:

- Determinar los niveles de remediación de boro en los suelos del Valle de Lluta y los niveles de nitratos y pesticidas en agua de pozo en el Valle de Azapa.

- Determinar los niveles de recuperación de suelos salinos sódicos en el Valle de Lluta.
- Cuantificar el aumento de fertilidad de los suelos remediados con parámetros físicos, químicos y biológicos.
- Determinar la capacidad del Sistema Vetiver como barrera fluvial y de protección de acuíferos del río Lluta.
- Establecer un piloto con nuevos cultivares en el área remediada.
- Desarrollar un programa de entrenamiento y difusión de la metodología Sistema Vetiver.

El proyecto precursor y su segunda etapa han sido difundidos a agricultores de la región, pero hasta la fecha no se reporta la implementación concreta del sistema en predios productivos. Durante el proyecto precursor se comercializaron algunas plantas de vetiver a agricultores del Oasis de Pica, en la Región de Tarapacá.

El valor del proyecto

La herramienta tecnológica desarrollada por el proyecto permitió realizar una experiencia pionera en Chile y en el mundo sobre remediación de boro en agua de riego y suelos, utilizando el Sistema Vetiver. Los resultados obtenidos demostraron la eficacia del sistema a escala experimental y piloto, aunque de magnitud variable, pero permite sentar las bases para desarrollos tecnológicos posteriores.

Si bien el boro es un elemento de gran importancia productiva en la Región de Arica y Parinacota, especialmente en el Valle de Lluta, se verificaron también buenos resultados en remediación de metales pesados, como plomo y manganeso, y arsénico, elementos altamente tóxicos que alcanzan niveles riesgosos para la salud en algunos cauces de la región. La incorporación de esta tecnología como una herramienta complementaria dentro de un manejo productivo sustentable, puede resultar en beneficios económicos directos para el



productor (aumento de productividad y calidad), así como beneficios indirectos para toda la comunidad (inocuidad alimentaria y optimización del uso del recurso hídrico).

El Sistema Vetiver puede destinarse no solo a la agricultura regional, sino también a cualquier zona agrícola que requiera mejorar la calidad de su agua de riego, ya que ha demostrado en todo el mundo su adaptabilidad a distintos ambientes y versatilidad para reducir diversos tipos de contaminantes. Con ello se abre también la puerta al desarrollo de unidades productoras de plantas de vetiver como opción de negocio, para proveer tanto a la agricultura como a otros sectores industriales (minería, construcción) donde puede cumplir otras funciones en el campo de la bioingeniería.

Anexos

Anexo 1. Taller de Validación

Anexo 2. Bibliografía

ANEXO 1. Taller de Validación

Fecha realización: 30 noviembre 2016

Lugar realización: oficinas Europlant Chile S.A., km 12, Valle de Lluta, Arica

Asistentes

Nombre	Actividad
Patricio Álvarez S.	Profesor Liceo Agrícola Técnico Profesional Padre Francisco Napolitano, Valle de Lluta
Tito Lovera F.	Agricultor, Valle de Lluta y Azapa
Luis González S.	Agricultor, Valle de Lluta
Noemí Córdor Lazo	Profesora Liceo Agrícola Técnico Profesional Padre Francisco Napolitano, Valle de Lluta
Carmen Vergara	Asesora agrícola SAT Indap
Benji Fuentealba	Asesor agrícola SAT Indap
Denisse Bahamondes	Asesora agrícola SAT Indap y comercialización insumos Europlant
Sergio Lara Pulgar	Equipo ejecutor BTA
Juan Maita Maita	Apoyo equipo ejecutor BTA

En la realización de este taller se agradece especialmente la colaboración de la empresa Europlant Chile S.A. por el apoyo en su organización.

ANEXO 2. Bibliografía

Albornoz, F., Torres, A., Tapia M. y E. Acevedo. 2007. "Cultivo de tomate (*Lycopersicon esculentum* Mill.) hidropónico con agua desalinizada y desborificada en el Valle de Lluta". Volumen 25 N°2, pp.73-78. IDESIA (Chile) Mayo - Agosto 2007.

AMBAR. 2000. Desarrollo de la ingeniería básica de tratamiento para la eliminación de boro de las aguas servidas de Arica - Informe Final. Elaborado para CORFO por AMBAR, Consultoría e Ingeniería Ambiental, Empresa del Grupo Arze, Reciné y Asociadas.

ATSDR. 2016. Resúmenes de Salud Pública - Boro (Boron). Agencia para Sustancias Tóxicas y el Registro de Enfermedades - ATSDR. Departamento de Salud y Servicios Humanos. USA. <https://www.atsdr.cdc.gov/es/phs/es_phs26.html>

DGA. 2016. Información Oficial Hidrometeorológica y de Calidad de Aguas en Línea. Dirección General de Aguas, Ministerio de Obras Públicas. <<http://snia.dga.cl/BNAConsultas/reportes>>

FIA. 2009. "Sistema para Reducir la Concentración de Boro en Aguas de Riego, Proyecto de Innovación en la XV Región de Arica y Parinacota. Resultados y Lecciones". Serie Experiencias de Innovación para el Emprendimiento Agrario. Fundación para la Innovación Agraria.

Molina, H. 2014. Oficio N° 18 de fecha 13.03.2014 de la Cámara de Diputados. Informa sobre la posibilidad de disponer un estudio que determine las consecuencias de la presencia de boro en el agua para consumo humano. Ministerio de Salud, Chile.

Núñez, R., Meas, Y., Ortega, R. y E. Olguín. 2004. "Fitorremediación: fundamentos y aplicaciones". Ciencia Vol. 55, N° 3. Julio-septiembre 2004. México.

Torres A. y E. Acevedo. 2008. "El problema de salinidad en los recursos suelo y agua que afectan el riego y cultivos en los valles de Lluta y Azapa en el norte de Chile". IDESIA (Chile) Septiembre - Diciembre 2008. Volumen 26, N° 3, pp.31-44.

Truong, P.N. 2010, Vetiver System Applications – Reference Manual, Vetiver Network International Foundation.

133

