



Fundación para la
Innovación Agraria
MINISTERIO DE AGRICULTURA

RESULTADOS Y LECCIONES EN

Sistema de control de heladas por geotermia, en melones y cerezos

AGRICULTURA SUSTENTABLE



Proyecto de innovación en
Región de O'Higgins





1 5 6



RESULTADOS Y LECCIONES EN

Sistema de control de heladas por geotermia, en melones y cerezos



Proyecto de innovación en
Región de O'Higgins

Valorización a diciembre de 2021



Agradecimientos

En la realización de este trabajo agradecemos sinceramente la colaboración de los profesionales vinculados al proyecto, en especial a Dvora Laio Wulfsohn e Inés Zamora Lagos, de GECO Enterprises Ltda.

Resultados y lecciones en

Sistema de control de heladas por geotermia, en melones y cerezos

Proyecto de innovación en Región de O'Higgins

Serie **Experiencias de innovación para el emprendimiento agrario**
FUNDACIÓN PARA LA INNOVACIÓN AGRARIA

Santiago de Chile, diciembre 2021

Registro de Propiedad Intelectual N° 2022-A-3492

ELABORACIÓN DEL DOCUMENTO

Sergio Lara Pulgar, Médico Veterinario y consultor

REVISIÓN Y EDICIÓN TÉCNICA DEL DOCUMENTO

Gabriela Casanova, Ingeniera Agrónoma, Fundación para la Innovación Agraria

FOTOGRAFÍAS

Archivos FIA, del proyecto precursor y de Guillermo Feuerhake

DISEÑO GRÁFICO Y EDICIÓN DE TEXTOS

Guillermo Feuerhake

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) es la agencia del Ministerio de Agricultura orientada a promover la cultura de la innovación en el sector silvoagropecuario nacional. Para ello, la Fundación apoya con incentivos financieros, información, capacitación y redes para innovar.

Fundamental para que los productores puedan innovar es contar con información relevante para tomar decisiones que les permitan acercarse de manera plausible al éxito de las iniciativas que realicen. Por su parte, los proyectos e iniciativas que se desarrollan bajo el alero de FIA generan resultados que representan un gran caudal de valioso conocimiento para el sector silvoagropecuario nacional e internacional. Como toda innovación, conlleva un riesgo, y tanto los resultados promisorios como aquellos de proyectos que no lograron alcanzar los objetivos esperados son puestos en valor por FIA, ya que ambos constituyen aprendizajes relevantes.

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 **“Geochilly: prototipo de un sistema geotérmico de baja entalpía para el control de heladas en melones y cerezos”**. Este tuvo como objetivo desarrollar un sistema de utilización de energía geotérmica para el control de heladas en huertos de melones y cerezos, contribuyendo a una mayor productividad, rentabilidad y sustentabilidad de las explotaciones.

Espero que la información contenida en este documento sirva como aprendizaje y se transforme en un insumo provechoso, especialmente para productores y empresas que buscan incorporar nuevas tecnologías en sus predios para incrementar la competitividad y sustentabilidad de sus sistemas productivos.

Álvaro Eyzaguirre
Director Ejecutivo FIA

Contenidos

| | |
|--------------------|---|
| Presentación | 5 |
| Introducción | 9 |

| | |
|--|-----------|
| Sección 1. Resultados y lecciones aprendidas | 11 |
| 1. Antecedentes | 11 |
| 1.1 Fundamentos del proyecto | 11 |
| 2. Base conceptual de la tecnología | 19 |
| 2.1 Heladas en la agricultura..... | 19 |
| 2.2 Geotermia como fuente de energía..... | 21 |
| 2.3 Tecnología desarrollada para la protección de cultivos | 24 |
| 3. La innovación tecnológica | 28 |
| 4. El valor de la herramienta desarrollada | 30 |
| 5. Conveniencia económica para el productor..... | 34 |
| 6. Claves de viabilidad..... | 38 |
| 7. Asuntos por resolver | 40 |

| | |
|---|-----------|
| Sección 2. El proyecto precursor | 41 |
| 1. Características generales..... | 41 |
| 2. Validación de la tecnología | 43 |
| 3. La asesoría | 50 |
| 4. Estado de ejecución actual..... | 51 |

| | |
|---|-----------|
| Sección 3. El valor del proyecto | 53 |
|---|-----------|

| | |
|--|----|
| Sección 4. Anexos | |
| 1. Cuadros de análisis económico | 59 |
| 2. Bibliografía consultada | 62 |



Introducción

La presente publicación pone en valor los resultados del proyecto precursor **“GEOCHILLY: prototipo de un sistema geotérmico de baja entalpía para el control de heladas en melones y cerezos”**. La finalidad de esta iniciativa fue implementar un prototipo de sistema de control de heladas en cerezos y melones, usando como fuente energética la geotermia de baja entalpía,¹ logrando desarrollar un modelo matemático para la simulación de condiciones hidrogeológicas a partir de información primaria y secundaria, con el cual puede dimensionarse el flujo de agua subterránea necesario para proteger un cultivo de las heladas más frecuentes, en base a parámetros establecidos para el cultivo y sin afectar la sustentabilidad del recurso hídrico.

El proyecto fue ejecutado entre los años 2017 y 2020 por la empresa Geco Enterprises Ltda., ubicada en San Fernando en la Región de O’Higgins, realizándose las pruebas piloto en predios de la misma región.

Este 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 ejecutado. 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, así como también conocer las claves de viabilidad y los temas que aún se encuentran pendientes de resolución.

La segunda sección consiste en la descripción del **“Proyecto precursor”**,² donde se resumen los resultados del proyecto realizado con el apoyo de FIA y se ilustran las experiencias que condujeron a la validación y sistematización de la herramienta tecnológica evaluada, junto con la descripción del entorno, metodologías y aplicaciones prácticas que se llevaron a cabo.

¹ La entalpía sirve para medir con exactitud las variaciones de energía que se producen en un sistema, bien sea al momento de tomar o liberar energía al ambiente. Es la cantidad de calor que un sistema termodinámico libera o absorbe del entorno que lo rodea cuando está a una presión constante, entendiendo por sistema termodinámico cualquier objeto. En física y química, la entalpía es una magnitud termodinámica cuya unidad de medida es el Joule (J).

² **“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.

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**”,³ aporte a los interesados elementos clave respecto de los beneficios del uso o incorporación de nuevos servicios y herramientas tecnológicas desarrolladas.

³ “**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

1.1. Fundamentos del proyecto

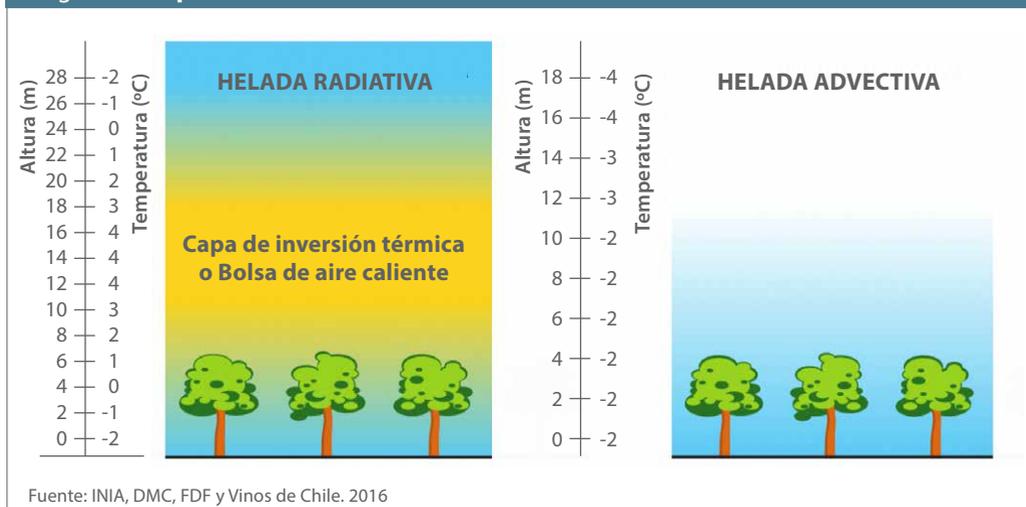
Las heladas constituyen uno de los problemas de mayor incidencia e impacto económico en la agricultura, a nivel mundial. En términos prácticos, para la agrometeorología una helada se define como la ocurrencia de temperaturas del aire bajo cero grados Celsius (INIA y otros, 2016). Técnicamente, la palabra “helada” se refiere a la formación de cristales de hielo sobre las superficies, tanto por congelación del rocío como por un cambio de fase de vapor de agua a hielo (Snyder y de Melo-Abreu, 2010).



De acuerdo con la forma en que se generan las heladas, se puede señalar que existen dos tipos:

- Heladas radiativas:** se relacionan con una pérdida nocturna intensa del calor acumulado en el suelo durante el día, provocando un enfriamiento de las capas bajas de la atmósfera próxima a la superficie. Esto ocurre en condiciones de cielo nocturno despejado, sin viento y aire con baja humedad. Este enfriamiento da origen a una capa de inversión térmica en la cual, a determinada altura dependiendo de la topografía local y de las condiciones meteorológicas, se encuentra el punto divisorio entre aire frío y aire caliente, generalmente entre 9 y 60 metros. En Chile este tipo de heladas predomina a fines de otoño, durante el invierno y a comienzos de la primavera. Se caracteriza por cubrir con hielo la superficie del follaje, por lo cual se las denomina también "heladas blancas".
- Heladas advectivas:** menos frecuentes, pero más dañinas que las heladas radiativas, ocurren por desplazamiento de masas de aire frío provenientes desde el sur, cubriendo áreas extensas de territorio. Son condiciones más persistentes, pudiendo extenderse por varias horas en la noche y parte de la mañana, o por varias noches seguidas. Estas heladas, asociadas con aire más seco y frío, se presentan ocasionalmente pero por sus características generan grandes daños en las plantas.

Figura 1. Esquema de formación de heladas



El efecto de las heladas sobre los cultivos depende, entre otros factores, de la especie y del estado fenológico en que se encuentre, siendo más sensibles las etapas desde botón floral hasta fruto pequeño. Por ello, es necesario planificar cuidadosamente las etapas de un cultivo para reducir el riesgo de exponer las plantas a eventuales heladas cuando se encuentran en sus estadios más susceptibles.



Helada en frutales. Fuente: INIA, Boletín 417. Osorno, 2020.

El daño por helada se produce cuando se forma hielo dentro del tejido de las plantas, afectando sus células. El efecto directo de la helada ocurre cuando se forman cristales de hielo dentro del protoplasma de las células (congelación o helada intracelular), mientras que el daño indirecto puede ocurrir cuando se forma hielo dentro de las plantas, pero fuera de las células (congelación o helada extracelular). Los daños por heladas pueden tener un efecto drástico para la planta entera o pueden afectar únicamente a una pequeña parte del tejido de la planta, lo cual reduce el rendimiento o afecta la calidad del producto.

Se llama “temperatura crítica” a aquella que comienza a generar determinados niveles de daño, lo cual depende de factores tales como el estado de desarrollo de los tejidos, especie, variedad, edad de la planta, ubicación en el predio y tiempo de exposición a la condición de helada. Por ejemplo, en vides una temperatura de 0 °C es crítica cuando la planta se encuentra desde inicio de floración a fruto pequeño; pero si la helada ocurre antes, cuando la planta se encuentra en brotación, la temperatura crítica fluctúa entre -2 y -4 °C. En el caso del ciruelo, en cambio, la temperatura crítica puede alcanzar a -2,5 °C cuando la planta se encuentra en inicio de brotación y hasta -6 °C cuando se encuentra en etapa de puntas verdes.

La ubicación geográfica juega un rol importante en la propensión a las heladas. Algunas macrozonas poseen un alto potencial para la ocurrencia de heladas por lo cual es necesario, en primer lugar, considerar el tipo de cultivo, especie y variedad factibles en esas zonas y, posteriormente, contar con buenos sistemas de pronóstico que permitan tomar las medidas de prevención, control o mitigación de los daños.

Incluso dentro de un mismo predio pueden existir diferencias en la susceptibilidad a heladas, por la topografía local. Los efectos dañinos de las heladas son mayores en sectores bajos, debido a la mayor densidad del aire frío que tiende a desplazarse y rellenar esos espacios. Por lo tanto, cultivos ubicados en esas condiciones están mayormente propensos a recibir daños por heladas.

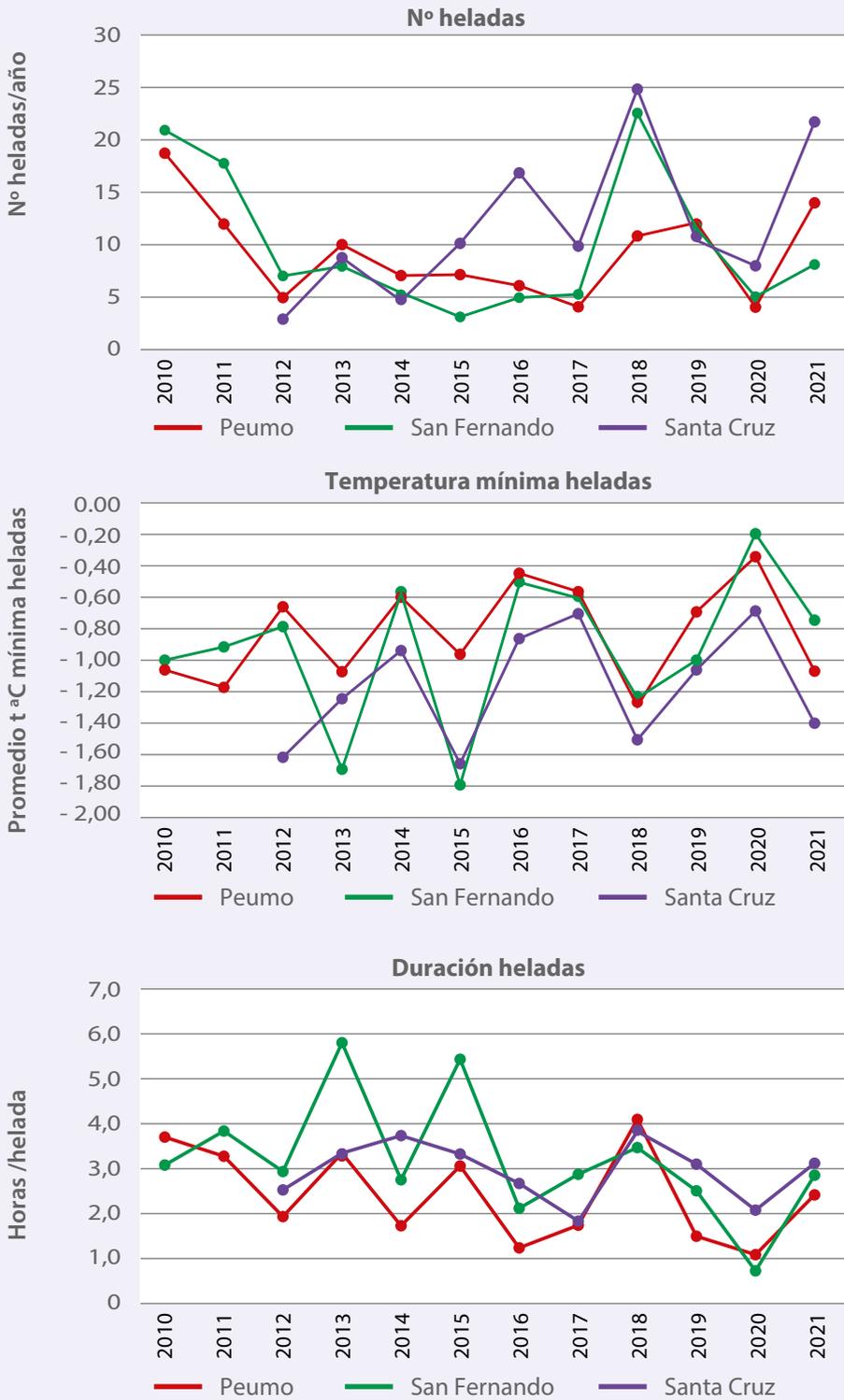
Gracias a la extensa red de estaciones meteorológicas existentes actualmente, es posible analizar el comportamiento histórico del fenómeno de las heladas, su distribución geográfica, periodo de ocurrencia e intensidad, entre otros factores. Las heladas, a lo largo de nuestro país, se presentan aumentando su frecuencia a medida que se avanza de norte a sur, por lo cual el periodo libre de heladas va disminuyendo hacia el sur, con fechas de última helada más tardías en primavera y fechas de primera helada más tempranas en otoño, lo que se transforma en una limitante para la diversidad de cultivos.

En la zona central (Valparaíso a O'Higgins), golpeada fuertemente por la sequía que ha afectado al país durante la última década, los eventos de helada no son inusuales durante el invierno en los sectores interiores, aunque sí lo son en la costa. Las tendencias generales indican que el promedio de días con helada en la zona central casi no ha variado en los últimos 50 años (Bravo, Quintana y Reyes, 2020).

La ocurrencia de días con heladas para la zona central se presenta entre abril y octubre de cada año, siendo la mayor frecuencia, en torno a las 10 heladas, entre la última semana de julio y comienzo de agosto de cada año. A partir de inicios de abril y hasta fines de julio se observa un incremento gradual en la ocurrencia de heladas, alcanzando un máximo de 10 a 12 heladas. Posteriormente, se observa un descenso rápido en su ocurrencia, desapareciendo a comienzos de octubre. Entre noviembre y marzo de cada año, la presencia de heladas es nula (Bravo, Quintana y Reyes, 2020).

La Región de O'Higgins, donde se realizó el proyecto precursor, no se encuentra libre del riesgo de heladas, con graves consecuencias económicas y laborales para su actividad agrícola, con fuerte presencia de fruticultura de exportación, vides y hortalizas. Como antecedente, debido a los enormes daños productivos que ocasionaron las intensas heladas del año 2013, el Ministerio de Agricultura decretó emergencia agrícola en la totalidad de las comunas de la región, destinando \$2.000 millones en ayuda de no usuarios de INDAP. Por su parte, INDAP entregó apoyo a usuarios de 342.200 hectáreas de distintos cultivos en la región.

Figura 2. Registro de heladas en tres estaciones meteorológicas, Región de O'Higgins

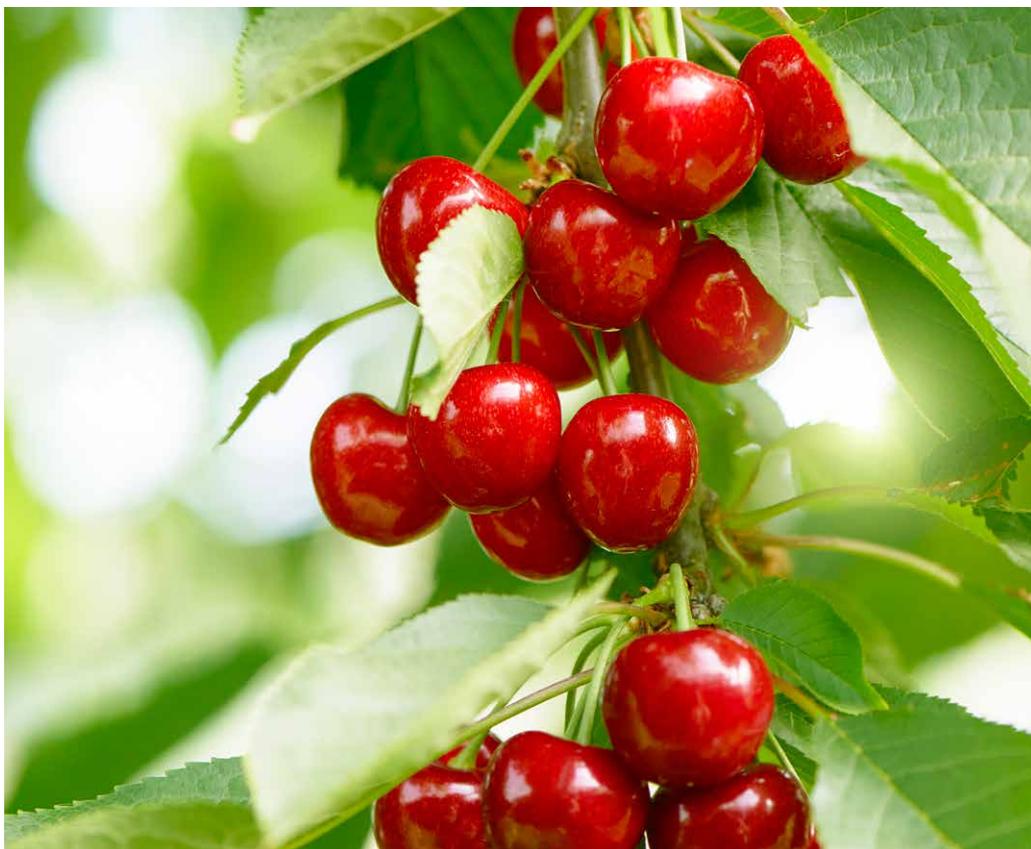


Fuente: INIA, DMC, FDF y Vinos de Chile.

Se escogieron como modelo para la implementación del sistema de control de heladas dos especies, el melón y el cerezo, dadas sus condiciones de sensibilidad a las heladas y de rentabilidad para sostener la inversión. El melón es sensible a las heladas a lo largo de todo el proceso productivo, con una temperatura crítica de $-1,0$ a 0°C , mientras que el cerezo es especialmente sensible en época de cuaja del fruto, con temperatura crítica de $-1,0$ a $-1,1^{\circ}\text{C}$.

De acuerdo con el Catastro Frutícola 2021, el cerezo es la especie frutícola con mayor superficie cultivada en la Región de O'Higgins, con 22.966 ha, que equivale al 24% de la superficie frutícola regional y al 47% de la superficie estimada del cerezo a nivel nacional. También es la especie con mayor crecimiento desde el Catastro de 2018, con un 68% de alza en superficie y 45% en número de explotaciones. Hay 13.374,2 hectáreas que se encuentran en producción, cuya cosecha se destina en un 90% a la exportación. El rendimiento promedio es de 9,9 t/ha, con una densidad promedio de 1.033 plantas/ha. Las variedades predominantes son Lapins y Santina.

La temporada 2020-2021 finalizó con 352.783 toneladas exportadas de cerezas, un 54,3% superior a la campaña anterior. Los embarques se orientaron principalmente hacia el Lejano Oriente, que representó el 94,9% del total de fruta exportada, con China en el primer lugar con 321.505 toneladas. Más atrás le siguen EE. UU. (1,8%), Latinoamérica (1,5%) y Europa (1,3%).





Fotos proyecto precursor.

Por su parte, de acuerdo con la Encuesta Hortícola 2020, el melón en la Región de O'Higgins ocupa 1.588,9 hectáreas de superficie plantada, lo que representa un 48% de la superficie nacional de melón y 14% de la superficie regional de hortalizas. El área cultivada creció un 4,9% respecto de la encuesta de 2019. Se concentra en las comunas de Quinta de Tilcoco, San Vicente de Tagua Tagua, Pichidegua y Las Cabras, donde se dan condiciones de clima y suelo ideales para producir fruta de buena calidad. En el cultivo del melón se utiliza el sistema de túneles o micro túneles, estructuras semicilíndricas recubiertas por una película de polietileno que sirve de abrigo, con el objeto de elevar la temperatura al interior del túnel, con lo que se obtiene mayor precocidad y aumento de los rendimientos del cultivo. A esta cubierta también se suele agregar una malla térmica de filamentos de polipropileno, permeable al agua y aire, que además protege a las plantas de daños por la acción del viento, lluvias fuertes, granizo y parásitos (Abarca, 2017).

El melón está orientado al mercado interno, siendo muy incipientes las experiencias de exportación. De los 6,7 millones de unidades que se comercializaron el año 2020 en los mercados mayoristas del país, 4,5 millones provinieron de la Región de O'Higgins, representando el 67% del total. En términos de valor, se transaron \$3.616 millones, de los cuales \$2.238 corresponden al melón de O'Higgins. El principal mercado del melón regional es el Mercado Mayorista Lo Valledor, en Santiago, que concentró el 86% del volumen total.

Cuadro 1. Comercialización de melón de la Región de O'Higgins en mercados mayoristas (año 2020)

| Mercado | Unidades | Valor (\$) | Valor Unitario (\$/unidad) |
|---|------------------|----------------------|----------------------------|
| Mercado Mayorista Lo Valledor, Santiago | 3.851.768 | 1.760.437.495 | 457 |
| Vega Central Mapocho, Santiago | 151.150 | 88.086.125 | 583 |
| Vega Modelo, Temuco | 136.500 | 114.096.631 | 836 |
| Terminal La Palmera, La Serena | 83.760 | 58.823.946 | 702 |
| Feria Lagunitas, Puerto Montt | 76.990 | 85.319.325 | 1.108 |
| Femacal, La Calera | 73.010 | 49.431.508 | 677 |
| Vega Monumental, Concepción | 61.070 | 32.439.071 | 531 |
| Mapocho venta directa, Santiago | 39.340 | 30.269.325 | 769 |
| Terminal Hortofrutícola Agro Chillán | 31.350 | 19.955.040 | 637 |
| TOTAL GENERAL | 4.504.938 | 2.238.858.468 | 497 |

Fuente: elaboración propia en base a reporte precios mayoristas ODEPA.

El 67 % del melón de la Región de O'Higgins transado en los mercados mayoristas es de la variedad "tuna", todo el resto es tipo "calameño". En cuanto a la calidad, el 70% corresponde a las categorías Extra, Súper o Primera.

Mapa de ubicación del predio de don José Carreño, ubicado en sector Los Romos, comuna de Pichidegua, provincia de Cachapoal, en la VI Región del Libertador General Bernardo O'Higgins. Latitud: 33°20'21.93" S, Longitud: 71°20'35.17" O (Google Earth, 2019).



► 2. Base conceptual de la tecnología

2.1. Heladas en la agricultura

Para reducir el impacto de las heladas existen diversas técnicas, cuyo éxito dependerá de su correcta y oportuna aplicación. Los métodos de control de heladas pueden clasificarse en sistemas de control pasivos y sistemas de control activos, que se explican brevemente a continuación.

Sistemas de control pasivos: prácticas de tipo preventivo que se establecen antes que ocurran las heladas. Generalmente son de menor costo que los métodos activos y en varios casos sus beneficios son suficientes para evitar utilizar sistemas de protección activa.

- **Selección del sitio, especie y variedades:** relevante en el establecimiento de plantaciones en nuevas zonas y frente a nuevas condiciones de variabilidad climática. Se trata de seleccionar sitios con baja ocurrencia de heladas, nivelar o evitar zonas bajas, y analizar características de conducción y capacidad de almacenamiento de calor de los suelos, entre otras.
- **Uso de barreras al movimiento del aire:** instalación de cortinas o setos de árboles para desviar los cursos de aire frío que puedan afectar a los cultivos.
- **Mojamiento del suelo:** un suelo con bajo contenido de humedad posee gran parte de sus poros ocupados con aire, elemento de baja capacidad calórica y que se enfría rápidamente. Por lo tanto, previo a probables heladas, es recomendable mantener el suelo con alta humedad.
- **Eliminar la cobertura vegetal:** la cubierta vegetal entre hileras presenta una menor capacidad de acumulación y transferencia de calor hacia el suelo, con un mayor efecto perjudicial de la helada.
- **Evitar la remoción del suelo entre hileras:** el suelo removido o rastreado almacena aire frío entre los terrenos, por lo cual en época de heladas se recomienda tener el suelo lo menos intervenido posible.
- **Uso de cubiertas sobre las plantas:** la cubierta plástica reduce la pérdida de calor desde el suelo al aire, elevando la temperatura.
- **Aplicación de sustancias protectoras de la planta:** existen productos que pueden generar mayor resistencia en las plantas o bien forman una cubierta sobre ella, reduciendo su tasa de enfriamiento.

- **Control de las bacterias nucleadoras de hielo (INA):** existen algunas bacterias que activan la formación de núcleos de hielo en hojas y flores, por lo cual deben ser atacadas mediante compuestos de cobre u otros productos de acción bactericida.

Sistemas de control activos: tienen por objetivo aportar calor al cultivo, para evitar que la temperatura caiga bajo el umbral de daño a los tejidos u órganos sensibles de las plantas.

- **Riego por aspersión en follaje:** el agua tiene la capacidad de entregar calor cuando se enfría, elevando la temperatura de las plantas y del ambiente inmediato. Es un método eficaz para heladas advectivas y radiativas, que requiere aplicar agua de riego mientras dura la helada. Puede generar altos consumos de agua y desarrollo de fungosis por el alto nivel de humedad. Aplicable a cultivos cubiertos.
- **Uso de calefactores:** se basa en entregar calor al aire para nivelar la pérdida de energía, de modo que la temperatura del aire no caiga a niveles que puedan causar daño a las plantas. Los equipos más comunes son aquellos que calientan el aire con fuego abierto, ya sea por quemadores o sistemas similares; generalmente son poco eficientes porque la mayor parte del calor sube rápidamente y se pierde. Por ello se requieren en gran número, con alto costo en combustible.
- **Torres de ventilación:** impulsan masas de aire desde la zona de inversión térmica, en las heladas radiativas, para mezclar el aire caliente que ha subido desde el suelo, con el aire frío cercano a las plantas. Pueden ser muy eficientes, pero tienen alto costo inicial. Pueden combinarse con calefactores para proteger de heladas advectivas.
- **Uso de helicópteros:** mismo principio anterior, ya que impulsa el aire con sus aspas y agrega calor por su turbina. Tiene un costo muy elevado.

Combinaciones de métodos activos:

- **Ventiladores y aspersores por debajo de la planta:** el agua congelada en el suelo libera calor latente y calienta el aire cerca de la superficie, el que es transferido a través del cultivo por ventiladores. Este método aumenta el beneficio de utilizar cualquiera de los dos métodos por separado.
- **Ventiladores y calefactores:** su combinación mejora la protección de cada método por sí solo.

Cuadro 2. Aptitud de los distintos métodos de control según tipo de helada

| Sistema | Aptitud para helada radiativa | Aptitud para helada advectiva |
|---|-------------------------------|-------------------------------|
| Sistemas pasivos | | |
| Selección del sitio de plantación | ● | X |
| Mojamiento del suelo | ● | X |
| Eliminar cobertura vegetal | ● | X |
| Evitar remoción del suelo | ● | X |
| Uso de cubiertas | ● | ● |
| Sistemas activos | | |
| Riego mojando el follaje | ● | ● |
| Calefactores | ● | X |
| Torres de ventilación | ● | X |
| Torres de ventilación con emisores de calor | ● | ● |

Fuente: INIA, DMC, FDF y Vinos de Chile.

Los calefactores utilizan distintos tipos de combustible, como biomasa, diesel o gas propano, con las consiguientes emisiones de gases con efecto invernadero. Los combustibles sólidos son más eficientes en calentar el ambiente alrededor de las plantas, especialmente bajo condiciones de viento. La principal desventaja de los combustibles sólidos es que la energía liberada disminuye conforme se va consumiendo el combustible, y por ello la energía que se libera se ve limitada cuando más se necesita. Otro inconveniente es que los combustibles sólidos son más difíciles de encender, y por ello debe iniciarse el encendido más pronto. También son difíciles de apagar, con lo que se desperdicia más combustible. Los ventiladores, por su parte, pueden funcionar con combustibles líquidos o con energía eléctrica, su funcionamiento es más limpio, pero generan ruido que puede ser molesto para las poblaciones cercanas.

En este contexto, la tecnología desarrollada y adaptada en el proyecto precursor se basa en el uso de la energía geotérmica, limpia y no contaminante, para transmitir calor a los cultivos mediante la circulación de agua proveniente del subsuelo.

2.2. Geotermia como fuente de energía

La energía geotérmica es un recurso limpio, estable, sostenible y renovable, que proporciona energía utilizando el calor derivado de la tierra. Los elementos radiactivos dentro de la tierra liberan calor a temperaturas muy altas, que aumentan según la distancia a la superficie terrestre. Se estima que la temperatura del núcleo de la Tierra es de unos 5.000 °C y la del núcleo exterior de unos 4.000 °C, una temperatura similar a la de la superficie del sol.

La actividad geotérmica se concentra en el llamado “cinturón de fuego” del Océano Pacífico, donde se incluye nuestra región andina. Se espera que el flujo constante de energía térmica desde el interior de la tierra, equivalente a un estimado de 42 millones de megavatios (MW) de potencia, continúe durante miles de millones de años (Van Nguyen *et al*, 2015).

Las cifras sobre potencial geotérmico que se manejan hoy en Chile van desde los 3.350 MW hasta los 16.000 MW, lo que podría representar un 91 % de la capacidad instalada actual de la matriz energética del país. Sin embargo, dentro de todas las Energías Renovables No Convencionales (ERNC) posibles de desarrollar en el país, la geotermia es la menos conocida, la más ignorada y la con mayor potencial (CEGA).

Estudios geológicos en la zona norte y sur del país han permitido una evaluación preliminar del potencial geotérmico de Chile en aproximadamente 16.000 MW, durante al menos 50 años de fluidos geotérmicos con temperaturas sobre 150 °C, localizados a menos de 3.000 metros bajo tierra. Solo en los últimos años han surgido algunas iniciativas institucionales, empresariales y particulares para explotar las decenas de usos que provee la geotermia.



Uso de energía geotérmica en invernaderos. Fuente: FIA, proyecto PYT-2011-0116.

Los esfuerzos en nuestro país se han focalizado en la prospección de los recursos existentes para cifrar el potencial técnicamente explotable para la generación de electricidad. El Ministerio de Energía convocó a una instancia público-privada, denominada Mesa de Geotermia, cuyo objetivo es el análisis de proyectos geotérmicos para la generación de electricidad en reservorios de alta entalpía, excluyéndose el desarrollo de geotermia de baja entalpía. El Servicio Nacional de Geología y Minería (SERNAGEOMIN) es el encargado de realizar la exploración y estudio de potencial geotérmico del país, ya sea de alta o baja entalpía.

Por geotermia de baja o muy baja entalpía se entiende el estudio, ocurrencia y explotación del calor de baja temperatura, menor a 30°C, que se encuentra normalmente en el subsuelo a relativamente baja profundidad, típicamente menor a 200 metros. En este caso puede existir un componente de la energía geotérmica genuina proveniente del calor de profundidades de la tierra, pero también proviene de la energía solar que ha sido absorbida y almacenada en el subsuelo. La superficie de la Tierra recibe del sol cada segundo, en forma de calor, 2×10^{17} Joule, que es cuatro órdenes de magnitud superior al calor geotérmico, por lo tanto al utilizar esta fuente se está aprovechando el subsuelo y acuíferos como un gran colector solar (Seisdedos, 2012).

La energía geotérmica es uno de los recursos energéticos más importantes para la generación de electricidad y también se utiliza directamente en la calefacción, la alimentación, la agricultura, la acuicultura y algunos procesos industriales.

El sector agrícola es un gran consumidor de energía y emisor de gases de efecto invernadero, que tiene como desafío ser más sostenible, competitivo y garantizar la seguridad alimentaria. Gran parte de la energía utilizada por la industria es para generar calor de nivel bajo y medio (menos de 200°C) en muchas etapas tanto de producción como de tratamiento. El reemplazo de combustibles fósiles por energía geotérmica es una solución viable para estos procesos, con estabilidad y bajo costo (Van Nguyen *et al*, 2015).

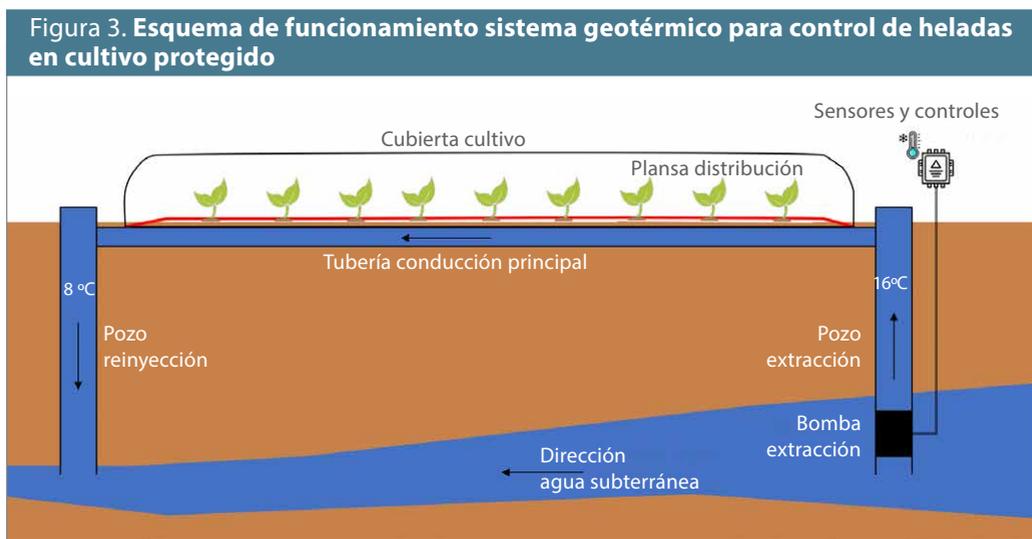
Actualmente, en distintos lugares del mundo, se utiliza energía geotérmica en los siguientes procesos agrícolas y agroindustriales:

- Calefacción de invernaderos: son uno de los mayores consumidores de energía de baja entalpía del mundo. La energía geotérmica reduce los costos de energía en un 80% y los costos operativos en un 5-8%.
- Secado de alimentos.
- Riego con agua temperada para evitar estrés por frío.
- Calefacción de campo abierto, para aumentar la temperatura del sistema de raíces y acelerar el desarrollo de los cultivos.
- Calefacción de estanques acuícolas.

La utilización de la energía geotérmica puede realizarse de forma indirecta, a través de la generación eléctrica, o de forma directa, es decir, transfiriendo el calor de las aguas subterráneas a un sistema de calefacción en la superficie. Es en este último modelo que se inserta la tecnología desarrollada por el proyecto, extrayendo los recursos hidrotermales del subsuelo para calefaccionar en forma directa a cultivos protegidos.

2.3. Tecnología desarrollada para la protección de cultivos

El sistema denominado **Geochilly** es un método activo para el control de heladas, que consiste en la calefacción del suelo y aire que rodea a las plantas de un cultivo protegido, mediante la circulación de agua extraída directamente del subsuelo y que se encuentra a una temperatura estable a lo largo del año, superior a la temperatura ambiente asociada a heladas.



Fuente: proyecto precursor.

El agua tibia es extraída del subsuelo mediante una bomba, que la hace circular a través de una red de tuberías distribuidas por todo el cultivo, irradiando calor al suelo y al ambiente donde se encuentran las plantas. De este modo el agua va perdiendo temperatura en su recorrido, siendo finalmente conducida a un sitio de descarga para volver al acuífero de donde provino. Así, el consumo real de agua es casi nulo, asegurando la sustentabilidad del recurso hídrico. Alternativamente, puede ser conducida al sistema de riego convencional del cultivo.

Los resultados del piloto de melón mostraron que se logró subir en 2 a 4°C la temperatura bajo los túneles durante los periodos de baja temperatura de 0°C a -1,5°C, con duraciones de 3 horas. Proyectando esos resultados, la temperatura y caudal disponibles en el ensayo serían capaces de proteger 0,5 ha de cultivo durante una helada típica de -2°C de 6 horas, o

contra una helada más fría durante un periodo más corto. Dado que el agua va perdiendo calor en su recorrido por las tuberías, existe una ligera variación de temperatura a lo largo del túnel, pero al estar cubierto la temperatura tiende a homogenizarse.

La reinyección del agua debe ser realizada “aguas abajo” del punto de extracción, para no bajar la temperatura de la napa, para lo cual se requiere conocer la dinámica del agua subterránea. El punto de descarga puede ser un pozo, de existencia previa o construido expreso, o bien en zanjas de infiltración superficial si la permeabilidad del terreno y las características químicas del agua lo permiten.



Tubería recubierta para conducción de agua temperada desde pozo. Fuente: proyecto precursor.



Tuberías de conducción de agua temperada en cada hilera. Fuente: proyecto precursor.

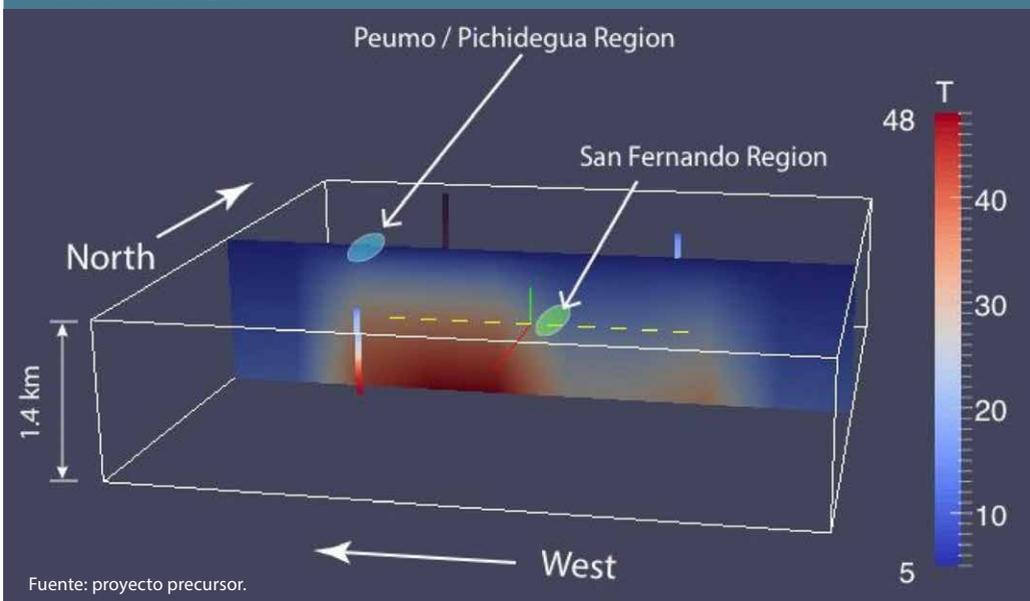
El sistema cuenta con sensores de temperatura ambiental, humedad y pluviómetro, para alertar sobre la amenaza de una helada, de acuerdo con parámetros previamente configurados según el cultivo. Al alcanzarse la temperatura definida como crítica, se activa la bomba que hace circular el agua, y cuando la temperatura asciende a valores seguros para el cultivo la extracción de agua se detiene. Esto permite también optimizar el consumo de energía eléctrica.

Dado que la temperatura del agua subterránea es bastante estable a lo largo del año, a diferencia de la temperatura ambiental, es factible utilizar el sistema para calefaccionar el cultivo en invierno y para enfriarlo en verano, en caso de ser necesario. Ambos casos tienen efectos positivos directos sobre la productividad de los cultivos.

La implementación del sistema, simple en sus aspectos operativos, requiere una serie de estudios y modelamientos previos. A continuación, se describen las etapas del proceso de diseño e implementación.

- **Determinación del requerimiento de calor para control de heladas:** basándose en la literatura y en el conocimiento de los cultivos en análisis, se debe estimar la pérdida de calor que sufrirían los cultivos ante una helada típica y que provocarían daño en la planta, y a partir de ello cuál sería el requerimiento de calor que debe ser inyectado al cultivo para evitar el daño. Para esto deben analizarse el comportamiento de las heladas (tipo, temperatura, duración), la temperatura crítica de cada cultivo según estado fenológico y las condiciones locales donde se desarrollan los cultivos.
- **Exploración y análisis hidrogeológico en sitios de interés:** a partir de la información disponible en las diversas instituciones (SERNAGEOMIN, DGA u otras), se debe analizar la geofísica e hidrogeología de las zonas de estudio, incluyendo el volumen, composición química y temperatura de aguas subterráneas y pozos. Esta etapa es clave, pues si no hay información disponible y de calidad sobre los sectores de interés, deberán realizarse más prospecciones y análisis en terreno, lo que encarece el proyecto. De cualquier modo, es necesario analizar el perfil geofísico del terreno, características de los suelos (textura, porosidad, densidad, capacidad de retención de agua), profundidad y temperatura de agua subterránea, y pruebas de bombeo de pozos existentes, entre otros. Toda esta información es muy relevante ya que, en general, la factibilidad de uso de la energía geotérmica es altamente sitio específica. Existen software especializados con los cuales pueden realizarse modelamientos matemáticos para estimar la disponibilidad y factibilidad de uso de estos recursos.

Figura 4. Modelamiento de profundidad y temperatura de agua subterránea en sitios analizados



- **Obtención de parámetros principales de diseño:** en base a los requerimientos para el cultivo y el análisis geofísico e hidrogeológico del sector, se define cuál sería la ubicación



óptima de los pozos de extracción y reinyección, su profundidad y el caudal de agua que puede extraerse para obtener el calor necesario para una determinada superficie de cultivo sin afectar la recarga del acuífero. Todo ello se sintetiza en un modelo matemático alimentado por toda la información recabada en las etapas previas. En caso de que ya existan pozos en el sector, el análisis permite estimar su capacidad para aportar calor a la superficie de cultivo propuesta o si esta debe ser ajustada según las condiciones reales de energía disponible.

- **Instalación del sistema:** incluye la perforación de el o los pozos, cuando sean necesarios, instalar bomba de extracción y sistema de conducción del agua. Para las tuberías principales de distribución se utilizan las redes de riego existentes, con aislación térmica, agregando el sistema adicional para distribuir el agua temperada entre las plantas, con diseño variable según las características del cultivo. En el caso del cultivo de melón donde fue validado el prototipo, se utiliza una red de tuberías de polietileno (Plansa) a ras de suelo bajo los túneles y sobre el mulch. Para árboles, como el cerezo, la tubería debería ir suspendida en altura para irradiar calor al ambiente. Adicionalmente deben agregarse los dispositivos electrónicos para la captura de variables ambientales (temperatura, humedad, lluvia, viento) y del agua circulante (presión, temperatura del pozo, temperatura del agua de entrada y de salida al sistema), *dataloggers* para el registro de los datos, y activador para encendido y apagado de la bomba de acuerdo con la configuración requerida.
- **Operación del sistema:** una vez puesto en marcha, el sistema debe ser monitoreado para verificar su correcta activación, analizando el funcionamiento de la red de distribución y la temperatura del agua para corregir eventuales pérdidas de presión o calor.

► 3. La innovación tecnológica

El uso de la energía geotérmica a nivel mundial se encuentra todavía muy por debajo de su potencial. El país líder en esta materia es Islandia, que obtiene la mayor parte de su electricidad y calefacción de fuentes geotérmicas. Sus aplicaciones en la agricultura se han basado en el secado de alimentos y en la calefacción de invernaderos o de cultivos al aire libre. Para fines de calefacción, frecuentemente se utilizan bombas de calor, equipos de ciclo cerrado que ocupan un gas portador de calor que, sometido a presiones variables, es capaz de transportar calor de un compartimento a otro. Este tipo de sistema también se ha implementado en algunos proyectos puntuales en nuestro país, para calefaccionar invernaderos, oficinas e instalaciones de agroindustrias.

La innovación desarrollada en el proyecto precursor se asocia al uso de geotermia de baja entalpía de sistema abierto, sin bomba de calor, donde el agua subterránea transmite calor en forma directa al pasar entre las plantas. Con un bajísimo gasto energético (solo por funcionamiento de la bomba que impulsa el agua), y un casi nulo consumo de agua (ya que esta es devuelta al subsuelo), se consigue elevar la temperatura en la medida suficiente para proteger de una helada típica.

Este método supone su combinación con un método pasivo, como es la cobertura del cultivo para evitar la fuga de calor, siendo validado específicamente en micro túneles, donde el volumen a temperar es muy bajo. La estructura de micro túneles se aplica principalmente en hortalizas de hoja, frutillas, melón y sandía, con el fin de proteger del frío y aumentar el rendimiento. Su utilización se ha ido difundiendo en la zona centro sur y también en el extremo austral (Aysén y Magallanes), para proteger los cultivos de las inclemencias del tiempo de una forma más económica que los invernaderos tradicionales.

Cuadro 3. Superficie de algunas hortalizas cultivables en microtúneles desde O'Higgins a la Araucanía (2020)

| Especie | Superficie (ha) |
|----------|-----------------|
| Acelga | 185 |
| Espinaca | 66 |
| Frutilla | 1.272 |
| Lechuga | 1.074 |
| Melón | 2.213 |
| Repollo | 754 |
| Sandía | 2.580 |
| Zapallo | 2.663 |

Fuente: ODEPA – Berries del Biobío.

Considerando que la horticultura es realizada por muchos pequeños y medianos productores, contar con herramientas para evitar o reducir el daño por heladas significa un gran aporte productivo y económico para el sector.

Para cultivos con otra morfología, como el ensayo en cerezos bajo cubierta realizado en el proyecto, el diseño del sistema cambia y debe adaptarse para alcanzar la temperatura necesaria, evitando fugas de calor.

El sistema Geochilly presenta las siguientes ventajas en comparación con los otros métodos activos de control de heladas:

- Calefactores: la geotermia no consume ningún tipo de combustible fósil o biomasa, por lo cual es mucho más económico en el consumo de energía, no contamina, no produce gases de efecto invernadero ni aumenta la huella de carbono del cultivo. Además, los calefactores no están diseñados para su aplicación en micro túneles.
- Ventiladores: la geotermia es mucho más económica en el consumo de energía, es mucho más silenciosa y no interviene en el paisaje. Tampoco los ventiladores están diseñados para su uso en estructuras cubiertas.
- Riego con agua precalentada: este sistema sí es factible de implementar en micro túneles, pero consume combustible y utiliza un gran volumen de agua que puede exceder la demanda de riego del cultivo, provocando exceso de humedad y desarrollo de fungosis.

La mayor desventaja de la geotermia, en relación con los otros métodos activos, es el alto costo de inversión en los estudios previos y en la perforación de pozos, cuando estos no se encuentran disponibles. En tales casos, se justificaría en cultivos de alta rentabilidad. Ahora bien, si se dispone de información hidrogeológica de la zona y existen pozos de agua para riego que puedan ser usados para geotermia, el sistema reduce drásticamente su costo, siendo accesible para todo tipo de productores.

Dado que para el proyecto no se contaba con información hidrogeológica de base, fue necesario levantar muchos antecedentes y realizar un modelamiento matemático avanzado para estimar el flujo y temperatura del agua que podía ser extraída de forma sustentable, y, por ende, determinar la superficie de cultivo que podía ser manejada con el sistema. Por lo tanto, para realizar un nuevo proyecto en un sector cercano al estudiado, ya habría un avance de metodología y conocimiento que facilitarían su implementación.

Los estudios hidrogeológicos previos requieren de especialistas en geotermia, que en Chile aún son escasos, mientras que para el diseño del sistema se requieren conocimientos agronómicos relativos a la hidráulica de la conducción del agua y de la electrónica para el control. La operación en sí misma es muy sencilla y puede ser realizada por los propios agricultores una vez capacitados.

► 4. El valor de la herramienta desarrollada

En términos generales, la geotermia es considerada una energía renovable limpia y poco contaminante. Estimaciones del año 2009, citadas por Kurpaska *et al*, indican que al duplicar la explotación de los reservorios geotérmicos se podría eliminar más de mil millones de toneladas de emisiones de CO₂ para el 2050. Estas proyecciones asumen aumentos en la participación de la energía geotérmica al 3 % en electricidad y al 5 % en calor del consumo mundial de energía.

Puesto que no existe ningún tipo de combustión no hay emisiones atmosféricas, por lo cual el cultivo no aumenta su huella de carbono. La utilización de una fuente de energía renovable permite una mayor independencia frente a las alzas de precios de los combustibles usados en sistemas de calefacción tradicionales.

Al no utilizar ventiladores el sistema es silencioso, por lo que se eliminan molestias y potenciales conflictos con poblados cercanos. El costo de operación y mantención es muy bajo, y sus componentes principales son sencillos y accesibles para cualquier agricultor (bomba y tuberías, entre otros).

Los componentes de mayor valor son los sensores y *datalogger*, que se recomienda estén ubicados en una caseta, protegidos del deterioro ambiental y la intervención de terceros.

En cuanto al impacto de las heladas sobre la agricultura, las pérdidas promedio que ocasiona este fenómeno en Chile se estiman en 3 a 7 % anual, lo que representa mermas que fluctúan entre los 132 y 318 millones de dólares anuales, sobre una exportación frutícola total que supera los 4.000 millones de dólares (sin considerar el mercado interno). En el caso de la pequeña agricultura los efectos son más dramáticos, por cuanto afectan a un tipo de productores de bajos recursos y baja resiliencia frente a estos eventos destructivos (IALE, 2016).

Un ejemplo claro del impacto económico de las heladas se vivió en el año 2013, cuando una serie de heladas tardías en septiembre de ese año generó una pérdida devastadora evaluada en 800 millones de dólares. Desde pequeños agricultores hasta grandes empresas agrícolas sufrieron el daño producido por las heladas, con el consiguiente perjuicio de ver afectadas su producción anual, la contratación de mano de obra y su estabilidad financiera.

De acuerdo con la información recopilada por la SNA desde los propios agricultores, los frutales que en esa ocasión presentaron mayor daño, en porcentaje de superficie, fueron los kiwis y carozos con al menos un 70 % de la superficie, seguido de nogales y almendros con un 68 %. En términos de superficie total, las viñas y uva de mesa concentraron la mayor cantidad de hectáreas afectadas, con más de 5.000, seguido de carozos con más de 2.500 hectá-

reas, y nogales y almendros con 1.850 hectáreas informadas. La superficie total afectada se estimó en 14.322 hectáreas, con un daño promedio del 68% avaluado en US\$ 92,7 millones.

La principal zona afectada fue la Región de O'Higgins, donde se identificó un 55 % de su superficie de huertos dañada, seguida por la Región Metropolitana con un 45 %, la del Maule con un 40 % y las de Atacama, Coquimbo y Valparaíso, con un 15 %.

De acuerdo con estimaciones de la SNA, el PIB silvoagropecuario se habría contraído hasta en un 5 %, explicado por el impacto de las heladas en el sector frutícola, que podría haber causado entre un 10% y 15% de disminución. A estas pérdidas se sumarían los costos sociales derivados de una menor demanda de empleos, que la SNA estima podrían alcanzar entre 60.000 y 80.000 puestos de trabajo en los meses de cosecha.

A causa de las heladas el Ministerio de Agricultura decretó emergencia agrícola en las regiones Metropolitana, Valparaíso, O'Higgins y Maule. El catastro realizado determinó que las regiones más afectadas fueron la de O'Higgins y la del Maule, donde se concentró el 67% del daño productivo y el 64% de la pérdida económica. En la Región de O'Higgins se estimó una pérdida de 186 mil toneladas de fruta, valorada en US\$130 millones.

Cuadro 4. Volumen pérdida productiva y valoración económica por heladas 2013

| Especie | Región de O'Higgins | | Nacional | | |
|--------------|---------------------|----------------|-----------------|----------------|----------------|
| | Ton | MUS\$ | Estimación daño | Ton | MUS\$ |
| Almendro | 2.982 | 5.367 | 50% | 6.200 | 11.160 |
| Arándano | 570 | 1.424 | 10% | 4.761 | 11.903 |
| Cerezo | 14.782 | 41.389 | 40% | 37.605 | 88.907 |
| Ciruelo | 24.929 | 12.465 | 40% | 50.695 | 25.347 |
| Durazno | 20.227 | 10.114 | 40% | 33.825 | 16.913 |
| Frambuesa | 0 | 0 | 10% | 2.018 | 2.018 |
| Kiwi | 51.081 | 15.324 | 60% | 137.450 | 41.396 |
| Limonero | 331 | 132 | 5% | 4.934 | 1.973 |
| Mandarino | 592 | 473 | 10% | 5.650 | 4.520 |
| Manzano | 15.427 | 4.628 | 5% | 55.440 | 16.632 |
| Naranja | 660 | 231 | 5% | 4.458 | 1.560 |
| Nectarino | 16.703 | 9.187 | 40% | 28.400 | 15.620 |
| Nogal | 369 | 737 | 10% | 3.742 | 7.484 |
| Palto | 376 | 452 | 7% | 13.827 | 16.593 |
| Peral | 9.464 | 5.205 | 10% | 19.209 | 10.564 |
| Vid de mesa | 27.772 | 23.051 | 10% | 98.257 | 81.553 |
| TOTAL | 186.265 | 130.178 | 15% | 506.471 | 354.144 |

Fuente: Bascopé, 2013.

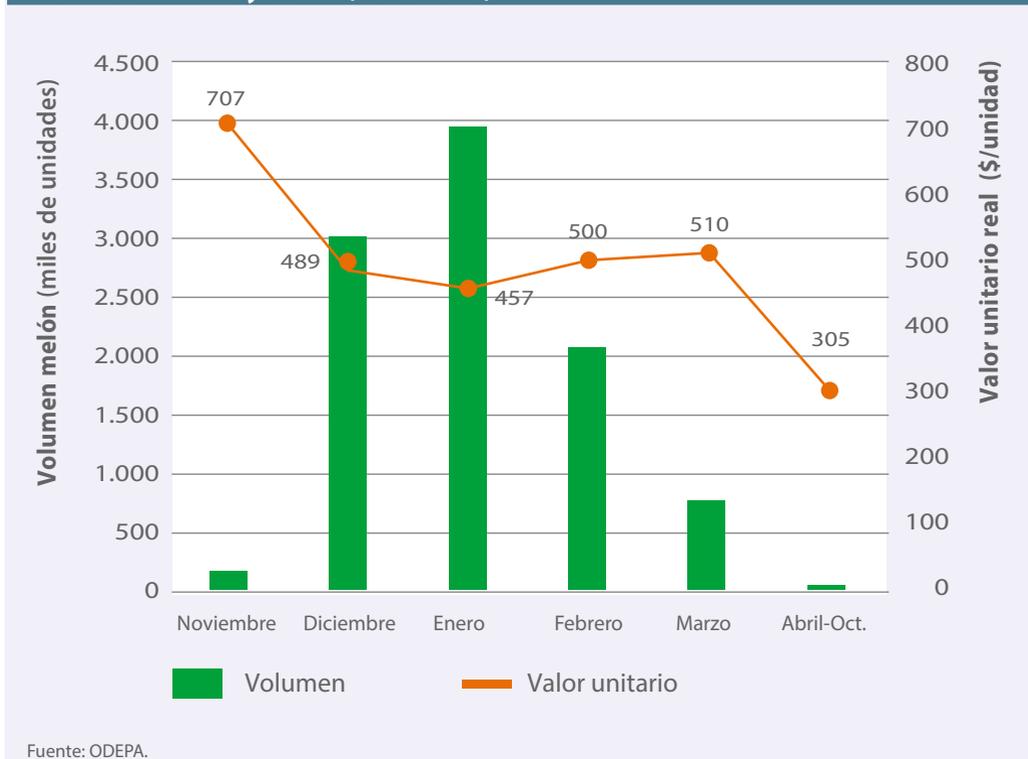
Para apoyar a los agricultores afectados, el Ministerio de Agricultura destinó aproximadamente \$2.000 millones en ayuda para usuarios de INDAP y una cantidad similar para los no usuarios.

Las cifras anteriores reflejan especialmente el daño en la fruticultura de exportación. La producción de hortalizas puede verse afectada de manera aún más severa, ya que pequeños y medianos productores cuentan con menos recursos financieros para enfrentar una situación de ese tipo.

Por lo tanto, el contar con un sistema de control de heladas como el desarrollado en el proyecto permite reducir las pérdidas económicas por eventuales heladas sobre los cultivos, cuya magnitud dependerá de la intensidad de la helada y de las condiciones del cultivo.

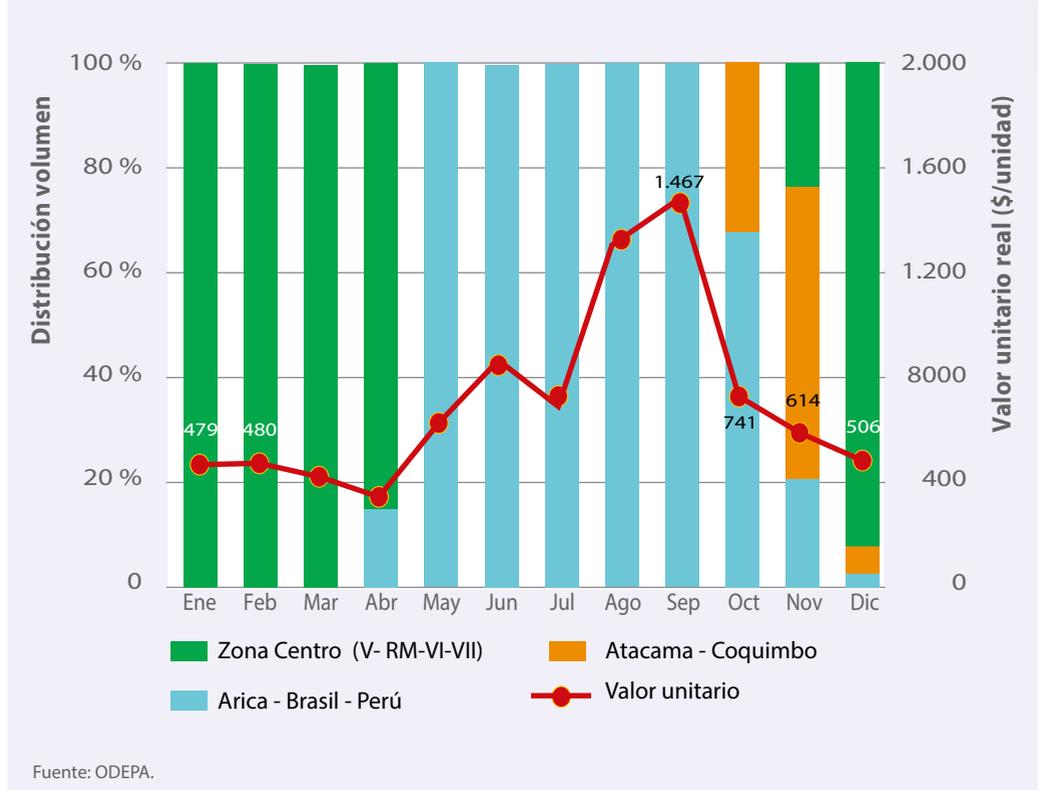
Por otra parte, el sistema permite adelantar la plantación y cosecha del cultivo donde se validó, con lo cual se accede a mejores precios. El melón tuna proveniente de la Región de O'Higgins se cosecha y comercializa en un 30% en el mes de diciembre y un 39% en el mes de enero, con valores unitarios promedio de \$489 y \$457 respectivamente. Solo un 2% del volumen total se vende en noviembre, pero alcanza un valor de \$707 por unidad, que es un 45% y 55% superior al valor de diciembre y enero, respectivamente. Por ello, el lograr adelantar la cosecha en un mes, con igual rendimiento, permite acceder a mejores precios.

Figura 5. Comercialización de melón tuna de la Región de O'Higgins en mercados mayoristas (2016-2020)



A nivel nacional la situación es similar. Durante los meses de mayo a octubre se transa solo un 0,7% del volumen anual de melón y casi la totalidad proviene de la Región de Arica y Parinacota o es importado. En octubre aparece el melón nacional proveniente del Norte Chico, alcanzando casi un tercio del volumen total; en este mes el valor promedio alcanza \$741 por unidad. Recién en noviembre aparece el melón de la zona central, con un 23 % del volumen, consolidándose en diciembre donde supera el 90%.

Figura 6. Comercialización de melón tuna en mercados mayoristas nacionales (2016-2020)



Adicional a la protección de las heladas, dado que la temperatura del agua subterránea presenta poca variación a lo largo del año, el sistema permite bajar la temperatura en la época de mayor calor. Esto permite un mejor desprendimiento del polen, una mejor polinización, y en consecuencia mayor productividad.





► 5. Conveniencia económica para el productor

Se utiliza como modelo para la simulación un cultivo de melón en rotación anual, con los parámetros productivos y económicos obtenidos o estimados en el proyecto. Por lo tanto, se trata de un modelo de referencia para simular resultados esperados, sujeto a las condiciones específicas del lugar y tiempo donde se realice.

La inversión física necesaria para implementar el sistema Geochilly, de acuerdo con los valores actualizados del proyecto precursor, alcanza a \$2,7 millones para una hectárea de melón en sistema de micro túneles. El detalle de la inversión se presenta en el siguiente cuadro.

Cuadro 5. Inversiones en equipamiento y materiales para sistema Geochilly en 1 hectárea de melón

| Ítem ⁴ | \$ |
|------------------------------------|------------------|
| Materiales conducción agua y otros | 567.208 |
| Plástico | 415.800 |
| Bomba y equipos electrónicos | 1.500.000 |
| Mano de obra | 225.000 |
| TOTAL \$ | 2.708.008 |

Fuente: adaptado de proyecto precursor.

Para estimar los beneficios de implementar el sistema, se establecen 2 escenarios posibles:

- Se cosecha en forma anticipada en el mes de noviembre, con lo que se obtiene un mayor precio, con igual rendimiento.
- Se cosecha en forma normal en el mes de diciembre, con lo que se obtiene el mismo precio, con mayor rendimiento.

⁴ Valores referenciales, sujetos a variaciones por inflación y tipo de cambio, especialmente para los equipos electrónicos.

| Cuadro 6. Beneficio económico estimado sist. Geochilly en melón cosecha anticipada | | |
|---|------------------------------|------------------------------|
| Variable | Sin sistema Geochilly | Con sistema Geochilly |
| Superficie (ha) | 1,0 | 1,0 |
| Densidad (plantas/ha) | 10.000 | 10.000 |
| Rendimiento (unidad/ha) | 28.700 | 28.700 |
| Mes cosecha | Diciembre | Noviembre |
| Precio de venta a productor (\$/kg) | 489 | 707 |
| Ingreso por hectárea (\$) | 14.034.300 | 20.290.900 |
| Costos totales por hectárea (\$) | 8.759.175 | 11.467.183 |
| Mano de obra (\$) | 2.375.000 | 2.375.000 |
| Maquinaria (\$) | 238.700 | 238.700 |
| Insumos (\$) | 4.777.727 | 4.777.727 |
| Otros (\$) | 1.367.748 | 1.367.748 |
| Materiales Geochilly (\$) | 0 | 2.708.008 |
| Margen bruto (\$) | 5.275.125 | 8.823.717 |

Fuente: adaptado de proyecto precursor.

En este primer caso, solo por concepto de aumento de precio, el margen neto por hectárea aumenta en \$3.548.592. Al realizar la sensibilización por precio, cualquier valor superior a \$583 por unidad ya es capaz de arrojar un margen bruto superior a la situación base.

Para el segundo caso se asume un mayor rendimiento, por una mayor sobrevida de plantas y reducción de pérdidas por daño causado por las heladas. En el proyecto precursor se obtuvo de 3,1 a 3,6 veces más unidades cosechadas con el sistema Geochilly, en una superficie piloto. Para proyectarlo a 1 hectárea se toma un escenario más conservador, donde el incremento de productividad es de 1,5 veces lo obtenido en la situación base.



Cuadro 7. Beneficio económico estimado sistema Geochilly en melón con aumento de rendimiento

| Variable | Sin sistema Geochilly | Con sistema Geochilly |
|-------------------------------------|-----------------------|-----------------------|
| Superficie (ha) | 1,0 | 1,0 |
| Densidad (plantas/ha) | 10.000 | 10.000 |
| Rendimiento (unidad/ha) | 28.700 | 43.050 |
| Mes cosecha | Diciembre | Diciembre |
| Precio de venta a productor (\$/kg) | 489 | 489 |
| Ingreso por hectárea (\$) | 14.034.300 | 21.051.450 |
| Costos totales por hectárea (\$) | 8.759.175 | 11.467.183 |
| Mano de obra (\$) | 2.375.000 | 2.375.000 |
| Maquinaria (\$) | 238.700 | 238.700 |
| Insumos (\$) | 4.777.727 | 4.777.727 |
| Otros (\$) | 1.367.748 | 1.367.748 |
| Materiales Geochilly (\$) | 0 | 2.708.008 |
| Margen bruto (\$) | 5.275.125 | 9.584.267 |

Fuente: proyecto precursor.

En este caso el aumento de margen bruto atribuible al sistema Geochilly es de \$4.309.142. Al sensibilizar el resultado según la mejora en el rendimiento, se obtiene que cualquier incremento en la cosecha por sobre el 19 % (equivalente a 34.238 unidades por hectárea) genera un mayor margen bruto que en la situación base sin control de heladas.

Para la evaluación económica integral se consideran también los estudios hidrogeológicos previos que deben realizarse para el diseño del proyecto, y eventualmente la construcción de los pozos de extracción y reinyección de agua. Estos tres componentes son fundamentales y decisivos para la rentabilidad del proyecto, puesto que su costo puede variar mucho de un lugar a otro, dependiendo de las condiciones del terreno, de si se cuenta previamente con pozos, y de si se cuenta con información hidrogeológica disponible. Por lo tanto, deben ser considerados solo como valores de referencia.

Cuadro 8. Inversiones para diseño y habilitación sistema Geochilly

| Ítem | Valor (\$) |
|--------------------------|------------|
| Estudios hidrogeológicos | 5.000.000 |
| Pozo extracción | 8.000.000 |
| Pozo reinyección | 3.500.000 |

Fuente: proyecto precursor.

Con estos datos se realizan flujos estimados a 10 años para el cultivo de melón en 1 hectárea con micro túneles, bajo el escenario de cosecha temprana, precio de \$707/unidad por ser producto “primor” e igual rendimiento en todos los sistemas. Se evalúa también la posibilidad, validada en el proyecto, de omitir el pozo de reinyección y devolver el agua a la napa por infiltración superficial.

| Cuadro 9. Indicadores económicos cultivo de melón con y sin sistema Geochilly | | | |
|--|----------------------|---|---|
| Parámetro | Sin geotermia | Con geotermia y pozo reinyección | Con geotermia sin pozo reinyección |
| Precio (\$/unidad) | 489 | 707 | 707 |
| Rendimiento (unidades/ha) | 28.700 | 28.700 | 28.700 |
| TIR% | 217% | 49% | 59% |
| VAN (12%) \$ | 22.753.267 | 38.128.146 | 41.628.146 |
| Periodo recuperación de la inversión | Año 1 | Año 3 | Año 2 |

Fuente: proyecto precursor.

Bajo los supuestos descritos, implementar el sistema Geochilly resulta más rentable que no hacerlo, en sus dos modalidades, con un diferencial en el VAN de \$15,4 millones para el modelo con pozo de reinyección y de \$18,9 millones sin él.

Al realizar la sensibilización respecto al precio del producto, en el modelo con pozo de reinyección se requiere un precio de \$612 por unidad para igualar el VAN del escenario base sin geotermia; mientras que en el modelo sin pozo de reinyección se puede llegar hasta un precio de \$591/unidad. Cualquier precio sobre estos valores críticos hace al sistema más rentable que no utilizarlo.

Otro aspecto clave, por la incertidumbre sobre el valor que puede tener, es el costo de los estudios hidrogeológicos previos. Manteniendo el precio inicial de \$707 por unidad, en el modelo con pozo de reinyección el costo de los estudios podría subir hasta \$20,3 millones para igualar el VAN del sistema sin geotermia; y en el modelo sin pozo de reinyección podría llegar hasta \$23,8 millones.

| Cuadro 10. Sensibilización con valores críticos para igualar rentabilidad de sistema sin Geochilly | | |
|---|---|---|
| Parámetros | Con geotermia y pozo reinyección | Con geotermia sin pozo reinyección |
| Precio mínimo melón (\$/unidad) | 612 | 591 |
| Costo máximo estudios hidrogeológicos (\$) | 20.374.879 | 23.874.879 |

Fuente: proyecto precursor..

Aspectos no valorizados en esta evaluación son el beneficio de poder bajar la temperatura del cultivo en épocas de mayor calor, aprovechando la inversión ya realizada y el hecho de disponer de agua para riego a partir del pozo de extracción. Si el flujo de agua y la temperatura lo permiten, el mismo sistema podría ser utilizado para calefaccionar una vivienda, una bodega, un packing u otra instalación del predio, reduciendo los costos de calefacción de forma sustentable.

En el Anexo 1 se presentan flujos completos a 10 años para los 3 escenarios. El periodo de evaluación permite incorporar las reinversiones necesarias según la vida útil de la infraestructura y equipos. En la inversión del sistema Geochilly se considera una reinversión del 50 % del valor inicial en el año 5, lo que dependerá del desgaste del material según las condiciones ambientales.

► 6. Claves de viabilidad

El éxito de la implementación de esta tecnología, probada exitosamente a nivel de un pequeño prototipo, depende de tres elementos principales:

Conocimiento hidrogeológico de la zona de implementación

Probablemente sea este el factor más limitante de todos, dado que puede llegar a constituir el mayor costo en un proyecto de inversión. La experiencia vivida en el proyecto precursor demostró que en las instituciones relacionadas con el tema (SERNAGEOMIN, DGA) no existía información consistente y sistemática de la geología, geofísica y características del agua subterránea en los sectores analizados. Por ello fue necesario realizar numerosas prospecciones y análisis en terreno, obteniendo datos que en conjunto con la información existente pudieran arrojar el conocimiento necesario para el diseño del sistema.

A pesar de ello, no se logró obtener una radiografía completa del subsuelo, sino que debieron realizarse simulaciones computacionales complejas para llenar los vacíos de información. Por lo tanto el proceso tuvo muchas iteraciones, ensayos y errores, pero que finalmente permitieron llegar a un diseño técnicamente eficaz, aunque altamente costoso. Se estima en alrededor de \$40 millones de pesos el presupuesto destinado a estos estudios, partiendo desde una base que podría considerarse como la ausencia absoluta de información relevante. Suponiendo un nuevo proyecto en una zona con información hidrogeológica disponible, el modelamiento de las variables podría tener un costo referencial de un 15 % a 35 % de lo que se destinó a ese propósito en el proyecto precursor.

Esto pone en evidencia que nuestro país se encuentra todavía en una etapa muy incipiente del conocimiento de sus reservas geotérmicas, para efectos de su explotación en proyectos de baja o media entalpía. Esta es una condición habilitante para cualquier proyecto de inversión, que por su alcance y naturaleza debería ser acometida con apoyo del Estado. A lo anterior se agrega una insuficiente cantidad de especialistas e investigadores en la materia, lo que se constató en el proyecto precursor, ya que pese a contar con el apoyo del Centro de Excelencia en Geotermia de Los Andes, de la Universidad de Chile, fue necesario también contar con los servicios de especialistas extranjeros. El estudio y diseño del sistema requiere de conocimientos avanzados ya que, si bien los proyectos de baja entalpía tienen muy bajos riesgos, un diseño mal realizado



puede generar extracción excesiva y no sustentable del acuífero, quiebres de temperatura al devolver el agua enfriada muy próxima al pozo de extracción o bien simplemente resultar ineficaz por mal cálculo de parámetros.

Riesgo de heladas en la zona de implementación

Por razones de relación costo/beneficio, indudablemente en sectores con mayor propensión a sufrir heladas repetidas o de alta intensidad la implementación de un sistema de protección se hace más viable. A mayor daño productivo, mayor disponibilidad de invertir en sistemas pasivos y activos, y es aquí donde la comparación técnica y económica entre las distintas tecnologías puede hacer a la geotermia una opción competitiva.

Rentabilidad de los cultivos

Relacionado con el punto anterior, dada la elevada inversión inicial de un sistema geotérmico, su implementación sería más viable en cultivos de alta rentabilidad, especialmente en aquellos destinados a la exportación y que además tienen alta vulnerabilidad al daño por heladas, como viñas, cerezos u otros.

Lo anterior no excluye que pequeños productores con cultivos intensivos como melón, sandía, frutilla u hortalizas de hoja, en invernaderos, macro o micro túneles, puedan hacer uso de esta tecnología. En estos casos sería factible implementar modelos colaborativos donde dos o tres agricultores cercanos puedan compartir un mismo pozo distribuyendo el agua en predios contiguos, con lo cual se reduciría el monto de inversión individual.

► 7. Asuntos por resolver

Dentro de los aspectos que en el proyecto precursor resultaron más problemáticos o que no se desarrollaron de forma suficiente, se pueden mencionar:

- **Ensayo en cerezos u otros frutales arbóreos:** el piloto en cerezos no dio los resultados esperados ya que la aislación del huerto no fue suficiente para proteger del viento, por lo cual el calor irradiado se pierde hacia el exterior. Las modificaciones de la posición de las tuberías o el diseño completamente nuevo del sistema de distribución no fueron capaces de resolver este problema, por lo cual el ensayo no logró validar la efectividad del sistema. Queda como desafío entonces la experimentación con cortinas para bloquear el viento, a las cuales podrían adosarse también las tuberías de distribución de agua temperada. La validación en un cultivo tan importante como el cerezo podría abrir nuevas posibilidades de extender su uso hacia otros frutales con una configuración similar.
- **Optimización de dispositivos electrónicos:** en el proyecto precursor debieron encargarse y configurarse los dispositivos de captura y recopilación de información de forma específica para los requerimientos del estudio, puesto que no fueron encontrados en el mercado equipos “*plug and play*” que pudiesen operar de forma automática. Esto supone tiempo y costos que pueden afectar la viabilidad del proyecto, pero que puede ser abordado mediante la exploración constante del mercado, ya que este segmento es altamente dinámico y cada día aparecen soluciones tecnológicas modulares, escalables y de bajo costo.

El proyecto precursor

► 1. Características generales

El proyecto “GEOCHILLY: Prototipo de un sistema geotérmico de baja entalpía para el control de heladas en melones y cerezos” tuvo una duración de 3 años, finalizando en octubre de 2020. Su objetivo fue implementar un prototipo de sistema de control de heladas en cerezos y melones usando como fuente energética la geotermia de baja entalpía. Se estructuró en torno a los siguientes objetivos específicos:

1. Establecer *in situ*, a través de diferentes pruebas, la disponibilidad del recurso para un uso sustentable de éste.
2. Diseño del prototipo para control de heladas en melón y cerezos, elaborado con el apoyo de software de simulación y evaluaciones experimentales a pequeña escala.
3. Implementación en campo del prototipo para control de heladas, en melón y cerezos.
4. Evaluación técnica, operacional y económica del sistema implementado.
5. Difusión de los resultados del proyecto a productores y la industria agrícola.





Cultivo de melones en micro túneles. Fuente: proyecto precursor.

► 2. Validación de la tecnología

El proyecto desarrolló diversas metodologías que generaron resultados verificados de carácter técnico, los que pueden agruparse en torno a las siguientes líneas de trabajo:

Diseño de prototipo de extracción y utilización de agua para control de temperatura

Como primera etapa se realizó una prospección geotérmica en distintos sectores de la Región de O'Higgins para identificar su potencial de utilización. Para ello se midieron las temperaturas y nivel de agua en un pozo construido para el proyecto, y en pozos profundos privados y de sistemas de agua potable rural (APR); también se realizó un estudio de las condiciones geofísicas del terreno para caracterizar su textura, porosidad, densidad y capacidad de retención de agua, entre otros factores.

Producto de este análisis se concluyó que es posible obtener en invierno temperaturas de agua de 17°C en Pichidegua (acuífero Cachapoal) y entre 16,5 a 18°C en San Fernando (acuífero Tinguiririca) a profundidades mayores a 15 m y 20 m, respectivamente. Los pozos del sitio Pichidegua, ubicados justo al borde de la estribación del cerro, rindieron flujos cercanos a 1 l/s con una temperatura muy favorable de 18,5°C, una de las más altas encontradas en la zona. Los resultados muestran que los perfiles de temperatura y conductividad eléctrica son afectados en el tramo superior por la temperatura ambiente y las lluvias; sin embargo, en profundidad la temperatura y conductividad eléctrica son idénticas en fechas distintas.

En base a los antecedentes recabados se realizaron simulaciones para proyectar la ubicación y desempeño de pozos de extracción y de reinyección de agua, con criterio de sustentabilidad a largo plazo.

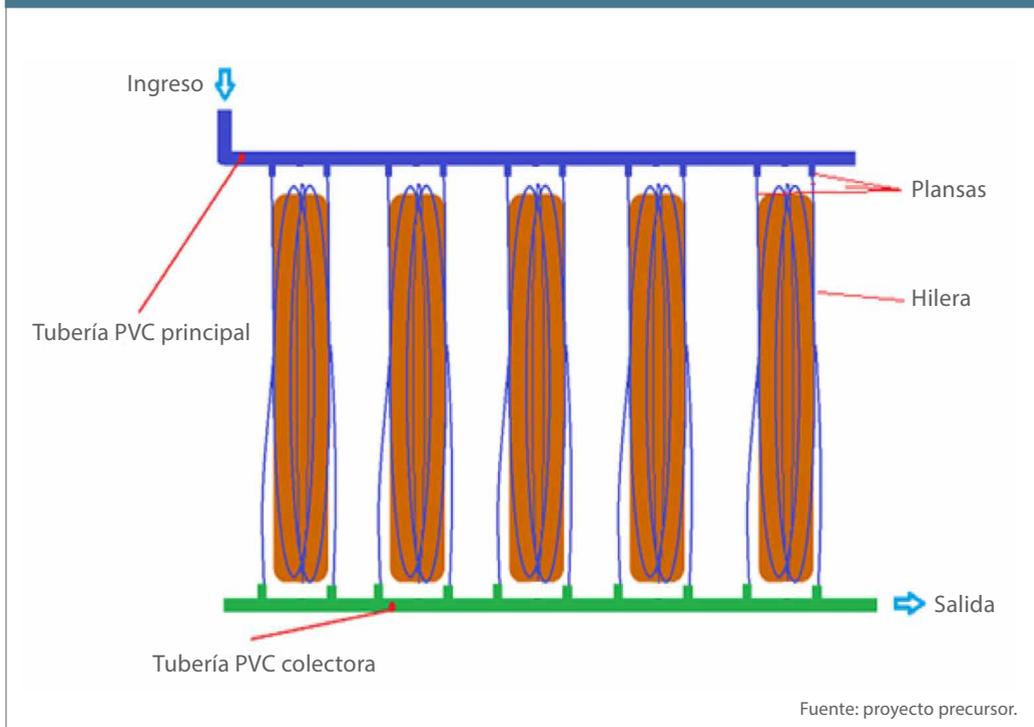
En el predio piloto de Pichidegua, destinado al cultivo de melón, se perforó un pozo de 42 m de profundidad y con un diámetro de 8", utilizado como pozo de extracción del que se logró extraer de forma estable un máximo de 1,3 l/s. Un segundo pozo en el mismo predio, de 6" de diámetro y 23,5 m de profundidad, se destinó como pozo de reinyección, puesto que la extracción de agua no superó los 0,8 l/s y no pudo ser profundizado por encontrarse una capa de material muy duro.

En el pozo de 8" se instaló una bomba de 2 l/s para extracción de agua, con válvulas y flujómetros para controlar que el flujo no sobrepasara los 1,3 l/s. En la primera temporada de ensayos se ocupó el pozo de inyección, pero su desempeño fue bajo por la impermeabilidad del suelo, por lo cual se utilizaron con éxito zanjas superficiales de infiltración para recargar al acuífero el agua fría que sale del sistema durante los meses del invierno.

Se instalaron 15 camellones en los que fueron plantados 1.035 plántines de melón con un marco de 2,0 x 0,5 m, en una superficie total de 0,12 ha. Para el ensayo, se implementaron 2 tratamientos:

- Con sistema de control de heladas con geotermia (G): sistema compuesto de 6 líneas de planzas transportadoras de agua con temperatura inicial de aproximadamente 18°C, en los túneles típicos usados por los agricultores de la zona.
- El "control" (C), sin sistema de control de heladas: sin planzas transportadoras de agua, solo con túneles típicos usados por los agricultores de la zona.

Figura 7. Diseño simplificado de sistema de distribución de agua para control de heladas en melones



El agua a 18°C proveniente del pozo circula a través de una tubería principal hasta llegar a las planzas, donde el agua tibia circula a lo largo de toda la hilera, siguiendo el circuito de 6 líneas. Finalmente, y una vez terminado el recorrido de planzas, el agua saldrá por la tubería colectora o de descarga, la que conduce el agua al canal del predio donde es reinfiltrada o, si es preciso, al sistema de riego del mismo sector del ensayo. Todo este sistema se encuentra automatizado en la caseta de control de la bomba, la cual dispone de un sensor de temperatura ambiente que acciona la bomba al detectar temperaturas bajas riesgosas para el cultivo. Se instalaron sensores de temperatura del agua en la salida del pozo, en el inicio y en la salida del sistema; también sensores de temperatura y humedad relativa de aire y de suelo en hileras de control.

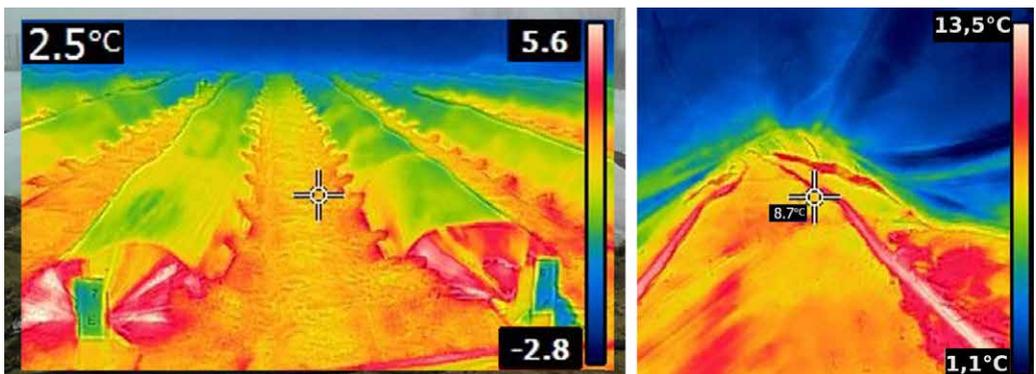


Sistema de conducción de agua instalado en módulo de melones. Fuente: proyecto precursor.

Se instaló una estación meteorológica propia en el campo del productor, a unos 100 m de distancia del ensayo, cuyos registros de temperatura fueron apoyados por datos del sensor de temperatura del sistema de control del prototipo.

En la temporada 2018, con un caudal de 1 l/s para 0,1 ha de cultivo de melones bajo plástico, el sistema logró aumentar la temperatura en los túneles en 2 - 3 °C sobre la temperatura de un túnel sin circulación de calor geotérmico, aumento suficiente para combatir una helada típica.

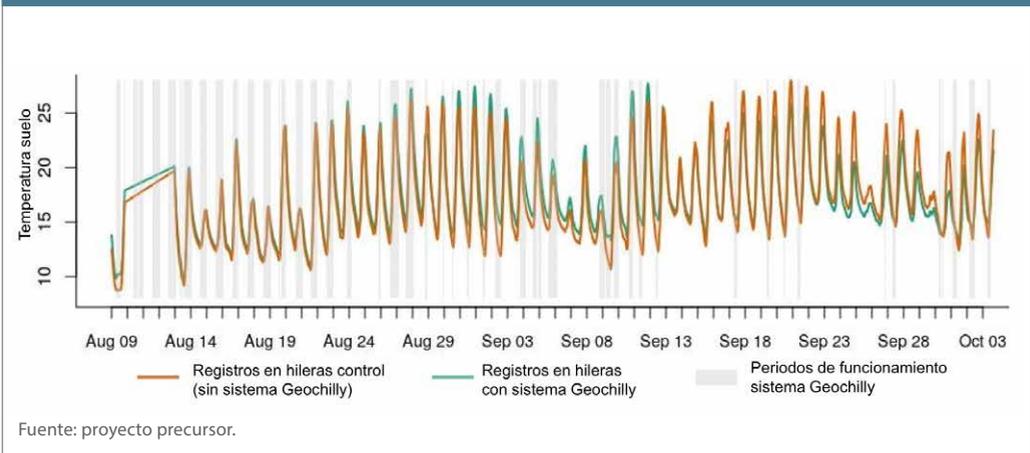
En la temporada 2019, en 0,12 ha con un caudal de 1,2 l/s, se logró aumentar la temperatura en los túneles en 4 °C sobre la temperatura de un túnel sin circulación de calor. Los túneles utilizados fueron más bajos (menor volumen de control) que los de la temporada anterior, lo que puede explicar el aumento en la eficiencia del sistema.



Imágenes térmicas de los túneles durante una helada de 6 horas con temperaturas entre 0°C a -0,6°C (izquierda: vista exterior, derecha: vista interior). Fuente: proyecto precursor.

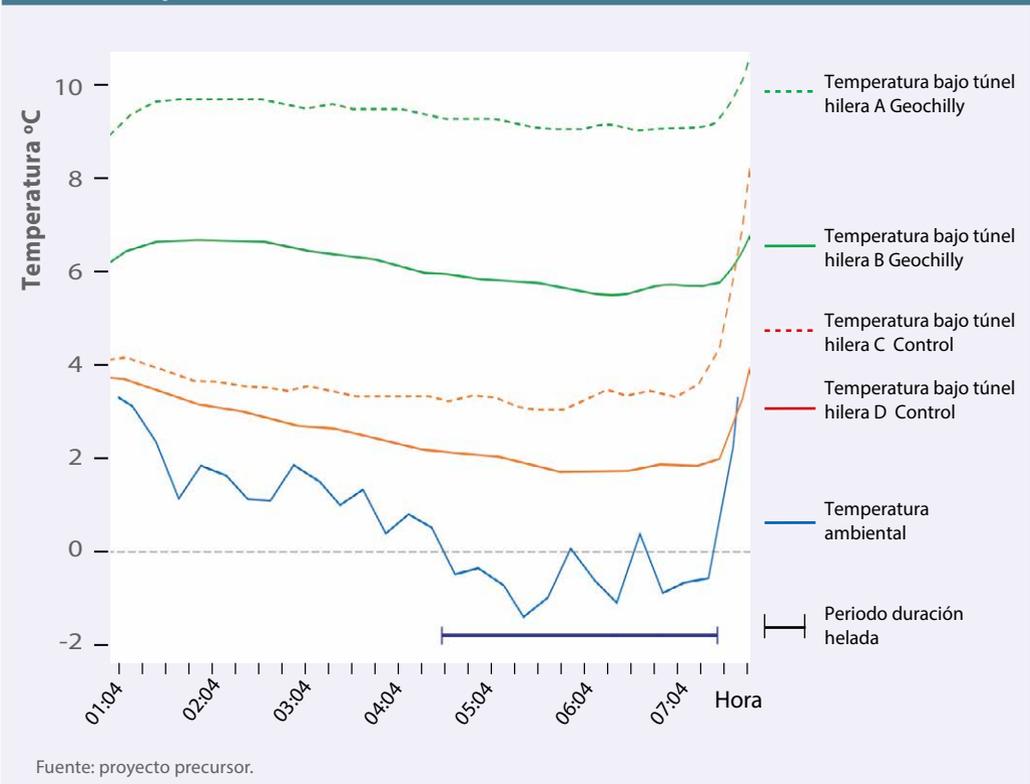
En la figura siguiente se presentan las lecturas de los sensores de temperatura de suelo, donde se aprecia que al activarse el sistema por las alertas de helada (barras de color gris), las hileras con el sistema instalado muestran temperaturas de suelo consistentemente más altas que el grupo control.

Figura 8. Registros de temperatura de suelo en huerto piloto de melón



En la siguiente figura se ejemplifica el registro de temperaturas en el cultivo de melón durante un evento de helada de 3 horas de duración, ocurrido el 3 de septiembre de 2019. El controlador fue programado para encender la bomba y circular agua en el sistema cuando la temperatura ambiental fuera menor a 3,5°C. El gráfico indica que en las dos hileras monitoreadas con sistema Geochilly se alcanzaron temperaturas superiores en 2 a 4°C respecto a dos hileras sin sistema de control de heladas.

Figura 9. Registro de temperaturas durante helada de tres horas de duración en huerto piloto de melón



Para el ensayo de cerezos, en un predio de la localidad de Roma, se instaló el sistema en una superficie de 50 x 100 metros, 12 hileras, bajo techo de rafia. Se realizaron 3 tratamientos distintos, en donde se utilizó la temperatura del agua de pozo profundo para transferir calor a través de un sistema de tuberías, mangas y planzas que hacen circular el agua por los costados de los árboles de cerezo, elevando de esta forma la temperatura del ambiente frente a una helada. Los tratamientos fueron los siguientes:

- T1: Sistema de control de heladas utilizando 2 mangas plásticas de 10 cm de diámetro y 300 micras, ubicadas a 1 metro de altura a ambos costados de la hilera.
- T2: Sistema de control de heladas utilizando 2 mangas plásticas de 10 cm de diámetro y 300 micras, ubicadas a 1 metro de altura a ambos costados de la hilera, y 2 planzas de ¾" enterradas a 5 cm de profundidad a ambos costados de la hilera.
- Hileras testigo sin control de heladas.

En este piloto no fue posible detectar diferencias en los tratamientos con y sin control de heladas, esto es atribuido a vientos que impidieron conservar el calor inyectado en la zona debajo de las cubiertas que se mantuvieron sobre las hileras de árboles.



Sistema de conducción de agua instalado en módulo de cerezos. Fuente: proyecto precursor.

Efectos del sistema de control de heladas sobre la producción

El análisis de datos de la cosecha de melón en la temporada 2018 demostró un efecto positivo del control de heladas con geotermia, que se tradujo en una mayor población de plantas que sobreviven a las heladas. Para efecto de los cálculos de producción se asumió que se cuenta con la misma población de plantas en los diferentes tratamientos y con igual fecha de inicio, dando como resultado estimado que para todos aquellos tratados con geotermia la cosecha fue 3,1 a 3,6 veces superior en cantidad de melones en comparación al control, y 5 a 6 veces más en kilos totales. En cuanto al calibre, los melones del grupo control fueron de un peso promedio mayor que el de los tratados con geotermia, esto se atribuye a la baja carga de las plantas que lograron llegar a cosecha sin geotermia.

Además, se ocupó el sistema para disminuir la temperatura en 5 °C en túneles en los días calurosos, lo cual es también relevante puesto que el crecimiento y polinización del melón se ve afectado por las altas temperaturas.

Se logró cosechar un cultivo plantado un mes antes de la fecha típica de la zona, con lo cual se accede a una ventana de mejores precios, estimándose su valor un 68 % superior al esperado en la época de cosecha convencional. Bajo este supuesto, y aun manteniendo el mismo volumen total de rendimiento, el margen neto por hectárea del sistema Geochilly triplica el resultado del modelo sin control de heladas.



(a) Frutos inmaduros de melón,



(b) Melón llegando a madurez.

Ambas fotografías fueron tomadas el día 15 de noviembre de 2019 durante la primera estimación de cosecha del prototipo de cultivo de melón. Fuente: proyecto precursor.

(a) Melón tuno en su estado maduro.



(b) El mismo melón partido por la mitad.

Ambas fotos fueron tomadas durante la segunda estimación de cosecha, el día 4 de diciembre de 2019.

Fuente: proyecto precursor.



► 3. La asesoría

Para los estudios iniciales del proyecto se contó con el apoyo del Centro de Excelencia en Geotermia de Los Andes (GECA), de la Universidad de Chile, centro con 10 años de existencia originado por proyecto Fondap-Conicyt, que reúne investigadores nacionales e internacionales en geotermia.

Estas capacidades fueron complementadas con los servicios de especialistas estadounidenses de alto nivel: el señor Steve Dwight Miller, ingeniero mecánico encargado del diseño de los equipos y materiales termo mecánicos para los ensayos, y el señor William E. Glassley, geólogo y PhD Universidad de Washington, especialista senior en geotermia, académico de la Universidad de California y Universidad de Geociencia de Aarhus, Dinamarca. El Dr. Glassley fue el encargado de realizar las simulaciones y modelamientos que finalmente arrojaron los parámetros de diseño del sistema.

Posteriormente, el equipo ejecutor del proyecto realizó el diseño hidráulico del sistema, aspecto de gran relevancia pues de ello depende la eficiencia en el transporte de calor desde el agua a los cultivos. Este equipo también cuenta con la capacidad para diseñar los ensayos, monitorearlos, analizar resultados y retroalimentar el desarrollo.

Como puede verse, el sistema Geochilly requiere la participación de especialistas con conocimiento avanzado en sus etapas iniciales, especialmente si no se cuenta con información hidrogeológica y esta debe ser levantada e interpretada. Sin embargo, una vez que el sistema está diseñado y en operación, la demanda de personal calificado baja fuertemente, pudiendo ser manejado por el agricultor o por cualquier operario que se haya capacitado. Solo sería necesario un acompañamiento profesional para verificar el funcionamiento del sistema, la mantención de los parámetros dentro de los rangos esperados y eventuales ajustes si fueran necesarios.



► 4. Estado de ejecución actual

Tratándose de un cultivo anual, una vez terminado el piloto de melón el sistema de distribución, los túneles y su material son removidos, para preparar la siguiente temporada. El pozo y el sistema de conducción quedan instalado en el predio piloto, para ser utilizados para el riego. También son removidos los sensores y *dataloggers* para protegerlos de la intemperie y los movimientos de tierra.

En cuanto al piloto en cerezo, el circuito de distribución quedó instalado y a la espera de poder retomar el trabajo, aprovechando la experiencia y el conocimiento acumulado durante el proyecto.

El equipo ejecutor ha recibido numerosas expresiones de interés por parte de productores de hortalizas, tanto individuales como grupos organizados en Servicios de Asesoría Técnica de INDAP, ya que ven como una gran oportunidad la posibilidad de adelantar las cosechas en algunas semanas, buscando competir de mejor forma con los productos de la zona norte o importados. Se está evaluando hacer prototipos en hortalizas en próximas temporadas, aprovechando los pozos ya existentes.

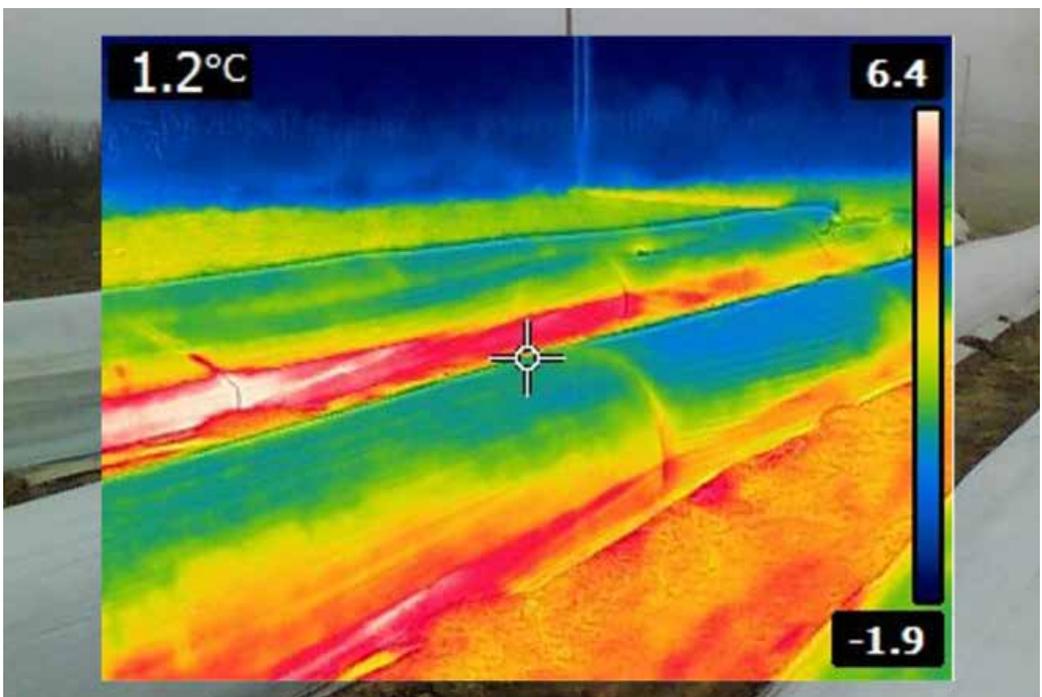
El productor Sr. José Carreño con el prototipo del sistema de control de heladas por geotermia en su huerto de prueba (0.1 ha). La hilera de borde (Br) a la izquierda esta en construcción: se puede ver el mulch de plastico negro plateado. Una tuberia de PVC con aislacion termica lleva el agua del pozo a los tuneles, donde el agua circula en un circuito de plansas bajo el tunel, y luego sale a la tuberia de PVC sin aislacion hasta el pozo de reinyeccion.



El valor del proyecto

Como resultado de la ejecución del proyecto se logró desarrollar un modelo matemático para la simulación de condiciones hidrogeológicas a partir de información primaria y secundaria, con el cual puede dimensionarse el flujo de agua subterránea necesario para proteger un cultivo de las heladas más frecuentes, en base a parámetros establecidos para el cultivo y sin afectar la sustentabilidad del recurso hídrico.

Este modelo matemático fue validado mediante la implementación de un piloto en cultivo de melones en micro túneles, donde el agua subterránea puesta en circulación sobre el mulch fue capaz de elevar la temperatura dentro de los túneles en 4°C, con lo cual se evita





Fotos de la primera cosecha de melones en hilera A 10 (izquierda) y control C 12 (derecha) (18-Dic-2018).
Fuente: proyecto precursor.

el daño por heladas en las plantas. El diseño, a nivel de prototipo, se desarrolló en un huerto de 0,12 ha, pero bajo las condiciones disponibles se estima que podría operar eficazmente para 0,5 hectáreas del mismo cultivo.

El sistema es configurable para activarse de forma automática a las temperaturas críticas definidas para cada cultivo, de modo de anticiparse a la ocurrencia de la helada, previniendo con ello el daño celular en las plantas y la consiguiente pérdida productiva. La aplicación del sistema demostró que el incremento de temperatura en los periodos más fríos permite adelantar la plantación y cosecha de un cultivo, lo que para efectos comerciales es muy beneficioso ya que, aun cuando el rendimiento sea el mismo, se aprovechan los precios más elevados de los “primores”.

También el sistema demostró ser eficaz para moderar la temperatura en la estación cálida, gracias a la estabilidad térmica del agua subterránea, lo que también resulta beneficioso para la polinización y el desarrollo de frutos.

El modelo evaluado en melón resulta rentable para las condiciones en que fue realizado, incluyendo la construcción de un pozo para la extracción de agua y otro para la reinyección al subsuelo, la implementación de los equipos y la red de distribución. Sin embargo, la rentabilidad se anula si se consideran todos los estudios previos que debieron ser realizados para explorar la geología del terreno, las características del subsuelo y el agua subterránea, y el modelamiento hidrogeológico para diseñar el sistema.

Bajo las condiciones analizadas, y suponiendo un nuevo proyecto que no parte desde cero con todos los estudios y prospecciones, con un total de \$16,5 millones de inversión en estudios, pozo de extracción y pozo de reinyección, se obtiene una rentabilidad equivalente a \$38,1 millones de VAN a 10 años de evaluación (con cosecha temprana y precio 45 % superior al normal). Esta rentabilidad se iguala a la de un proyecto sin sistema de control de heladas cuando la inversión en los ítems mencionados llega a \$31,9 millones, por lo cual hay un amplio margen donde el proyecto de geotermia sigue siendo rentable.

La rentabilidad del proyecto se asocia al bajo costo de operación del sistema, puesto que la geotermia es una fuente permanente y renovable de energía, y al beneficio productivo emanado de evitar las pérdidas de rendimiento por heladas y/o la mejora significativa de precios al adelantar la cosecha. Otros beneficios adicionales son el de evitar las emisiones de otros sistemas de control de heladas en base a combustible, el utilizar la capacidad instalada para enfriar el cultivo cuando la temperatura ambiental es muy alta y el de aprovechar la misma agua para riego.

Por la complejidad y necesidad de asesoría experta en el inicio de un proyecto de este tipo, la transferencia al sector productivo requiere de prestadores de servicios altamente especializados, que actualmente son muy escasos.

Todo sistema en base a geotermia es muy sitio específico, pues requiere un conocimiento acabado de las características del subsuelo y del agua subterránea, así como de una alta precisión para decidir en qué lugar realizar la perforación de los pozos. Un sistema mal proyectado puede resultar ineficaz para alcanzar la temperatura deseada, afectar la sustentabilidad del recurso hídrico subterráneo o ser excesivamente costoso.

El aspecto más crítico para el éxito de cualquier proyecto geotérmico es el conocimiento previo disponible sobre el terreno del proyecto, ya que los estudios son complejos y costosos. Sería muy difícil para un agricultor acometer esta tarea en forma individual, aún para aquellos más grandes o de rubros altamente competitivos.

Por ello, las instituciones del Estado, universidades y centros de investigación deberían profundizar el estudio de los recursos geotérmicos del país, entendiendo este conocimiento como un bien público que debe ser puesto a disposición de la comunidad para reducir los riesgos y barreras de entrada para proyectos de inversión. Esto incluye no solo la prospección de recursos para grandes proyectos eléctricos, sino que también para proyectos de media o baja entalpía, cuyas inversiones son mucho menores y se podrían realizar en muchos lugares del país, para diversas aplicaciones.

La gran disponibilidad de recursos geotérmicos aún inexplorados e inexplorados de nuestro país representan una enorme oportunidad de desarrollo, especialmente en una estrategia integral de energías renovables no convencionales y sustentabilidad para los productos silvoagropecuarios.

Anexos

Anexo 1. Cuadros de análisis económico

Anexo 2. Bibliografía consultada

ANEXO 1. Cuadros de análisis económico

Cuadro 11. Flujo análisis económico 1 hectárea de melón en micro túnel sin sistema de control de heladas cosechado en diciembre

| Ítems/ Años | 0 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 |
|------------------------------------|---|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| Rendimiento (unid/ha) | | 28.700 | 28.700 | 28.700 | 28.700 | 28.700 | 28.700 | 28.700 | 28.700 | 28.700 | 28.700 |
| Precio (\$/unid) | | 489 | 489 | 489 | 489 | 489 | 489 | 489 | 489 | 489 | 489 |
| INGRESOS TOTALES (miles \$) | | 14.034 | 14.034 | 14.034 | 14.034 | 14.034 | 14.034 | 14.034 | 14.034 | 14.034 | 14.034 |

EGRESOS (miles \$)

| | | | | | | | | | | | |
|---------------------------------------|--|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Costos fijos de producción | | 5.007 | 5.007 | 5.007 | 5.007 | 5.007 | 5.007 | 5.007 | 5.007 | 5.007 | 5.007 |
| Mano de obra | | 1.475 | 1.475 | 1.475 | 1.475 | 1.475 | 1.475 | 1.475 | 1.475 | 1.475 | 1.475 |
| Maquinaria | | 169 | 169 | 169 | 169 | 169 | 169 | 169 | 169 | 169 | 169 |
| Insumos | | 2.233 | 2.233 | 2.233 | 2.233 | 2.233 | 2.233 | 2.233 | 2.233 | 2.233 | 2.233 |
| Administración y agua | | 330 | 330 | 330 | 330 | 330 | 330 | 330 | 330 | 330 | 330 |
| Arriendo (costo oportunidad) | | 800 | 800 | 800 | 800 | 800 | 800 | 800 | 800 | 800 | 800 |
| Costos variables de producción | | 3.752 | 3.752 | 3.752 | 3.752 | 3.752 | 3.752 | 3.752 | 3.752 | 3.752 | 3.752 |
| Mano obra cosecha | | 900 | 900 | 900 | 900 | 900 | 900 | 900 | 900 | 900 | 900 |
| Maquinaria cosecha | | 69 | 69 | 69 | 69 | 69 | 69 | 69 | 69 | 69 | 69 |
| Insumos | | 2.545 | 2.545 | 2.545 | 2.545 | 2.545 | 2.545 | 2.545 | 2.545 | 2.545 | 2.545 |
| Intereses | | 238 | 238 | 238 | 238 | 238 | 238 | 238 | 238 | 238 | 238 |

Inversiones

| | | | | | | | | | | | |
|--------------------------------------|--------|-------|-------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| Manto térmico | 638 | | 638 | | 638 | | 638 | | 638 | | 638 |
| Bins | 330 | | | | | 330 | | | | | |
| Plástico túnel | 1.100 | | 1.100 | | 1.100 | | 1.100 | | 1.100 | | 1.100 |
| Arcos para túnel | 165 | | | | | | | | | | |
| FLUJO NETO DE CAJA (miles \$) | -2.233 | 5.275 | 3.537 | 5.275 | 3.537 | 4.945 | 3.537 | 5.275 | 3.537 | 5.275 | 3.537 |
| FLUJO NETO DE CAJA ACUMULADO | -2.233 | 3.042 | 6.579 | 11.854 | 15.392 | 20.337 | 23.874 | 29.149 | 32.686 | 37.961 | 41.498 |

| | |
|---|--------|
| TIR% | 217% |
| VAN (12%) miles \$ | 22.753 |
| Periodo recuperación de la inversión | Año 1 |

Fuente: adaptado del proyecto precursor.

Cuadro 12. Flujo análisis económico 1 hectárea de melón en micro túnel cosechado en noviembre con sistema Geochilly y pozo de reinyección

| Ítems/ Años | 0 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 |
|---------------------------------------|---------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| Rendimiento (unid/ha) | | 28.700 | 28.700 | 28.700 | 28.700 | 28.700 | 28.700 | 28.700 | 28.700 | 28.700 | 28.700 |
| Precio (\$/unid) | | 707 | 707 | 707 | 707 | 707 | 707 | 707 | 707 | 707 | 707 |
| INGRESOS TOTALES (miles \$) | | 20.291 | 20.291 | 20.291 | 20.291 | 20.291 | 20.291 | 20.291 | 20.291 | 20.291 | 20.291 |
| EGRESOS (miles \$) | | | | | | | | | | | |
| Costos Fijos de Producción | | 5.007 | 5.007 | 5.007 | 5.007 | 5.007 | 5.007 | 5.007 | 5.007 | 5.007 | 5.007 |
| Mano de obra | | 1.475 | 1.475 | 1.475 | 1.475 | 1.475 | 1.475 | 1.475 | 1.475 | 1.475 | 1.475 |
| Maquinaria | | 169 | 169 | 169 | 169 | 169 | 169 | 169 | 169 | 169 | 169 |
| Insumos | | 2.233 | 2.233 | 2.233 | 2.233 | 2.233 | 2.233 | 2.233 | 2.233 | 2.233 | 2.233 |
| Administración y agua | | 330 | 330 | 330 | 330 | 330 | 330 | 330 | 330 | 330 | 330 |
| Arriendo (costo oportunidad) | | 800 | 800 | 800 | 800 | 800 | 800 | 800 | 800 | 800 | 800 |
| Costos variables de producción | | 3.752 | 3.752 | 3.752 | 3.752 | 3.752 | 3.752 | 3.752 | 3.752 | 3.752 | 3.752 |
| Mano obra cosecha | | 900 | 900 | 900 | 900 | 900 | 900 | 900 | 900 | 900 | 900 |
| Maquinaria cosecha | | 69 | 69 | 69 | 69 | 69 | 69 | 69 | 69 | 69 | 69 |
| Insumos | | 2.545 | 2.545 | 2.545 | 2.545 | 2.545 | 2.545 | 2.545 | 2.545 | 2.545 | 2.545 |
| Intereses | | 238 | 238 | 238 | 238 | 238 | 238 | 238 | 238 | 238 | 238 |
| Inversiones | | | | | | | | | | | |
| Estudios hidrogeológicos | 5.000 | | | | | | | | | | |
| Materiales Proyecto Geochilly | 2.708 | | | | | 1.354 | | | | | |
| Pozo extracción | 8.000 | | | | | | | | | | |
| Pozo reinyección | 3.500 | | | | | | | | | | |
| Manto térmico | 638 | | 638 | | 638 | | 638 | | 638 | | 638 |
| Bins | 330 | | | | | 330 | | | | | |
| Plástico túnel | 1.100 | | 1.100 | | 1.100 | | 1.100 | | 1.100 | | 1.100 |
| Arcos para túnel | 165 | | | | | | | | | | |
| FLUJO NETO DE CAJA (miles \$) | -21.441 | 11.532 | 9.794 | 11.532 | 9.794 | 9.848 | 9.794 | 11.532 | 9.794 | 11.532 | 9.794 |
| FLUJO NETO DE CAJA ACUMULADO | -21.441 | -9.909 | -116 | 11.416 | 21.210 | 31.058 | 40.851 | 52.383 | 62.177 | 73.709 | 83.502 |

| | |
|---|--------|
| TIR% | 49% |
| VAN (12%) miles \$ | 38.128 |
| Periodo recuperación de la inversión | Año 3 |

Fuente: adaptado del proyecto precursor.

Cuadro 13. Flujo análisis económico 1 hectárea de melón en micro túnel cosechado en noviembre con sistema Geochilly sin pozo de reinyección

| Ítems/ Años | 0 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 |
|---------------------------------------|---------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| Rendimiento (unid/ha) | | 28.700 | 28.700 | 28.700 | 28.700 | 28.700 | 28.700 | 28.700 | 28.700 | 28.700 | 28.700 |
| Precio (\$/unid) | | 707 | 707 | 707 | 707 | 707 | 707 | 707 | 707 | 707 | 707 |
| INGRESOS TOTALES (miles \$) | | 20.291 | 20.291 | 20.291 | 20.291 | 20.291 | 20.291 | 20.291 | 20.291 | 20.291 | 20.291 |
| EGRESOS (miles \$) | | | | | | | | | | | |
| Costos Fijos de Producción | | 5.007 | 5.007 | 5.007 | 5.007 | 5.007 | 5.007 | 5.007 | 5.007 | 5.007 | 5.007 |
| Mano de obra | | 1.475 | 1.475 | 1.475 | 1.475 | 1.475 | 1.475 | 1.475 | 1.475 | 1.475 | 1.475 |
| Maquinaria | | 169 | 169 | 169 | 169 | 169 | 169 | 169 | 169 | 169 | 169 |
| Insumos | | 2.233 | 2.233 | 2.233 | 2.233 | 2.233 | 2.233 | 2.233 | 2.233 | 2.233 | 2.233 |
| Administración y agua | | 330 | 330 | 330 | 330 | 330 | 330 | 330 | 330 | 330 | 330 |
| Arriendo (costo oportunidad) | | 800 | 800 | 800 | 800 | 800 | 800 | 800 | 800 | 800 | 800 |
| Costos variables de producción | | 3.752 | 3.752 | 3.752 | 3.752 | 3.752 | 3.752 | 3.752 | 3.752 | 3.752 | 3.752 |
| Mano obra cosecha | | 900 | 900 | 900 | 900 | 900 | 900 | 900 | 900 | 900 | 900 |
| Maquinaria cosecha | | 69 | 69 | 69 | 69 | 69 | 69 | 69 | 69 | 69 | 69 |
| Insumos | | 2.545 | 2.545 | 2.545 | 2.545 | 2.545 | 2.545 | 2.545 | 2.545 | 2.545 | 2.545 |
| Intereses | | 238 | 238 | 238 | 238 | 238 | 238 | 238 | 238 | 238 | 238 |
| Inversiones | | | | | | | | | | | |
| Estudios hidrogeológicos | 5.000 | | | | | | | | | | |
| Materiales Proyecto Geochilly | 2.708 | | | | | 1.354 | | | | | |
| Pozo extracción | 8.000 | | | | | | | | | | |
| Manto térmico | 638 | | 638 | | 638 | | 638 | | 638 | | 638 |
| Bins | 330 | | | | | 330 | | | | | |
| Plástico túnel | 1.100 | | 1.100 | | 1.100 | | 1.100 | | 1.100 | | 1.100 |
| Arcos para túnel | 165 | | | | | | | | | | |
| FLUJO NETO DE CAJA (miles \$) | -17.941 | 11.532 | 9.794 | 11.532 | 9.794 | 9.848 | 9.794 | 11.532 | 9.794 | 11.532 | 9.794 |
| FLUJO NETO DE CAJA ACUMULADO | -17.941 | -6.409 | 3.384 | 14.916 | 24.710 | 34.558 | 44.351 | 55.883 | 65.677 | 77.209 | 87.002 |

| | |
|--------------------------------------|--------|
| TIR% | 59% |
| VAN (12%) miles \$ | 41.628 |
| Periodo recuperación de la inversión | Año 2 |

Fuente: adaptado del proyecto precursor.

ANEXO 2. Bibliografía consultada

Abarca, P (ed). 2017. *Manual de manejo agronómico para cultivo de melón Cucumis melo L.* Boletín INIA N° 01, Instituto de Desarrollo Agropecuario - Instituto de Investigaciones Agropecuarias. Chile.

Bascopé, A. 2013. *Efecto heladas de septiembre en frutales y hortalizas entre la Región de Coquimbo y la del Maule.* Oficina de Estudios y Políticas Agrarias. Chile

Bravo, R., Quintana, J. y M. Reyes (eds). 2020. *Heladas. Factores, tendencias y efectos en frutales y vides.* Boletín INIA N° 417. Instituto de Investigaciones Agropecuarias. Chile.

IALE Tecnología. 2016. *Estudio de Vigilancia Tecnológica Sistemas de Control y Manejo de Heladas para el Sector Agrícola Nacional.* Serie Estudios para la Innovación, Fundación para la Innovación Agraria. Chile.

GECO Enterprises Ltda. 2016. *Estudio de factibilidad técnica y económica de usar energía geotérmica para el control de heladas.* Proyecto EST 2015-0308, Convocatoria Estudios y Proyectos de Innovación Agraria para Monitoreo, Control y Gestión de Heladas de Impacto Hortofrutícola en las Regiones de O'Higgins y Maule. Fundación para la Innovación Agraria. Chile.

INIA, DMC, FDF y Vinos de Chile. 2016. *Heladas. Tipos, medidas de prevención y manejos posteriores al daño. Guía de uso del sitio.* Proyecto PYT 2015-0305 realizado por Instituto de Investigaciones Agropecuarias, Vinos de Chile, Dirección Meteorológica de Chile y Fundación para el Desarrollo Frutícola. Convocatoria Estudios y Proyectos de Innovación Agraria para Monitoreo, Control y Gestión de Heladas de Impacto Hortofrutícola en las regiones de O'Higgins y del Maule. Fundación para la Innovación Agraria. Chile.

Kurpaska, S.; Janowski, M.; Gliniak, M.; Krakowiak-Bal, A.; and Ziemiańczyk, U. 2021. *The Use of Geothermal Energy to Heating Crops under Cover: A Case Study of Poland.* Energies 2021, 14, 2618. <https://doi.org/10.3390/en14092618>

Seisdedos, M. 2012. *Climatización de edificios por medio del intercambio de calor con el subsuelo y agua subterránea; aspectos a considerar en el contexto local.* Tesis para optar al título de Geólogo. Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Departamento de Geología.

Snyder, R. J. de Melo-Abreu. 2010. *Protección contra las heladas: fundamentos, práctica y economía*. Serie sobre el Medio Ambiente y los Recursos Naturales N° 10. Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación.

Van Nguyen, M., Arason, S., Gissurarson M. and Pálsson, P.G. 2015. *Uses of geothermal energy in food and agriculture – Opportunities for developing countries*. Rome, FAO.

156



SERIE EXPERIENCIAS DE INNOVACIÓN PARA EL EMPRENDIMIENTO AGRARIO
