

GENERACIÓN E INTEGRACIÓN DE TECNOLOGÍAS DESTINADA AL AHORRO DE AGUA DE RIEGO EN DOS REGIONES PRODUCTORAS DE FRUTA EN CHILE

DEVELOPMENT AND INTEGRATION OF TECHNOLOGIES TO SAVE IRRIGATION WATER IN TWO FRUIT-PRODUCING REGIONS IN CHILE

Rodrigo H. Callejas¹, Juan Vera², Maximiliano Rioseco¹, Fernanda Prohens¹, Helen Osorio¹, Paulina Pino, Jaime Navarrete¹, Rodrigo Gálvez¹.

Resumen:

Según la Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura (UNESCO), el 70% del agua dulce a nivel mundial es utilizada por la agricultura y considerando que Chile es uno de los principales productores de fruta que exporta a todo el mundo, el Estado, a través de los Fondos de Innovación para la Competitividad (regiones de Atacama y O'Higgins) le encomendó al Centro Regional de Estudios Agronómicos de la Universidad de Chile (UCHILECREA), desarrollar una estrategia para enfrentar la escasez hídrica, ahorrar agua de riego a nivel predial y en lo posible, permitir mejorar los rendimientos, calidad de la fruta y el potencial productivo de los huertos frutales. A partir del año 2007, se inició en la Región de Atacama un estudio de nuevas tecnologías que permitieran abordar, en forma eficiente y objetiva, el manejo del recurso hídrico a nivel predial, como complemento a los esfuerzos de inversión pública que realizaba el Estado a nivel extrapredial o de cuenca. Una vez generado y validado el conocimiento en unidades pequeñas, se implementó un programa de transferencia tecnológica en todo Atacama, ampliándose el año 2011 a la Región de O'Higgins, lo que incluyó el uso de sondas de capacitancia para el monitoreo de la humedad en el suelo de lectura discontinua en calicatas (TDR100, POGO, WET Sensor), en tubos de acceso (Diviner), de lectura continua (Enviroscan, Hydra Probe) y telemetría (Plus y plataforma Wiseconn). El control se complementó con el uso de la bomba de presión tipo Scholander móvil modelo Pump-up, usando valores de potencial xilématico relacionados con el déficit de presión de vapor como criterio de toma de decisión. Se logró instaurar la importancia del recurso hídrico y la incorporación de tecnología en el manejo agrícola, logrando ahorros de entre 20 a 50 % del uso de agua de riego, con una disminución proporcional de energía eléctrica, incrementando el potencial productivo y calidad de fruta. En muchas ocasiones, se estima equivocadamente que el éxito de un programa como éste depende solamente del acceso a nuevas tecnologías o al conocimiento generado por investigación de alto impacto, sin embargo, la experiencia ha demostrado que en la agricultura es fundamental complementar lo anterior con la adaptación a la realidad local, validación en terreno, transferencia tecnológica permanente, conocimiento práctico y respeto por la cultura en donde se enmarca la intervención.

Palabras clave: Sonda de capacitancia, FDR, TDR, humedad en suelo, manejo eficiente del agua de riego, frutales.

Abstract:

According to UNESCO, agriculture accounts for the 70% of global freshwater consumption, and Chile is one of the main fruit exporters worldwide. Through the use of Competitiveness and Innovation Funds, the Regional Center of Agronomic Studies of the University of Chile (UCHILECREA) has developed a technological package to face water scarcity. The package was designed to save irrigation water, and to improve fruit quality and productive capacity. The method included the use of soil water content capacitance probes (TDR100, POGO, WET sensor), access tubes' probes (Diviner), continuous measurement probes (Enviroscan, Hydra Probe) and telemetry (Plus and Wiseconn platform). Thus, the decision-making of irrigation frequency considers the maximum dynamic characteristics of the soil. Irrigation management was complemented with the use of a movable Scholander-like pressure bomb (Pump Up) using xylomatic potential as standard criteria. In addition, climatic information from meteorological stations was used. A technological transference team, constituted by agricultural engineers, developed an irrigation baseline and validated the study programs. Importance of hydric resources and incorporation of technology in agricultural management were established, generating 20 to 50% savings on irrigation water and electricity use. Better conditions of the radical system, an increase of the productive potential and fruit quality were also accomplished. Programs like this owe its success not only to the access to new technologies or investigation-generated knowledge, but also to a local environment adaptation, practical knowledge and respect for the culture in which the intervention is delimited.

Key Words: Capacitance probes, FDR, TDR, efficient management of irrigation water, fruit trees.

¹ Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Agronómicas, Centro de Regional de Estudios Agronómicos UCHILECREA. Santa Rosa 11315, La Pintana, Santiago, Chile. rcallejas.uchilecrea@gmail.com; rcalleja@uchile.cl. www.uchilecrea.cl

² CEBAS, Murcia, España.

INTRODUCCIÓN

Según la Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura (UNESCO), el 70% del agua a nivel mundial es utilizada por la agricultura, siendo el factor de mayor importancia para la producción de fruta de alta calidad. Sin embargo, su óptimo manejo debe asegurar no solamente la obtención de producciones rentables, sino que debe contribuir a generar árboles capaces de producir de manera continua (Ruiz-Sánchez y Girona, 1995), manteniendo un follaje y sistema radical eficiente que asegure un máximo potencial productivo (Callejas *et al.* 2009; Callejas *et al.* 2012).

En Chile, la zona productora de fruta se caracteriza por poseer excelentes condiciones climáticas, con precipitaciones concentradas en invierno, con la cordillera como un reservorio de agua en forma de nieve y una serie de cuencas que bajan de cordillera al mar con fuerte pendiente (Banco Mundial, 2011). Si bien existe una importante disponibilidad de agua para riego proveniente de cauces superficiales, se constata que cerca del 84% de ella se pierda en el mar por falta de infraestructuras de acumulación (embalses) y por otro lado en materia de aguas subterráneas, existe una situación generalizada de sobre-otorgamiento (CNR, 2013). La fruticultura en Chile representa un 4% del PIB del país (un 10% considerando a la agroindustria) (SNA, 2008) y generando más de 400 mil empleos en plena temporada. Se señala que los incrementos en el aporte de la agricultura al PIB hacia el año 2011, se debieron principalmente al buen desempeño de la fruticultura, en especial la exportación de arándanos, cerezas y uva de mesa (ODEPA, 2012). Es así como se ha constatado que las plantaciones de frutales se incrementan todos los años, destinados principalmente a exportación (SNA, 2013), cultivándose en las regiones de Atacama y O'Higgins, 11.232 y 75.238 ha de frutales, respectivamente. Si se entiende la fruticultura como un motor de la economía y de gran interés para el sector privado, es de esperar que la superficie siga aumentando y con ello el consumo de agua dulce para riego, compitiendo principalmente con el consumo humano y la minería.

La Dirección General de Aguas (DGA), organismo del Estado de Chile que se encarga de promover la gestión y administración del recurso hídrico, ha propuesto la variación general de disponibilidad hídrica asociada al cambio climático según las proyecciones de estudios realizados por la Universidad de Chile para la Corporación Nacional de Medioambiente (CONAMA), señalando un importante déficit a nivel país (Banco Mundial, 2011). En la macrozona norte, donde se ubica Atacama, se ha determinado un déficit estructural que se incrementa exponencialmente en el tiempo (-397; -873 y -1.299 millones de m³/año, en 1996, 2010 y 2025; respectivamente) conformando un enorme desafío para el país si es que desea seguir desarrollando

la fruticultura y otras actividades económicas en la zona. Para el caso de la zona centro-sur, donde se ubica la región de O'Higgins, si bien el balance es positivo, muestra una disminución preocupante en el tiempo (16.462, 15.173 y 12.688 millones de m³/año, en 1996, 2010 y 2025; respectivamente).

Frente a estos grandes desafíos, es fundamental implementar estrategias o paquetes tecnológicos a macro escala considerando aspectos que relacionan el conocimiento científico, el mecanismo de transferencia tecnológica que responda a la realidad de la zona intervenida y su relación con aspectos culturales y económicos de los agricultores y otros actores relevantes del medio.

OBJETIVOS

El objetivo general del trabajo fue disminuir el consumo de agua de riego intrapredial en huertos frutales. Los objetivos específicos propuestos fueron: a) implementar nuevas tecnologías a nivel predial, destinadas a objetivar el criterio de riego, b) disminuir el consumo de agua y por consecuencia, la energía eléctrica y c) generar un programa de transferencia tecnológica que asegure la adopción de la estrategia por parte de los agricultores.

ANTECEDENTES

Región Atacama

La Región de Atacama pertenece a la macrozona norte de Chile y se ubica entre 25°18' y 29° 43' latitud sur y entre los 68° 19' y 71° 30' de longitud oeste, alcanzando una superficie de 75.573,3 km² (Figura 1). Presenta un clima desértico (según clasificación de Köppen), con variaciones desde la costa a la montaña y, según lo señalado por la Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura (UNESCO, 2010), la totalidad de su superficie es clasificada como una zona árida considerando su régimen hídrico. Las precipitaciones son escasas, concentrándose principalmente en los meses de invierno, no superando los 100 mm año⁻¹ y variando su distribución según su cercanía al mar y altitud, situación que se determina por la influencia del Anticiclón del Pacífico (Juliá *et al.*, 2008). Las zonas agrícolas se localiza en 2 valles principales; Copiapó y Huasco. La cuenca del río Copiapó posee una superficie de 18.400 km² y este nace de la unión de los ríos Jorquera, Pulido y Manflas (DGA, 2004a). El Valle de Huasco, que resulta de la unión de los ríos de El Tránsito y del Carmen, se localiza al sur de la Región de Atacama y su hoya hidrográfica es de 9.850 km² (DGA, 2004b).

En la cuenca del Copiapó existe un sobre otorgamiento del recurso hídrico y la demanda supera a la oferta existente, con niveles de recarga del acuífero inferiores a los volúmenes de extracción (Fuster *et al.*, 2009). En la cuenca del río Huasco aún no se da esta situación, sin embargo, el embalse

Santa Juana durante el periodo marzo 2013 a febrero 2014, presentó un 69,6% menos de su capacidad promedio de almacenamiento histórico según datos de la DGA (2014). Los cultivos principales de la Región de Atacama son la uva de mesa, con una superficie de 8.050,7 ha y el olivo, con una superficie de 2.417,1 ha. El 91,06% de las plantaciones tienen riego tecnificado, principalmente goteo (ODEPA-CIREN, 2013).

Región de O'Higgins

En la Región del Libertador General Bernardo O'Higgins, ubicada entre 33°51' y 35°01' de latitud sur y desde 70°02' de longitud oeste hasta el océano pacífico (Figura 1), se enfrenta un panorama difícil respecto del recurso hídrico, declarándose, durante la temporada 2011-2012, en la categoría de emergencia agrícola en 22 de sus comunas debido al déficit hídrico severo.

La región presenta un clima templado-cálido (según la clasificación de Köppen) con lluvias invernales y estación seca prolongada (7 a 8 meses), con precipitaciones variables desde la costa a Los Andes, las que van desde los 500 mm a los 2000 mm en la alta cordillera, respectivamente. Las últimas se concentran como precipitaciones nivosas

principalmente, las que se traducen en un gran reservorio de agua contenida en invierno, y que en primavera-verano se derrite y es utilizada por la región (INE, 2007). Según los datos proporcionados por la Red Agrícola FDF-INIA-DMC (Fundación para el Desarrollo Frutícola- Instituto de Investigaciones Agropecuarias- Dirección Meteorológica de Chile), las precipitaciones acumuladas de enero al mes de septiembre, entre el año 2011 al 2013, presentan un déficit del 58% en la precordillera, 47 % en valles interiores y 56% en los valles con influencia marina.

A nivel nacional, la VI Región presenta la mayor superficie de frutales con riego, con un total de 59.333,3 ha (27,4 % del total de hectáreas bajo riego a nivel nacional) (CIREN, 2003), de las cuales un 68,2 % están bajo riego por surco y tendido y sólo un 31,4 % con sistemas tecnificados (goteo, microaspersión y aspersión), lo que representa baja eficiencia en el uso del agua al momento de regar.

El sistema hidrográfico que abastece del recurso hídrico a la región está constituido por el Río Rapel y sus afluentes, los ríos Cachapoal y Tinguiririca. Dicho sistema de aguas, Rapel-Cachapoal y Tinguiririca, debe ser capaz de sustentar las diversas demandas de la región, como la producción de energía eléctrica, la industria, la minería, el consumo de agua por la población y la agricultura.

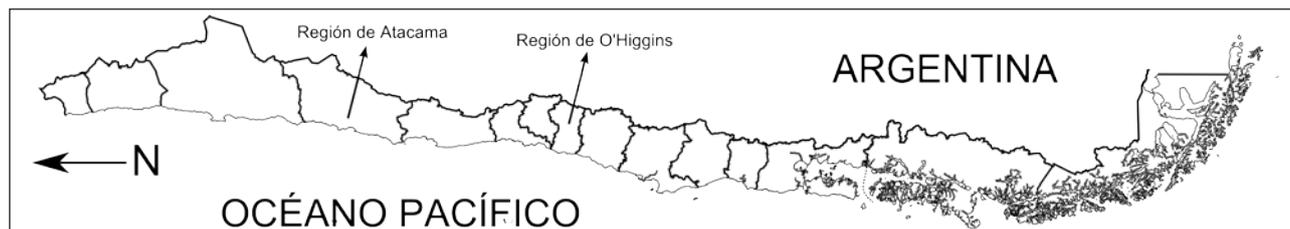


Figura 1. Ubicación de las Regiones de Atacama y O'Higgins.

Integración de tecnologías (Paquete tecnológico)

El diagnóstico realizado en el año 2005 respecto de los criterios utilizados para regar en Atacama, arrojó que un 75% de los productores utilizaban la observación de calicatas con diferentes grados de periodicidad, un 5% según la evapotranspiración (Eto de bandeja tipo A o estaciones meteorológicas) y un 20% replicaba o copiaba a otros productores vecinos, sobre todo a aquellos grandes que tenían un asesor técnico reconocido en el medio, quien utilizaba la observación de calicatas.

Observación de calicatas y determinación del contenido del agua al tacto. Esta técnica se comenzó a implementar masivamente hacia el final de la década de los años 80, como respuesta a los malos resultados que se lograron al utilizar variables climáticas (evapotranspiración de referencia, Eto; coeficiente de cultivo, Kc; evapotranspiración de cultivo, ETc) o tensiómetros para definir los criterios de riego. Si bien ayudó a mejorar en parte la gestión del riego, presenta importantes deficiencias: **1)**

es subjetiva, dado que la decisión del tiempo y frecuencia de riego se realiza sobre percepciones, **2)** ineficiente método para determinar el tiempo de riego al no determinar el frente de avance del agua, lo que favorece las pérdidas por percolación profunda, **3)** los datos, al no ser objetivos, no pueden ser guardados y utilizados para un análisis integral de la temporada, **4)** toda decisión requiere del administrador y/o asesor, demandando tiempo de ellos con un alto costo alternativo, **5)** para el productor es difícil delegar esta tarea a mandos medios calificados, **6)** no es posible compartir lo observado, dado que solamente se puede señalar; "había agua, estaba muy mojado, faltaba en un sector del bulbo de riego o el riego llegó al fondo de la calicata", **7)** se requiere volver a repetir todos los años la práctica de "calicateo" en todo el predio y **8)** la hechura manual de una calicata tiene un costo aproximado de entre US\$ 15 a 20 por persona, requiriéndose 2 personas para lograr 3 calicatas por día; presentándose como alternativa la inversión en una mini-excavadora.

Frente a este panorama, se definió la siguiente estrategia técnica: **(A)** determinaciones objetivas y discontinuas del contenido de agua del suelo y/o sales utilizando equipos de reflectometría en el dominio del tiempo, TDR (Time Domain Reflectometry) y reflectometría en el dominio de la frecuencia, FDR (Frequency domain reflectometry) (Campbell y Mulla, 1990; Charlesworth, 2000; Callejas *et al.* 2002; Evett *et al.*, 2002; Callejas *et al.* 2004; Martín de Santa Olalla *et al.* 2005; Callejas *et al.* 2006; Gálvez y Callejas, 2012), aprovechando las mismas calicatas realizadas por los productores y motivando a la incorporación gradual de nuevas tecnologías. Esta técnica permite presentar la información en forma gráfica facilitando la interpretación del contenido de agua del suelo y fortalecer el criterio de riego. Si bien es un avance, sigue presentando la debilidad de no permitir eficientemente, de acuerdo al desarrollo de la planta y evolución climática de la zona, determinar la frecuencia y tiempo de riego dado la carga de trabajo, costo y oportunidad de hechura de las calicatas **(B)** determinaciones objetivas y discontinuas del contenido de agua del suelo, utilizando sondas Diviner (Sentek Sensor Technologies, Australia), permitiendo disminuir la construcción de calicatas, **(C)** control del riego con sondas de capacitancia de lectura continua EnviroScan (Sentek Sensor Technologies, Australia), plataforma Plus y/o Wiseconn. La selección de estos equipos se basó en la literatura científica, antecedentes de uso en terreno y durabilidad (Dean *et al.* 1987; Paltineanu y Starr, 1997 y Starr y Paltineanu, 1998; Evett *et al.*, 2002; IAEA, 2008; Starr *et al.* 2009; Vera *et al.* 2010; Callejas *et al.*, 2013). Adicionalmente y para algunos casos, se utilizó el equipo Hydra Probe Soil Sensor (STEVENS, 2007; López Riquelme *et al.* 2009), **(D)** se complementó la información y toma de decisión utilizando evaluaciones de ETo (Penman-Monteith) proveniente de estaciones meteorológicas

(Allen *et al.* 1998; Morales, 2008; Santos *et al.* 2010), **(E)** finalmente, apoyo permanente a los productores fortaleciendo la capacitación y transferencia tecnológica (Callejas *et al.*, 2011; Universidad de Chile, 2012).

METODOLOGÍA

El estudio se llevó a cabo en las regiones de Atacama (valles de Copiapó y Huasco), iniciado el año 2007 y O'Higgins, iniciado el año 2011. En Atacama, se trabajó con olivos y vid de mesa, mientras que en O'Higgins, con diez especies; arándano, cerezo, ciruelo europeo, duraznero, frutilla, kiwi, manzano, naranjo, nogal y uva de mesa. El equipo de trabajo estuvo conformado por profesores especialistas de la Universidad de Chile, cerca de 8 Ingenieros Agrónomos, mucho de ellos con maestrías en temáticas relacionadas con la problemática, encargados de la capacitación y transferencia tecnológica, más el apoyo de a lo menos 15 alumnos de pre y post grado, quienes realizaron sus memorias de título y/o tesis de grado en temáticas relacionadas.

Tecnología. La instrumentalización para evaluaciones del contenido de agua en el suelo de lectura discontinua en calicata (Figura 2), fueron el WET Sensor (Delta T), TDR100 (Campbell Scientific) y Pogo Portable Soil Sensor (Stevens). Para evaluaciones de lectura discontinua, a través de tubos de acceso, Diviner (Sentek). En las evaluaciones de lectura continua; sonda Enviroscan (Sentek) e Hydra Probe (Stevens). A nivel de planta, se utilizó la cámara de presión tipo Scholander, modelo Pump-Up (PMS Instruments). A nivel climático, información proveniente de estaciones meteorológicas instaladas en los predios e información de red FDF (Fundación para el Desarrollo Frutícola).

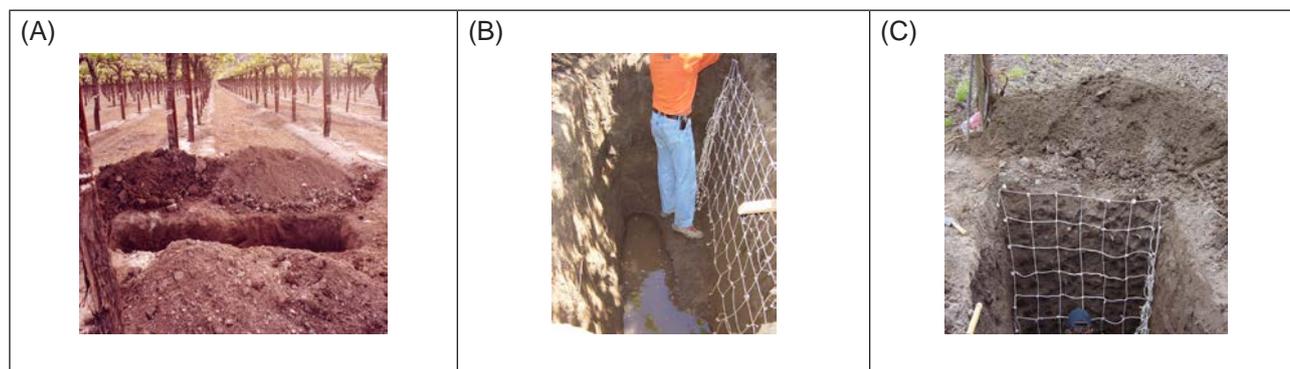


Figura 2. Calicata utilizada para definir criterio de riego (A). Implementación de evaluación sistemática con sondas (B y C).

Unidades de control de la frecuencia y tiempo de riego. La estrategia involucró la instalación y puesta a punto, a modo de plataforma basal, de una red calibrada de sondas Enviroscan en uva de mesa (19), olivos (2), arándanos (2), cerezo (4), ciruelo europeo

(4), duraznero (6), frutilla (1), kiwi (5), manzano (2), naranjo (1) y nogal (2), así como 2 unidades Hydraprobe de apoyo en uva de mesa en suelos salinos. El uso práctico de esta tecnología se realizó de acuerdo a Fares y Alva (2000), Hanson *et al.* (2000), Dukes *et al.* (2007) y Callejas *et al.* (2013). En

la Región de Atacama, las sondas están sobre suelos cuyas texturas varían de franco arenoso a franco, con una profundidad ligera a moderada (máximo 1 m), poco estratificado, con ligera pedregosidad en el perfil y con topografía suavemente ondulada a plana. La salinidad o acumulación de sales solubles en el perfil del suelo, es un problema frecuente en los huertos, especialmente en el Valle de Copiapó, con valores de CE de entre 1 a 3,5 dS m⁻¹. Las sondas de la Región de O'Higgins, se encuentran instaladas en suelos que en su mayoría son de textura franco arcillosa a arcillosa. Corresponden a suelos de topografía plana, profundos, poco estratificados y escasa presencia de piedras en el perfil de suelo.

Unidades de control ampliado. Se amplió la base de datos para la toma de decisión, instalando en diferentes predios tubos de acceso para el equipo Diviner. Adicionalmente, se implementó un sistema de verificación periódica y discontinua del contenido de agua en calicata (2 m de largo y 1,5 m de profundidad), construidas en cada ocasión perpendicularmente a la línea de plantación y a 30 cm desde el tronco de las plantas (Callejas *et al.* 2012), utilizando los equipos TDR100 y Pogo. Como complemento, se apoyó con evaluaciones del potencial xilemático (Navarrete *et al.*, 2010; Gálvez., 2011) usando la cámara de presión modelo Pump-Up, sobre todo en condiciones de suelo de texturas gruesas donde los otros equipos son poco eficientes. Finalmente, se utilizó la evapotranspiración de referencia y la pluviometría proveniente de estaciones meteorológicas, información de apoyo a la interpretación de las lecturas de las sondas de los softwares IrriMax y DropControl.

Evaluaciones. Se consideraron las siguientes: a) volumen de agua en m³/ha/año; b) costo de la energía eléctrica ocupada por ha, c) contenido de agua en calicata, d) evolución del contenido del agua en el suelo, e) evapotranspiración de referencia, f) potencial xilemático, g) producción por hectárea y h) calidad de la fruta, cuando se requirió.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Evapotranspiración de referencia (ET_o)

A modo de caracterización climática de los sitios donde se trabajó, se presenta la evolución de la ET_o anual acumulada en localidades representativas de cada región. La ET_o fue ingresada en el software Irrimax y utilizada como herramienta de apoyo para definir los umbrales, indicadores o parámetros de referencia, denominadas en el uso de sondas de capacitancia de lectura continua como "líneas de gestión" del riego, definidas de acuerdo al análisis de la dinámica de extracción de agua por las plantas (Callejas *et al.* 2013), de manera de facilitar la interpretación de los datos generados por las sondas Enviroscan. Adicionalmente y utilizando los Kc de

los diversos frutales (Zúñiga, 2013), se calculó la ET_c como complemento al trabajo realizado con las sondas de capacitancia.

Para el 90% de la de superficie de Atacama bajo estudio, la ET_o presentó una conducta muy similar en los diferentes años, lo que permitió generar un sistema predictivo, Figura 3A (Morales, 2008). Mediante esta herramienta, al ingresar la ubicación georreferenciada del predio, permitió a los productores que no tienen una estación meteorológica cercana obtener una buena aproximación de la ET_o de la temporada. Para el caso de O'Higgins, en la Figura 3B se muestra la ET_o para 3 localidades en esta región, la que se caracteriza por ser variable entre ellas, sobre todo en primavera, debido a los cambios permanentes que pueden ser observados en el clima local, recomendándose el uso de la ET_o proveniente de estaciones meteorológicas propias o de la red estatal, en la medida que el punto de monitorización se encuentre cerca del predio.

Desarrollo de las estrategias que conforman el paquete tecnológico

Unidades de control de la frecuencia y tiempo de riego. Se optó por no hacer cambios radicales en los criterios de manejo del riego, generando registros objetivos de lo que se venía haciendo en forma tradicional (mostrando el exceso de agua) y contrastando esta información con la literatura. En la Figura 4A y a modo de ejemplo, se presenta el comportamiento de los registros de riego y contenido de agua del suelo en el primer año de trabajo para una unidad demostrativa (uva de mesa var. Flame Seedless, Atacama), dejando claramente de manifiesto que las plantas se desarrollaban permanentemente bajo condiciones de exceso de humedad y ratificando que esta situación era una de las principales razones de la poca abundancia, en el bulbo de riego, de raíces finas y con esto menor potencial productivo (Callejas *et al.*, 2009; Callejas *et al.*, 2012), generándose consumos de agua de riego al año de entre 14.000 a 18.000 m³·ha⁻¹. Con esa información y sabiendo que las plantas no se encontraban en una situación óptima (Malladi y Burns, 2007), se planteó una estrategia destinada a cambiar la frecuencia y tiempo de riego.

El segundo año, se reforzó la estrategia señalando que si se sumaban a esta tarea era posible, adicionalmente al ahorro de agua, bajar los costos de producción a través del ahorro de energía eléctrica, motivando a muchos a realizar los esfuerzos y a comprometerse con el proyecto. En la Figura 4B, se puede observar el comportamiento de la actividad de las mismas plantas de la Figura 4A, una vez implementadas las frecuencias y tiempos de riego óptimos para esa condición en particular, de acuerdo a las líneas de gestión definidas previamente. A diferencia del comportamiento del primer año (Figura 4A), claramente las vides se desarrollaron bajo adecuadas

condiciones de equilibrio entre la disponibilidad de agua y oxígeno, permitiendo un mejor comportamiento de las plantas, lo que es ratificado por Sellés *et al.*

(2000). En este sentido, el contenido de agua no debe ser excesivo, debido a que se dificulta la difusión de oxígeno en el suelo, afectando la respiración de las raíces (Ferreira *et al.*, 2001).

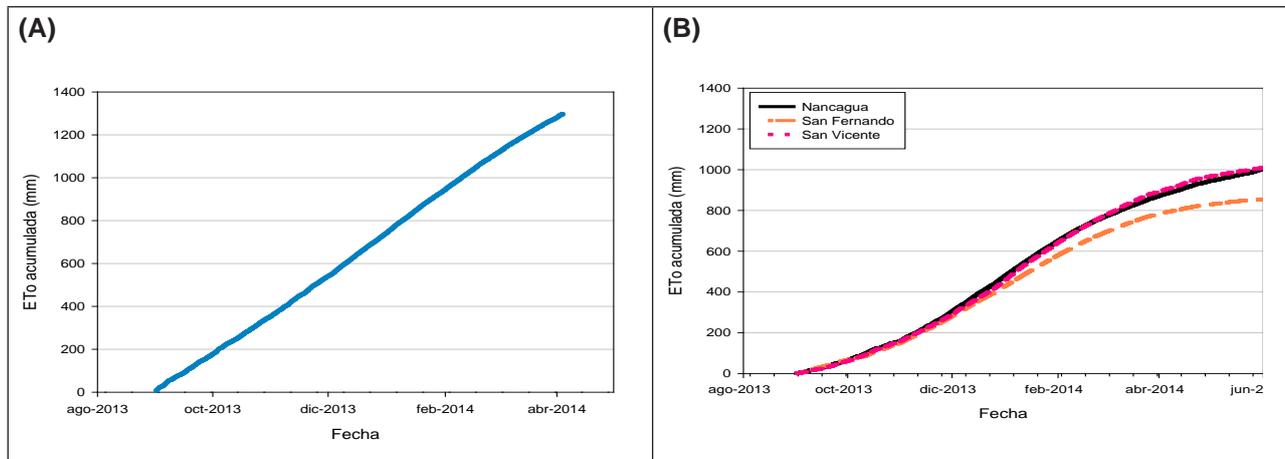


Figura 3. (A) ETo acumulada en Atacama basada en modelo predictivo (Morales, 2008). (B) ETo acumulada en O'Higgins, sectores de Nancagua, San Fernando y San Vicente.

Claramente, el trabajo de 8 años de UCHILECREA ha demostrado que el uso de estos equipos permiten lograr en forma práctica un registro eficiente del comportamiento del agua de riego en el suelo, controlar la actividad de las plantas y efectivamente, ahorrar agua de riego e incrementar la productividad de este recurso, sobre todo en zonas desérticas o que estén sufriendo periodos sequías eventuales. Estos resultados concuerdan con la información presentada por Orozco (2010).

Unidades de control ampliadas. Apesar que la sonda Diviner 2000 se limita a mediciones discontinuas, logró ser una herramienta de apoyo importante permitiendo determinar los zonas del suelo donde los frutales extraen el mayor porcentaje de consumo diario de agua (Hidalgo *et al.*, 2003; Navarrete, 2012); efectividad de la apertura del bulbo de suelo mojado en un evento de riego, instalando una serie de tubos de acceso perpendiculares a la hilera de plantación (Figura 5), e incluso relacionar el contenido de agua del suelo con respuestas fisiológicas de la planta (Olivo *et al.*, 2009; Egea *et al.*, 2009). Adicionalmente, se ratificó que es un instrumento que entrega lecturas confiables respecto del contenido de agua del suelo (Evet *et al.*, 2002; Navarrete, 2012).

Uno de los grandes desafíos que se enfrentó en este trabajo, fue desarrollar una metodología práctica y objetiva que permitiera mejorar la forma tradicional del uso de la calicata, empleada en forma importante por agricultores, técnicos y asesores. Se estimó que si esta técnica era mejorada, más productores se sumarían a la tarea de ahorrar agua sin el miedo de perder potencial productivo de sus frutales. Con el objetivo de ocupar las mismas calicatas utilizadas por los agricultores, se implementaron los siguientes cambios: 1) Realizar las calicatas justo antes de un

nuevo riego, de manera de ajustar la frecuencia y posteriormente a un riego, con el objetivo de evaluar la eficiencia del tiempo de riego. Este cambio, aunque sencillo, fue muy importante dado que lo tradicional era hacer la calicata cuando se pudiera o por calendario (ej: todos los miércoles o cuando podía venir el técnico o asesor). 2) En la pared de la calicata se procedió a cuadricular el suelo o usar una red de 20 x 20 cm (Figura 2), de manera de realizar una evaluación sistemática del contenido de agua en el bulbo de suelo mojado, utilizando equipos TDR o FDR. 3) Los datos se registraban en una planilla de cálculo (Microsoft Excel 2003) y posteriormente se transformaban en información de fácil interpretación por parte de los agricultores a partir de una gráfica de contorno (Systat Software Sigma Plot 11, Figura 6). Así, se pudo definir el tamaño del bulbo de suelo mojado, la eficiencia del sistema de riego, se determinó zonas saturadas entre riego o sectores totalmente limitados de agua, condiciones que asociadas a la presencia de raíces, permitieron mejorar los criterios de riego.

A modo de ejemplo y para un caso en Ciruelo Europeo, en la Figura 6A se observan los dos bulbos de suelo mojado (dos líneas de gotero) pero sin un traslape suficiente, generando un sector seco que inducía estrés hídrico, el que fue corroborado por evaluaciones del potencial xilemático relacionados con el déficit de presión de vapor (DPV), arrojando valores mayores a -0,12 MPa. Con los datos, es posible estimar el momento del riego atendiendo el concepto de "déficit de humedad admisible" (Castilla y Montalvo, 2005). Para esto, la capacidad de campo sonda (CCs; Callejas *et al.*, 2013) se determinó evaluando con los equipos en invierno (Figura 6B), sin transpiración y mínima evaporación desde la superficie del suelo después de una lluvia abundante o un riego profuso (Veihmeyer y Hendrickson, 1950), para asegurar una adecuada dotación de agua, sobre todo en áreas con

bajas precipitaciones. Posteriormente, integrando los análisis de textura de suelo y su interpretación con programa Soil Water Characteristics (Saxton *et al.*, 2006), considerando información bibliográfica

(Moya, 2009), las líneas de gestión obtenidas desde las sondas y experiencia práctica de las evaluaciones de huertos productivos exitosos y la ETo, se definió el umbral de riego, aportando una metodología de toma de decisión más objetiva y con fundamento.

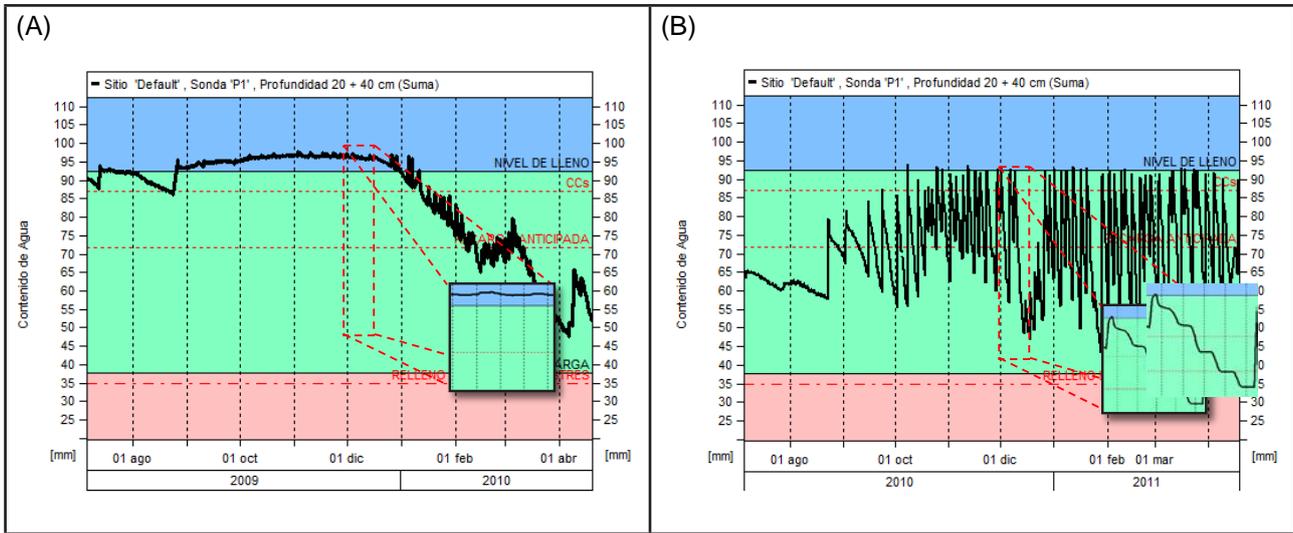


Figura 4. A) Evolución del contenido de agua en el suelo, en el primer año y B) segundo año, evaluado con la sonda Enviroscan Plus y analizados mediante el software Irrimax; uva de mesa, var. Flame Seedless, Atacama.

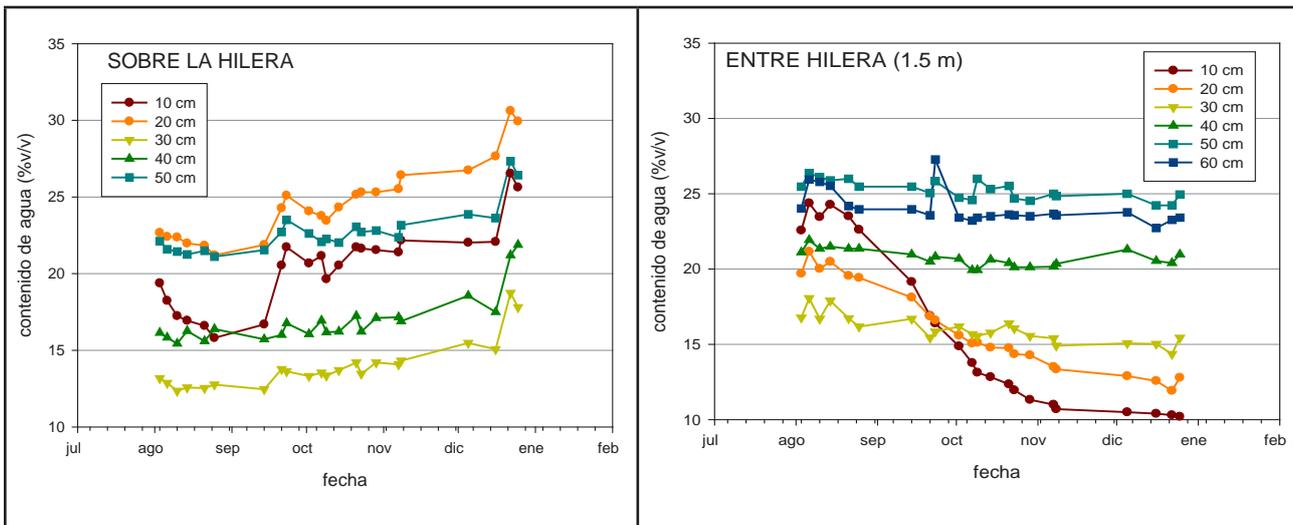


Figura 5. Evolución del contenido de agua del suelo en la sobre hilera y la entre hilera, evaluado con Diviner, suelo franco arenoso, Red Globe, año 2009, Región de Atacama.

Luego de varios años de trabajo en terreno y de mejoramiento de esta metodología, podemos rescatar una serie de ventajas: a) Permite generar información que es factible de ser almacenada digitalmente y utilizada cada año para evaluar el comportamiento de los rendimientos y calidad de la fruta, fortaleciendo la gestión predial, b) efectivamente se pasa de una evaluación subjetiva, con un sin número de desventajas, a una objetiva y basada en cifras numéricas, facilitando los cálculos y generación de índices, c) fortalece, amplía y valida

la información obtenida por las sondas de lecturas continua Enviroscan e Hydra Probe, d) motiva a los productores a invertir en tecnologías para ahorrar recurso hídrico, dado que les permite ver imágenes (como una fotografía) del comportamiento del riego, transformándose en una poderosa herramienta de capacitación, formación y transferencia tecnológica y e) permite asociar el comportamiento del bulbo de suelo mojado con la cantidad, calidad y distribución de las raíces en el suelo.

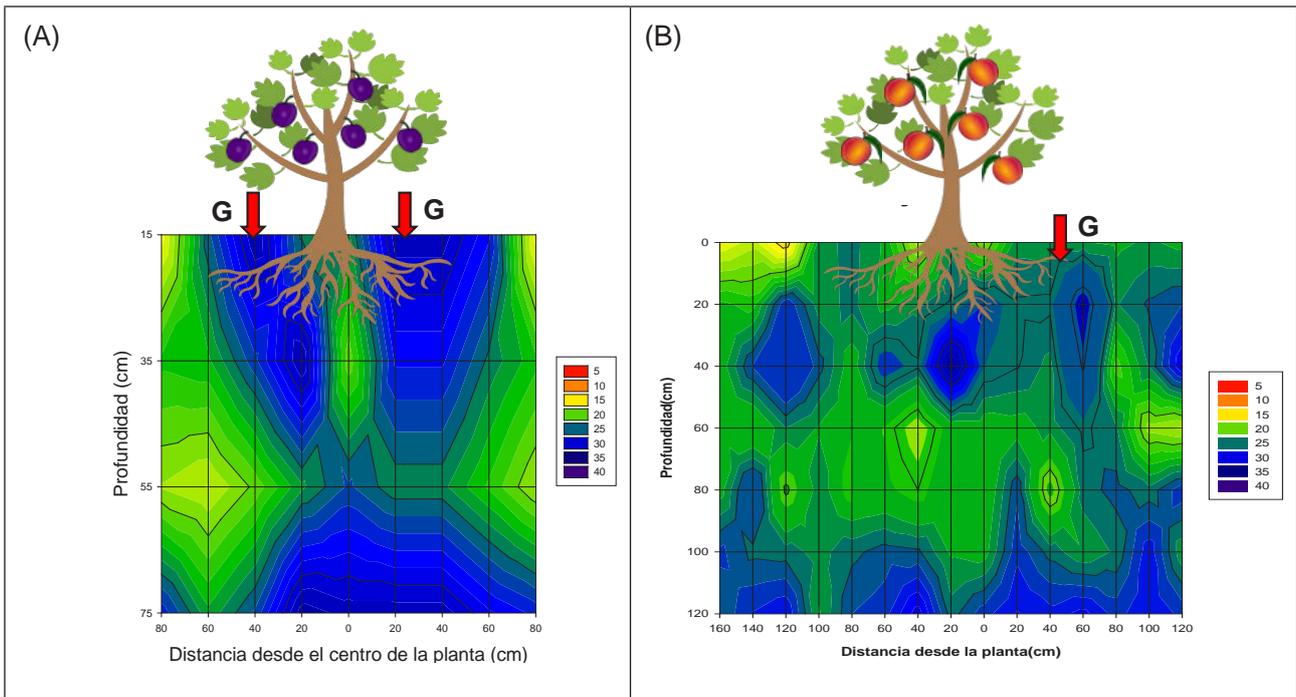


Figura 6. (A) Contenido de agua del suelo (% volumétrico) evaluado con equipo TDR100 en calicata, ciruelo europeo. (B) Determinación de capacidad de campo sonda (CCs) a partir de evaluaciones realizadas en invierno con equipo TDR100, en durazneros (G significa goteros).

Mediciones del potencial xilemático en relación al déficit de presión de vapor (DPV).

Se estimó necesario, como complemento a las otras evaluaciones, implementar una alternativa a nivel de planta de manera de apoyar la toma de decisión, teniendo en cuenta que en la mayoría de los frutales lo central, del punto de vista de la calidad de exportación, es el tamaño de los frutos debiendo prevenir todo tipo de indicio de estrés hídrico a nivel de planta. Otro punto importante, era el hecho de tener huertos en suelos de texturas gruesas, con piedras o exceso de arena en el perfil de suelo, lugares donde las sondas de lectura continua y discontinua en calicata presentaron un comportamiento ineficiente. Dado que la gran mayoría de las técnicas a nivel de plantas carecen de sensibilidad en la detección del estrés hídrico o presentan una alta variabilidad, lo que las hace poco confiables como programadores del riego (Naor, 2008), se optó por el potencial hídrico xilemático evaluado a mediodía (McCutchan y Shackel, 1992; Naor *et al.*, 1999; Choné *et al.*, 2001; Shackel *et al.*, 2000; Patakas *et al.*, 2005; Williams y Trout, 2005; Ferreyra *et al.*, 2006; Doltra *et al.*, 2007; Naor, 2008; Acevedo-Opazo *et al.*, 2010; Stewart *et al.*, 2011), usando la cámara de presión modelo Pump-Up (PMS instruments) y relacionando los valores con el DPV, generando así los criterios de riego o la determinación de períodos de estrés hídrico (Gálvez *et al.*, 2010a, 2010b; Gálvez, 2011; Navarrete *et al.* 2010; Navarrete, 2012). A modo de ejemplo se presenta en la Figura 7 y Tabla 1, uno de los estudios en uva Sultanina, portainjerto Freedom,

en Atacama. Se observa la línea de referencia definida de acuerdo a la metodología de Shackel *et al.*, 2000 y Gálvez *et al.*, 2010a y claramente, para dos tratamientos, la utilización de un exceso de agua al inicio de la temporada (meses de octubre y noviembre) optimizándose el riego a partir de diciembre en adelante.

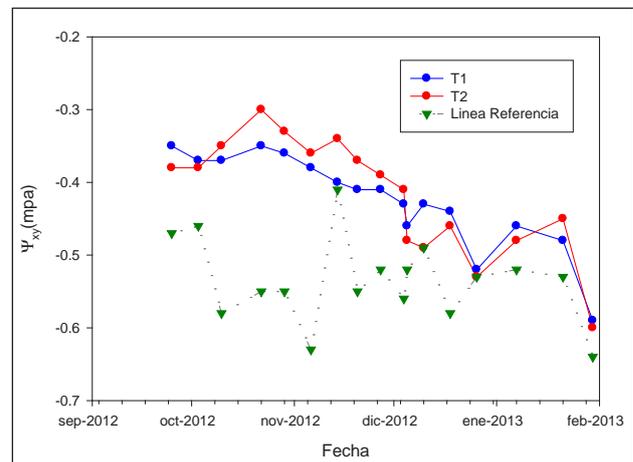


Figura 7. Línea de referencia de potencial xilemático (definida de acuerdo a la metodología de Shackel *et al.*, 2000 y Gálvez *et al.*, 2010a) y comportamiento de los tratamientos T1 (riego con criterio tradicional) y T2 (riego con criterio basado en líneas de gestión), en función del avance en la temporada. Uva Sultanina, portainjerto Freedom, región de Atacama.

Tabla 1. Evaluaciones de cosecha para los tratamientos T1 (riego con criterio tradicional) y T2 (riego con criterio basado en líneas de gestión)

Tratamiento	Volumen de agua aplicada (m ³ ha ⁻¹)	Producción (kg planta ⁻¹)		Peso de baya		Diámetro ecuatorial		Sólidos solubles totales		Acidez de titulación		SS/AT	
T1	10.239	25,37	a	7,43	a	21,84	a	16,10	a	0,95	a	17,11	a
T2	7.752	25,35	a	7,53	a	22,00	a	16,00	a	0,84	a	19,40	a

Ahorro de agua de riego y energía eléctrica. Para el caso de Atacama, se pudo reducir el consumo de agua de riego de entre 20 a 50% respecto a su uso original (Figura 8), con un ahorro de energía proporcionalmente similar valorizado de entre 200 a 1000 US\$/ha. Hubo productores que mencionan haber realizado un menor uso de fertilizantes (entre 20 a 40%) por menores niveles de percolación profunda, situación que debe ser validada de acuerdo al comportamiento de las plantas a largo plazo.

En la Tabla 2 y a modo de ejemplo para Atacama y de acuerdo a Catalán *et al.* (2006), se presentan indicadores para 8 ha en vid de mesa, variedad Red

Globe. Claramente se logró optimizar la eficiencia del uso del agua, así como una mayor eficiencia monetaria de este recurso gracias al incremento de los rendimientos (ej: 22.140 a 31.570 kg ha para el 2008 y 2001, respectivamente) y calidad de la fruta (ej: 50, 30 y 20% a 70, 18 y 12% de fruta grande, mediana y chica para el 2008 y 2011, respectivamente). Esta información deja de manifiesto que la óptima implementación de tecnología no solamente ayudará a optimizar el consumo de agua de riego, bajar el consumo de energía y ahorrar fertilizantes; sino que tendrá un importante impacto sobre la competitividad de los agricultores.

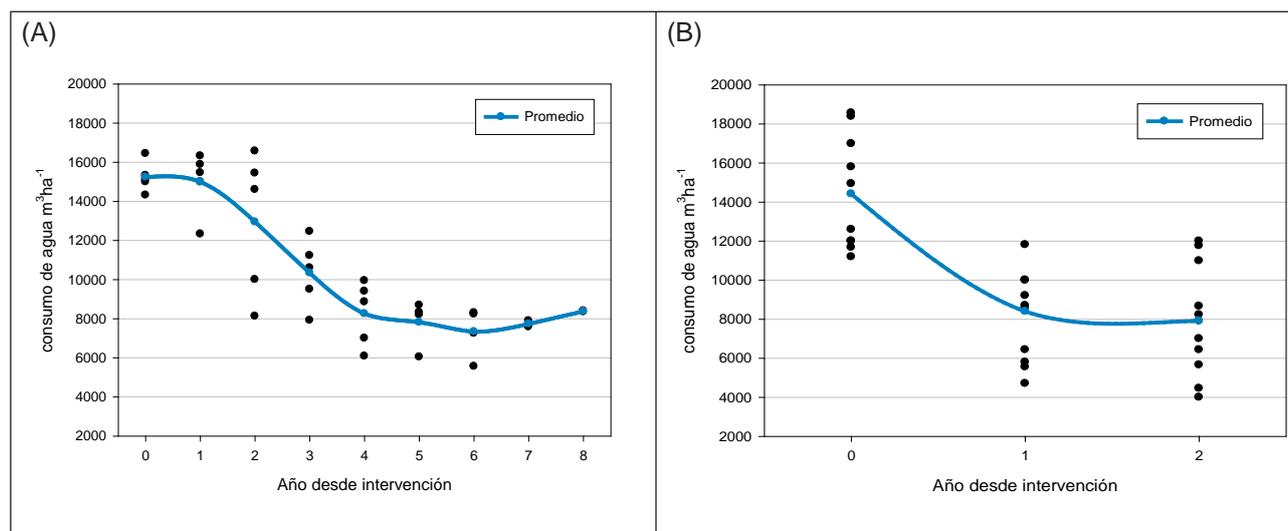


Figura 8. Comportamiento decreciente del promedio de consumo de agua en m³ha⁻¹ en uva de mesa, 8 años de intervención (A) y para un grupo más reciente de 11 productores con 2 años de intervención (B), mediante el paquete tecnológico de ahorro de agua de riego, Región de Atacama.

Tabla 2. Determinación de indicadores del uso del agua para 8 ha de Red Globe, Atacama. Eficiencia del uso del agua (EUA) en kg m⁻³ y eficiencia monetaria del uso del agua (EMUA) en US\$ m⁻³.

Año	2008	2009	2010	2011
EUA (kg m ⁻³)	1,5	1,9	2,8	3,8
EMUA (US\$ m ⁻³)	2,6	3,4	5,3	7,4

Para el caso de O'Higgins (Tabla 3), los resultados han sido similares, a pesar del menor tiempo de trabajo y las condiciones particulares de esta región. Con el pasar del tiempo, junto al ahorro de agua y energía se están observando cambios positivos en

los rendimientos y calidad del producto cosechado, como por ejemplo el color de cubrimiento en las uvas (Navarrete, 2012), lo que ha motivado seguir avanzado en esta línea de trabajo, considerando que es fundamental incrementar los potenciales

de rendimiento, calidad de la fruta producida y las ganancias por volumen de agua aportado (Sánchez et al., 2006), fundamental para mantener la competitividad frente a un incremento permanente de los costos, principalmente del recurso humano, energía, fertilizantes, entre otros.

Finalmente, con normalidad se estima de manera equívoca que el éxito de un programa como éste solamente depende del acceso a nuevas tecnologías o al conocimiento generado por investigación de alto impacto, sin embargo, la experiencia ha demostrado que en la agricultura es fundamental complementar lo anterior con la adaptación a la realidad local, validación en terreno, transferencia tecnológica permanente, conocimiento práctico y respeto por la cultura en donde se enmarca la intervención (Callejas y Mora, 2014).

CONCLUSIONES

Se concluye que el uso de tecnología permitió, en una primera fase, advertir objetivamente sobre el ineficiente uso del agua de riego en frutales, logrando en una segunda fase de trabajo, facilitar y fortalecer la

estrategia de manejo intrapredial implementada a nivel macro, destinada a hacer un uso eficiente del recurso hídrico en frutales, rebajando el consumo de agua de riego y electricidad de entre un 20 a un 50%. Mediante las mesas de trabajo, se realizó capacitación en el uso e interpretación de la información, fortaleciendo la adopción de la tecnología y la ampliación hacia otros productores fuera de grupo inicial y en otras regiones del país (Ej: Región de Coquimbo, Proyecto FIC-Capel, 2014). Las solicitudes, adicionales a las incluidas en los proyectos, de más actividades de formación y talleres de capacitación en esta temática, es una muestra que la tecnología llegó para quedarse en la agricultura nacional e inclusive, a nivel de programa de estudio de la Facultad de Ciencias Agronómicas se ha creado una nueva asignatura en esta temática, de manera de entregar las herramientas a los nuevos ingenieros agrónomos. Finalmente, se pudo concluir que para llegar a generar una intervención exitosa, no solamente se requiere moderna tecnología o conocimiento de frontera, sino, la capacidad de integrar habilidades a través de la transferencia tecnológica de acuerdo al entorno cultural donde es requerida.

Tabla 3. Región de O'Higgins; ahorro de agua de riego en frutales.

Especie	Productor	Agua aplicada sin tecnología (m ³ /ha/año ⁻¹)	Agua aplicada con tecnología (m ³ /ha)	Ahorro agua (%)	Rendimiento (kg ha ⁻¹)
Cerezo	Productor 1	10.775	7.389	31,4	9.200
	Productor 2	9.036	7.461	17,4	2.900 (2da producción)
Ciruelo Europeo	Productor 5	5.704	4.548	20,3	40.500
Duraznero	Productor 3	7.684	4.580	40,4	28.560
	Productor 4	9.957	4.963	50,2	54.500
Manzano	Productor 6	12.286	8.087	34,2	93.700
	Productor 7	9.094	6.520	28,3	50.000
Uva de mesa	Productor 8	7.000	3.489	50,2	32.947
	Productor 9	7.900	4.478	43,3	28.673
	Productor 10	4.580	2.620	42,8	27.800

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Acevedo-Opazo, C., S. Ortega-Farías, and S. Fuentes. 2010. Effects of Grapevine (*Vitis vinifera* L.) water status on water consumption, vegetative growth and grape quality: An irrigation scheduling application to achieve regulated deficit irrigation. *Agricultural Water Management* 97 (7): 956-964.

Allen, R., L. Pereira, D. Raes and M. Smith. 1998. Crop evapotranspiration guidelines for computing crop water requirements. FAO, Irrigation and Drainage Paper 56. Roma, Italia 300 p.

Banco Mundial. 2011. Chile. Diagnóstico de la gestión del recurso hídrico. Departamento de medioambiente y desarrollo sostenible Región para América Latina y el Caribe. 78 p.

Callejas, R., C. Benavides y E. Kania. 2002. Control y seguimiento de los niveles de sales en el suelo a través de lavado invernal, en parronales de la parte alta del Valle de Copiapó, III Región. 53º Congreso Agronómico de la Sociedad Agronómica de Chile, 3-6 de diciembre 2002, Santiago, Chile. Simiente 72:116 p.

- Callejas, R. J. T. Wieczorek y C. Kusch. 2004. WET Sensor: Desarrollo de una metodología de evaluación en calicata, de la humedad y la conductividad eléctrica del suelo. 56º Congreso Agronómico de la Sociedad Agronómica de Chile, 19-22 de octubre 2004, Valdivia, Chile. *Simiente* 74:10-11 p.
- Callejas, R., J. T. Wieczorek y C. Benavides. 2006. Uso del sensor "Soil Moisture Soil Moisture WET" (DELTA T), en el seguimiento de lavado de sales del suelo, mediante riego por goteo y tendido, en un parronal de uva de mesa en la Tercera Región. 57º Congreso Agronómico de la Sociedad Agronómica de Chile, 18-20 de octubre 2006, Santiago, Chile. *Simiente* 76:75 p.
- Callejas, R., P. Canales and V. García de Cortázar. 2009. Relationship between root growth of 'Thompson Seedless' grapevines and soil temperature. *Chilean Journal of Agricultural Research* 69:496-502
- Callejas, R., G. Reginato, R. Gálvez y P. Pino. 2011. Uso eficiente del agua de riego y mejoramiento de la competitividad de la fruticultura de Atacama. Acciones de UCHILECREA. *Revista Antumapu, Facultad de Ciencias Agronómicas de la Universidad de Chile*. 9: 33-36.
- Callejas, R., E. Rojo, C. Benavides y E. Kania. 2012. Crecimiento y distribución de raíces y su relación con el potencial productivo de parrales de vides de mesa. *Agrociencia* 46: 23-35.
- Callejas, R., J. Navarrete y M. Rioseco. 2013. Líneas de Gestión del Riego: Umbrales para Interpretar los Datos de Humedad del Suelo Registrados por Sondas de Capacitancia. Universidad de Chile, *Revista Electrónica Antumapu Profesional*. Volumen 2, número 3. 17 p. 10/10/2013. <http://www.antumapuprofesional.cl/articulos.html>.
- Callejas, R. y M. Mora. 2014. Gotas de información. *Revista Mundoagro*, 55: 56-58 p.
- Campbell, G. S. and Mulla, D. J. 1990. Measurement of soil water content and potential. In B. A. Stewart and D. R. Nielsen, co-ed. *Irrigation of agricultural crops*. Agronomy N. 30, ASACSSA-SSSA, Madison, WI, USA.
- Castilla N. y T. Montalvo. 2005. Programación del riego. In: *Fertirrigación, cultivos hortícolas, frutales y ornamentales*. Cadahía C. (Ed). 3a edición, Ediciones Mundi-Prensa. Madrid. Pág. 277-298.
- Catalán, I. E., G. González, J. Estrada y D. García. 2006. Indicadores comparativos del uso del agua en la agricultura. *Agricultura Técnica en México* (32) 3 p. 333-340.
- Comisión Nacional de Riego (CNR). 2013. *Estrategia Nacional de Recursos Hídricos 2012 – 2025*.
- Charlesworth, P. 2000. Soil water monitoring. Number one. *Irrigation Insights*. Land and Water Australia. 96 pp.
- Choné, X., C. Van Leeuwen, D. Dubourdieu, and J.P. Gaudillere. 2001. Stem water potential is a sensitive indicator of Grapevine water status. *Annals of Botany* 87 (4): 477-483.
- Centro de Información de Recursos Naturales (CIREN). 2003. *Boletín frutícola* n° 9: Métodos de riego. Chile. 12/04/2014. <http://bibliotecadigital.ciren.cl/gsdlexterna/collect/bdirenci/index/assoc/HASH014e.dir/bolfrut9.pdf>. ciren@ciren.cl.
- Dean, T. J., J. P. Bell and A. J. B. Baty. 1987. Soil moisture measurement by an improved capacitance technique. 1. Sensor design and performance. *J. Hydrol.* 93, 67–78.
- Dirección General de Aguas. 2004a. Diagnóstico y clasificación de los cursos y cuerpos de aguas según objetivos de calidad: cuenca del río Copiapó. Cade Idepe Consultores. Chile. 12/04/2014. http://www.sinia.cl/1292/articles-31018_Copiapo.pdf. ffernandez@mma.gob.cl.
- Dirección General de Aguas. 2004b. Diagnóstico y clasificación de los cursos y cuerpos de aguas según objetivos de calidad: cuenca del río Huasco. Cade Idepe Consultores Chile. http://www.sinia.cl/1292/articles-31018_Huasco.pdf. ffernandez@mma.gob.cl.
- Dirección General de Aguas. 2014. Información pluviométrica, fluviométrica, estado de embalses y aguas subterráneas. *Boletín DGA* n° 430, febrero de 2014. 12/04/2014. <http://www.dga.cl/productosyservicios/informacionhidrologica/Informacin%20Mensual/Boletin022014.pdf>.
- Doltra, J., J.A. Oncins, J. Bonany and M. Cohen. 2007. Evaluation of plant-based water status indicators in mature apple trees under field conditions. *Irrigation Science* 25 (4): 351-359.
- Dukes, M.D., Carpena-Muñoz, R., Zotarelli, L., Icerman, J. y Scholberg, J.M. 2007. Soil moisture-based irrigation control to conserve water and nutrients under drip irrigated vegetable production. *Estudios de la Zona No Saturada del Suelo* 8: 239 - 236.
- Egea, G., M. González-Real, A. Baille, P. Nortés, P. Sánchez-Bel, R. Domingo. 2009. *Agricultural Water Management* 96 (2009): 1605–1614.
- Evet, S., B. Ruthardt, S. Kottkamp, T. Howell, A. Schneider and J. Tolk. 2002. Accuracy and precision of soil water measurements by neutron, capacitance and TDR methods. Paper n° 318, 8 p. 17th WCSS, 14-21 August 2002, Thailand.
- Fares, A y A.K. Alva. 2000. Evaluation of capacitance probes for optimal irrigation of citrus through soil moisture monitoring in an entisol profile. *Irrigation Science* 19 (2): 57-64.
- Ferreyra R., G. Sellés y I. Sellés. 2001. Riego deficitario controlado en uva de mesa. Instituto de

- Investigaciones Agropecuarias (INIA). Boletín INIA No 60. Santiago de Chile. 44p.
- Ferreyra, R., G. Sellés, H. Silva, R. Ahumada, I. Muñoz and V. Muñoz. 2006. Efecto del agua aplicada en las relaciones hídricas y productividad de la vid 'Crimson Seedless'. *Pesquisa Agropecuária Brasileira* 41 (7): 1109-1118.
- Fuster, R., González, L., Morales, L., Cerda, C., Hernández, J., Sotomayor, D., Lillo, G., González, M. y Escobar, C. 2009. Estudio Gestión Integrada de los Recursos Hídricos en Chile. Informe final. Capítulo 3: Los recursos hídricos en Chile. 58-266.
- Gálvez, R. 2011. Evaluación del uso conjunto del potencial hídrico xilemático y el déficit de presión de vapor en el manejo del riego en vides de mesa. Tesis de Magíster. Universidad de Chile. Facultad de Ciencias Agronómicas. Santiago, Chile, 59 p.
- Gálvez, R., R. Callejas y G. Reginato. 2010a. Metodología de la medición del potencial xilemático para su uso en el control del riego en vides de mesa de la región de atacama. 61º Congreso Agronómico de la Sociedad Agronómica de Chile, 26-29 de septiembre 2010, Santiago, Chile. *Simiente* 74:10-11 p.
- Gálvez, R., R. Callejas, G. Reginato y J. Vera. 2010b. Comparación de tres indicadores fisiológicos del estado hídrico en vid de mesa variedad Red Globe. 61º Congreso Agronómico de la Sociedad Agronómica de Chile, 26-29 de septiembre 2010, Santiago, Chile. *Simiente* 74:10-11 p.
- Gálvez, R. y R. Callejas. 2012. Comparación de dos sondas FDR en la estimación de la conductividad eléctrica del suelo en el Valle de Copiapó. XXº Congreso Agronómico de la Sociedad Agronómica de Chile, 19-22 de octubre 2004, Valdivia, Chile. *Simiente* 74:10-11 p.
- Hanson, R., Orloff, S. y Peters, D. 2000. Monitoring soil moisture helps refine irrigation management. *California Agriculture* 54: 38 – 42.
- Hidalgo, J., M. Pastor y J.C. Hidalgo. 2003. Evaluación de una sonda FDR para la estimación de la evolución del contenido de agua en el suelo y para el control de riegos en olivar. *Estudios de la Zona No Saturada del Suelo* 6: 171 – 176.
- Instituto Nacional de Estadística (INE). 2007. División Político y Administrativa y Censal. Santiago, Chile. . 10/03/2014. http://www.ine.cl/canales/chile_estadistico/territorio/division_politico_administrativa/pdf/DPA_COMPLETA.pdf. ine@ine.cl.
- International Atomic Energy Agency (IAEA). 2008. Field Estimation and Soil Water Content. A Practical Guide to Methods, Instrumentations and Sensor Technology. Training Course Series 30. Vienna. Austria. 131 p.
- Juliá, C., Montecinos, S. y Maldonado A. 2008. Características Climáticas de la Región de Atacama. En: FA. Squeo, G. Arancio, J.R. Gutierrez (eds.). Libro Rojo de la Flora Nativa y de los Sitios Prioritarios para su Conservación: Region de Atacama. Ediciones Universitarias de La Serena. La Serena, Chile, pp: 25-42.
- López Riquelme, L.A., Soto, F., Suardíaz, J., Sánchez, P., Iborra, A. y Vera, J.A. 2009. Wireless Sensor Networks for precision horticulture in Southern Spain. *Computers and Electronics in Agriculture* 68 (1): 25 - 35.
- Malladi, A. and J. K. Burns. 2007. Communication by plant growth regulators in roots and shoots of horticultural crops. *HortScience* 42(5):1113-1117.
- McCutchan, H. and K.A. Schackel. 1992. Stem-water potential as a sensitive indicator of water stress in Prune trees (*Prunus domestica* L. cv. French). *Journal of the American Society for Horticultural Science* 117 (4): 607-611.
- De Santa Olalla, Martín, Mañas, F., P. López y A. Calera. 2005. Agua y Agronomía. Ediciones Mundi Prensa, Madrid, 606 p.
- Morales, L. 2008. Evapotranspiración. In. Nodo de Riego: Difusión y transferencia tecnológica para el uso eficiente de agua de riego en la región de Atacama. Proyecto co-financiado por el Gobierno Regional de Atacama a través de Innova Chile de CORFO. Editado por Callejas y Reginato. 4 p. (formato de citas)
- Moya, J.A. 2009. Riego localizado y fertirrigación. 4a edición. Ediciones Mundi- Prensa. Madrid. 575 p.
- Naor, A., I. Klein, H. Hupert, Y. Grinblat, M. Peres and A. Kaufman. 1999. Water stress and crop level interactions in relation to nectarine yield, fruit size distribution, and water potentials. *Journal of American Society of Horticultural Science* 124 (2): 189-193.
- Naor, A. 2008. Water stress assessment for irrigation scheduling of deciduous trees. *Acta Horticulturae* 792: 467-481.
- Navarrete, J., R. Callejas y O. Seguel. 2010. Efecto de distintos criterios de riego sobre parámetros productivos de uva de mesa (*Vitis vinifera* L.) variedad Red Globe. 61º Congreso Agronómico de la Sociedad Agronómica de Chile, 26-29 de septiembre 2010, Santiago, Chile. *Simiente* 74:10-11 p.
- Navarrete, J. 2012. Efecto de distintos criterios de riego sobre variables fisiológicas y parámetros productivos de uva de mesa (*Vitis vinifera* L.) variedad red globe. Tesis de Magíster. Universidad de Chile. Facultad de Ciencias Agronómicas. Santiago, Chile, 73 p.
- Oficina de Estudios y Políticas Agrarias (ODEPA). 2012. Macroeconomía y agricultura chilena. 4/11/2013. http://www.df.cl/prontus_df/site/artic/20120612/asocfile/20120612171639/macroeconom_a_y_macroeconom__a_y_agricultura_de_abril_de_2012.pdf.

- Olivo, N., J. Girona and J. Marsal. 2009. Seasonal activity of stem water potential to vapour pressure deficit in grapevine. *Irrigation Science* 27(2): 175 – 182.
- Organización de las Naciones Unidas para la educación, la ciencia y la cultura, UNESCO. 2010. Atlas de zonas áridas de América Latina y el Caribe. Proyecto “Elaboración del mapa de zonas áridas, semiáridas y subhúmedas de América Latina y el Caribe”. Documentos técnicos del PHI-LAC, N°25. Montevideo, Uruguay. 48p.
- Orozco, A. 2010. Uso eficiente del agua de riego mediante sondas de capacitancia. *Aqua-LAC - Vol. 2 - No 1 - Mar. 2010*. pp. 56- 66.
- Paltineanu, I.C., and J. L. Starr. 1997. Real time soil water dynamics using multisensory capacitance probes: laboratory calibration. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 61: 1576–1585.
- Patakas, A., B. Noitsakis and A. Chouzouri. 2005. Optimization of irrigation water use in grapevines using the relationship between transpiration and plant water status. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 106 (2-3): 253-259.
- Ruiz-Sánchez, M. C. y J. Girona. 1995. Investigaciones sobre riego deficitario controlado en melocotonero. Pp. 67-95. En: *Riego deficitario controlado, fundamentos y aplicaciones*. Ediciones Mundi-Prensa. Madrid, España. 188 p.
- Saxton, K., P. Willey and W. Rawls. 2006. Field and pond hydrologic analyses with the SPAW model. *American Society of Agricultural and Biological Engineers*. 4-11-2013. <http://hydrolab.arsusda.gov/SPAW/SPAW%20Proceedings%20Paper-ASABE.pdf>. ksaxton@roadrunner.com.
- Sellés G., R. Ferreyra, y I. Sellés. 2000. Riego. J. Valenzuela (Ed.). *Uva de mesa en Chile*. INIA (Instituto de Investigaciones Agropecuarias) Santiago, Chile. 338p.
- Santos, L., J. De Juan, M. Picornell y J. Tarjuelo. 2010. El riego y sus tecnologías. Centro de Egenharia dos Biosistemas (CEER), Instituto Superior de Agronomía, Universidade Técnica de Lisboa. Lisboa, Portugal. 292 p.
- Shackel, K.A., B. Lampinen, S. Southwick, W. Olson, S. Sibbett, W. Krueger, J. Yeager and D. Goldhamer. 2000. Deficit irrigation in Prunus: Maintaining productivity with less water. *HortScience* 35 (6): 1063-1066.
- Sociedad Nacional de Agricultura (SNA). 2008. Chile Agrícola, Una mirada de la agricultura por regiones. Chile. 15-06-2014. <http://www.sna.cl/web/admin/spaw2/uploads/files/Microsoft%20PowerPoint%20-%20CHILE%20AGRICOLA.pdf>. comunicaciones@sna.cl.
- Starr, J. L. and I. C. Paltineanu. 1998. Soil water dynamics using multisensory capacitance probes in non-irrigated interrows of corn. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 62: 114–122.
- Starr, J., D. J. Timlin, P. M. Downey and I.R. McCann. 2009. Laboratory evaluation of dual-frequency multisensor capacitance probes to monitor soil water and salinity. *Irrig. Sci.* 27: 393-400.
- Stewart, W., A. Fulton, W. Krueger, B. Lampinen and K.A. Shackel. 2011. Regulated deficit irrigation reduces water use of Almonds without affecting yield. *California Agriculture* 65 (2): 90-95.
- Stevens Water Monitoring Systems (STEVENS). 2007. The HydraProbe Soil Sensor: Comprehensive Stevens Hydra Probe Users Manual. Estados Unidos. 20-10-13. http://www.stevenswater.com/catalog/products/soil_sensors/manual/Hydra%20Probe%20Manual%2092915%20June%202007.pdf. info@stevenswater.com.
- Universidad de Chile. 2012. Llevando a la Universidad de Chile a regiones para dar soluciones a los problemas del agro y los recursos naturales. 295-297 p. In. *Memoria Anual 2010 y 2011*. 368 p.
- Vera, J., J. M. Abrisqueta, R. Quezada, J. Munguía, R. Callejas, R. Gálvez, I. Abrisqueta y M.C. Ruiz-Sánchez, M.C. 2010. Calibración de sondas capacitivas para estimar la humedad del suelo en condiciones de campo: efecto de la pedregosidad. 69-71 p. *Memoria Resúmenes Extendidos. Primer Congreso Boliviano del Riego y Drenaje*. 12 al 14 de julio del 2010 La Paz, Bolivia. Edición B. Moises Quiroga Sossa IIAREN-UMSA.
- Veihmeyer, F.J. y A. H. Hendrickson. 1950. Soil moisture in relation to plant growth. *Ann. Rev. Plant Physiol.* 1:285-304.
- Williams, L.E. and T.J. Trout. 2005. Relationship among vine- and soil-based measures of water status in a Thompson seedless vineyard in response to high-frequency drip irrigation. *American Journal of Enology and Viticulture* 56 (4): 357-366.
- Zuñiga, M. O., 2013. Consumo de agua por la planta de siete especies frutales producidas en Chile. *Memoria Ingeniero Agrónomo*. Santiago. Chile. Facultad de Ciencias Agronómicas. Universidad de Chile. 56 p.

AGRADECIMIENTOS

Se agradece a los Gobiernos y Consejos Regionales de Atacama (Bip: 33-03-779, 33-03-218 y 30137081) y O'Higgins (IDI: 30112430-0) por haber financiado estos trabajos, así como a los productores que apoyaron en todo momento a la correcta ejecución de las actividades comprometidas y a los profesores de la Universidad de Chile.