



UNIVERSIDAD DE CHILE
FACULTAD DE CIENCIAS AGRONÓMICAS
ESCUELA DE POSTGRADO

**PROSPECCIÓN DE INICIO DEL CONSUMO DE AGUA EN LA
TEMPORADA EN 'THOMPSON SEEDLESS'**

Tesis para optar al Título Profesional de Ingeniero Agrónomo y al Grado de
Magíster en Ciencias Agropecuarias

SAMUEL ANDRÉS CAMPOS SÁEZ

Directores de Tesis
RODRIGO CALLEJAS RODRÍGUEZ
ERIKA KANIA KUHL

Profesores consejeros
EDMUNDO ACEVEDO HINOJOSA
HERMAN SILVA ROBLEDO

SANTIAGO - CHILE
2016

UNIVERSIDAD DE CHILE
FACULTAD DE CIENCIAS AGRONÓMICAS
ESCUELA DE POSTGRADO

**PROSPECCIÓN DE INICIO DEL CONSUMO DE AGUA EN LA TEMPORADA
EN ‘THOMPSON SEEDLESS’**

Tesis presentada como parte de los requisitos para optar al Título Profesional de
Ingeniero Agrónomo y al Grado de Magíster en Ciencias Agropecuarias

SAMUEL ANDRÉS CAMPOS SÁEZ

	Calificaciones (Memoria de Título)	Calificaciones (Tesis de Grado)
DIRECTOR DE TESIS		
Rodrigo Callejas Rodríguez Ingeniero Agrónomo, Dr. Sc. Agr.	7,0	6,5
Erika Kania Kuhl Ingeniero Agrónomo, Dr.	7,0	6,6
PROFESORES CONSEJEROS		
Edmundo Acevedo Hinojosa Ingeniero Agrónomo, MS, Ph.D.	6,0	5,8
Herman Silva Robledo Profesor de Estado de Biología y Ciencias, MS, Ph.D.	6,5	6,5

Santiago, Chile
2016

PROSPECCIÓN DE INICIO DEL CONSUMO DE AGUA EN LA TEMPORADA EN
'THOMPSON SEEDLESS'

PROSPECTION OF FIRST WATER INTAKE EVENT IN THE SEASON IN
'THOMPSON SEEDLESS'

AGRADECIMIENTOS Y DEDICATORIA

Se agradece a todas las personas quienes colaboraron con ésta investigación, quienes me apoyaron tanto académico como personalmente.

Agradezco a todos los académicos que me formaron, me entregaron conocimiento e inspiraron a convertirme en mejor profesional. En particular a Rodrigo Callejas, Erika Kania, José Ignacio Covarrubias y Américo Contreras.

Agradezco a mi familia, amigos y pareja, quienes siempre me apoyaron a cumplir mis metas y objetivos.

Bendiciones a todos ellos

Esta tesis está dedicada a mis padres Luciano y Marisol.

ÍNDICE

CAPÍTULO I: REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA	1
Programación del riego para la vid de mesa en primavera	3
Antecedentes sobre el inicio del consumo de agua en la temporada	4
Concepto de inicio de consumo de agua en la temporada (ICAT)	6
La sonda de capacitancia en la programación del riego.....	7
LITERATURA CITADA	9
CAPÍTULO II: UTILIZACIÓN DE REGISTROS SONDAS FDR COMO HERRAMIENTA PARA DETECTAR EVENTOS DE CONSUMO DE AGUA AL INICIO DE LA TEMPORADA EN ‘THOMPSON SEEDLESS’	12
RESUMEN.....	12
ABSTRACT	13
INTRODUCCIÓN	14
HIPÓTESIS.....	16
OBJETIVO GENERAL	16
OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	16
MATERIALES Y MÉTODO	17
Sitios de estudio	17
Materiales.....	17
Método	18
Caracterización de los sitios de estudio	18
Determinación del inicio de consumo de agua en la temporada mediante los registros FDR	19
Consistencia de los archivos de datos y obtención de los registros FDR.....	19
Consideraciones previas al análisis computacional.....	20
Primera función programada (f_1) basada en la ETo.....	21
Segunda función programada (f_2) ó detección de cambio de tendencia.....	21
Herramienta automatizada de cálculo de riego en primavera.....	22
Modelo predictivo del evento de inicio del consumo de agua en la temporada.....	22
Análisis estadístico.....	23
RESULTADOS Y DISCUSIÓN	24
Caracterización de los sitios de estudio	24
Determinación del inicio de consumo de agua en la temporada mediante los registros FDR	26
Consistencia de los archivos de datos y obtención de los registros FDR	26
Primera función programada (f_1) basada en la ETo.....	27
Segunda función programada (f_2) ó detección de cambio de tendencia.....	30
Herramienta automatizada de cálculo de riego en primavera.....	34
Modelo predictivo del evento de inicio del consumo de agua en la temporada.....	37
Modelo predictivo	39

CONCLUSIONES	42
LITERATURA CITADA	43
APÉNDICE I	46
APÉNDICE II	50
APÉNDICE III	51
APÉNDICE IV	53
APÉNDICE V	54

ÍNDICE DE CUADROS

CAPÍTULO I: REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA.....1

Cuadro 1. Dos metodologías para la estimación de riegos al inicio de la temporada por periodo (estado fenológico) para la Zona Central de Chile y volumen acumulado en $m^3 \cdot ha^{-1}$	4
--	---

CAPÍTULO II: UTILIZACIÓN DE REGISTROS SONDAS FDR COMO HERRAMIENTA PARA DETECTAR EVENTOS DE CONSUMO DE AGUA AL INICIO DE LA TEMPORADA EN ‘THOMPSON SEEDLES’.....12

Cuadro 2. Predios de donde provienen los registros de sondas de FDR. Nótese que de cada predio pueden existir más de una base de dato o unidad productiva	17
---	----

Cuadro 3. Escala de estados fenológicos de la vid. Eichhorn y Lorenz (1977) adaptado por Coombe (1995)	19
--	----

Cuadro 4. Caracterización de las unidades productivas, promedio de dos temporadas de rendimiento y consumo de agua, incluyendo el indicador de uso eficiente de agua de riego (EUA).....	24
--	----

Cuadro 5. Resultados del proceso de limpieza y consolidación para las bases de dato, basado en la observación gráfica ¹ mediante software IrriMax® V 9.1	27
---	----

Cuadro 6. Fechas de inicio del consumo de agua de acuerdo a la primera función (f_1) .	30
--	----

Cuadro 7. Fechas de inicio del consumo de agua de acuerdo a la segunda función (f_2).33	
---	--

Cuadro 8. Resultados del segundo algoritmo, fechas resultantes de la búsqueda basada en la segunda función (f_2).	37
---	----

Cuadro 9. Heterogeneidad de las variables del estudio en función de la fecha de inicio del consumo de agua.	38
--	----

Cuadro 10. Resultados del modelo logístico.....	40
---	----

ÍNDICE DE FIGURAS

CAPÍTULO I: REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA.....1

Figura 1. Mediciones con flujo de savia para ‘Flame Seedlees’ en dos temporadas, en el marco del proyecto: Aguas Copiapó, FIA (datos no publicados)..... 5

Figura 2. Coeficiente del cultivo determinado mediante lisímetro para la variedad Tempranillo en el valle de San Joaquín, California (López-Urrea et al., 2012)..... 5

Figura 3. Interfaz gráfica del software IrriMax® al inicio de la temporada. Se observa el contenido de agua en el suelo en función del tiempo, donde se destaca en círculo rojo el inicio del déficit de agua en el suelo. Picos en la gráfica indican riegos. (Proyecto F ICUCHILECREA, 2014 (datos proporcionados por el Laboratorio de Viticultura, Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Agronómicas.)..... 7

CAPÍTULO II: UTILIZACIÓN DE REGISTROS SONDAS FDR COMO HERRAMIENTA PARA DETECTAR EVENTOS DE CONSUMO DE AGUA AL INICIO DE LA TEMPORADA EN ‘THOMPSON SEEDLESS’.....12

Figura 4. Registros de ETo para la comuna de Tierra Amarilla, representa a los registros de las bases de datos C5 y C6 25

Figura 5. Registros de ETo para la comuna de San Vicente Tagua Tagua, representa a los registros de las bases de datos Uetum1, Uetum2, Uetum3, Uch7 y Uch6 25

Figura 6. Déficit de agua en el suelo en función de tiempo contrastado con la relación consumo de agua y 10% de ETo. Unidad productiva ‘Uetum3’ 28

Figura 7. Diagrama de tareas realizadas en la función 1 (f_1) 29

Figura 8. Comportamiento gráfico del resultado del algoritmo. Recorrido corresponde al número de iteraciones sobre la lista. En un inicio la fracción de valores TRUE se mantiene por debajo de 0,2, aumentando drásticamente hasta llegar a 0,9 (recorrido de la lista $x = 2100$)..... 32

Figura 9. Diagrama de flujo de la segunda función (f_2)..... 33

Figura 10. Diagrama de flujo de herramienta de predicción de riego en primavera (continúa en Figura 11)..... 35

Figura 11. Diagrama de flujo (continuación de Figura 10) para calcular los días restantes para el mínimo de humedad admisible (MDHA)..... 36

Figura 12. Gráfico de frecuencia de eventos exitosos (100/100) en función de la variable DG..... 40

Figura 13. Gráfico de frecuencia de eventos exitosos (100/100) en función de la variable ETo acumulada.....40

CAPÍTULO I: REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

El agua es un recurso limitado y por tal razón debe ser cuidado. La agricultura consume aproximadamente un 85% del agua dulce disponible en el mundo y 66% de ella se pierde en esta actividad (Rodda y Shiklomanov, 2003). En el futuro, se espera que esta situación se agrave, debido al aumento de la superficie de cultivo, incremento de la población y mayor demanda de alimentos (Fererres y González, 2009). En Chile, al término de este siglo se proyecta que existirá un avance progresivo del desierto desde las regiones de Atacama a los Lagos, lo que afectará notablemente a la agricultura frutícola, sobre todo en áreas donde todavía no se cuenta con obras hidráulicas (CONAMA, 2010). De acuerdo a lo anterior, todo indica que en un futuro próximo existirá la urgencia en mejorar la eficiencia en el manejo del riego.

Según Fereres y González (2009), los agricultores utilizan el agua de riego en exceso. Al respecto, se ha observado en diversos ensayos que reduciendo la cantidad de agua aplicada, mediante óptimos criterios de riego, se logra aumentar la eficiencia del uso del agua (EUA), traduciéndose en iguales o mejores rendimientos con menor uso de este recurso (Houssein et al., 2008, Ferreyra et al., 2006).

La EUA corresponde a la resultante de una concatenación de eficiencias que oscilan en un rango de 70 a 95% y depende principalmente del sistema de riego, el momento en que se riega y la cantidad de agua utilizada (Hsiao, 2007).

En Chile el riego realizado por los agricultores de uva de mesa habitualmente no es muy eficiente, ya que pierden entre un 5 y 30% del agua requerida por el cultivo (Callejas et al., 2014a; Houssein et al., 2008), situación que se debe principalmente a que las metodologías utilizadas para definir la cantidad y el momento de riegos no son las adecuadas.

El conocimiento de la demanda hídrica de un cultivo puede determinarse considerando el estado fenológico y los factores ambientales (radiación, viento y temperatura) que circunden (Allen et al., 2006). El uso de la evapotranspiración de cultivo (ETc) se ha desarrollado ampliamente en la agricultura, lo que ha permitido un uso racional del agua de riego. Estudios en la vid demuestran que al aplicar el 100% de la ETc, calculada mediante un método tradicional, se obtienen resultados positivos en el rendimiento y calidad de la fruta (Ferreyra et al., 2006), sin embargo, Williams et al. (2010) encontraron que los mejores rendimientos y calidad de fruta se obtienen aplicando entre 60 y 80% de la ETc, señalando que con el 100% se está sobre regando. Esto deja en evidencia que los criterios de riego a partir de la ETc estimada mediante métodos tradicionales, se aproximan a un uso razonable del agua, pero habitualmente no aciertan a los requerimientos hídricos de un huerto comercial. Uno de los principales problemas prácticos de ésta metodología, es la dificultad que representa para el agricultor calcular el tiempo y la frecuencia de riego, pudiendo solamente tener la determinación de un

volumen diario y semanal, sin llegar necesariamente a un criterio de distribución de ese volumen.

Las sondas de capacitancia o sondas del dominio de la frecuencia (FDR) han demostrado ser muy efectivas para determinar la demanda, frecuencia y uso del agua de riego tanto en vid de mesa como otras especies (Enciso, 2007; Houssein et al., 2008; Callejas et al., 2014b). Las sondas FDR registran de manera continua el agotamiento del agua por el cultivo mediante varios sensores ubicados a diferentes profundidades, permitiendo evaluar el contenido volumétrico de agua en el perfil (Kirkham, 2005; Enciso, 2007; IAEA, 2008).

Existe poca información precisa del momento de inicio y término de actividad transpiratoria en plantas caducifolias. Allen et al., (2006) establecen que en cultivos anuales las demandas hídricas al comienzo y término de la temporada dependen principalmente de la cobertura del cultivo. Añadido a esto, Jensen (1968) señala que las hojas inmaduras en su desarrollo poseen una resistencia estomática alta, la cual se va haciendo menor avanzada la temporada, llegando finalmente hasta un mínimo. En las plantas de hoja caduca, el consumo de agua durante el receso invernal es mínimo y se activa después de la brotación de forma abrupta. Lo mismo ocurre al término de la temporada, cuando las hojas caen y la actividad transpiratoria vuelve a ser mínima. Esto concuerda con lo evaluado por Williams y Ayars (2005) para el caso de 'Thompson Seedless', donde se correlaciona el porcentaje de cobertura y el consumo de agua. Un estudio similar (Williams et al., 2010) realizado en el Valle de San Joaquín, California, describe que el consumo de agua es directamente proporcional al porcentaje de área sombreada del parrón, pudiendo ser utilizado como criterio de riego. El mismo autor añade que los días grado (temperatura base 10°C) sirven como modelo predictivo para calcular el consumo de agua, probablemente porque los días grado tienen una alta correlación con la fenología de la vid (Sierra, 2009; Williams et al., 2010).

En los meses de alta demanda hídrica, la evapotranspiración del cultivo (ETc) suele ser menos variable y coincide con el máximo desarrollo fenológico del huerto (Allen et al., 2006; Jensen, 1968). Contrario a lo anterior, al comienzo del desarrollo del cultivo, el consumo de agua es muy bajo y los valores de ETc día a día, pueden variar considerablemente, por lo que también es fácil incurrir en un gasto excesivo de agua, ya que las hojas se encuentran en desarrollo y las condiciones del clima aún no se estabilizan. Para el caso de la vid se ha calculado en el Valle de San Joaquín, California, que el consumo de agua desde la brotación a floración (40 días cronológicos), el cultivo utiliza un total aproximado de 63 mm (Peacock et al., 1999). En esta etapa, la planta difícilmente presenta signos de estrés por falta de agua, debido a que el reservorio de agua en el suelo a fines de invierno, es suficiente para satisfacer ésta demanda (Peacock et al., 1999; Sellés et al., 2012), producto de las lluvias invernales o riegos (en el caso de la zona norte de Chile).

Al analizar los gráficos de lectura continua de la sonda FDR al inicio de la temporada, mediante IrriMax® u otro software especializado, se puede observar como se inicia el déficit de contenido de agua en la primavera (DCAS). De manera análoga, también se

observa como al término de la temporada se estabiliza la curva de déficit, donde se evidencia el fin de la actividad de la planta; la que se prolonga durante todo el receso invernal (Rius, 2005; Callejas et al., 2014a; Callejas et al., 2014b). La situación anterior representa una desventaja importante para la gran mayoría de los agricultores que no están al tanto de ésta tecnología e incurrir en un mayor número de riegos, haciendo un manejo ineficiente del recurso, mayor gasto de energía eléctrica y, probablemente, con importantes efectos negativos sobre las plantas.

Programación del riego para la vid de mesa en primavera

La programación de riego tiene como fin satisfacer la demanda hídrica de la planta en el transcurso del tiempo. Los agricultores entienden el riego como un componente de la producción que incide directamente en la productividad y las ganancias. Sin embargo, y a pesar de las tecnologías disponibles, existen muchos agricultores que deciden la programación de riego por metodologías sin bases fundadas, con criterios subjetivos generando incertidumbre en los resultados (Callejas et al., 2014a).

En Chile, la evapotranspiración del cultivo (ETc) es probablemente la tecnología de mayor acceso a los agricultores, ya que para su cálculo solo se debe tener información de la demanda atmosférica, la clase textural del suelo y el estado de desarrollo de la vid (Kc) (Balbontín, 2015). De esta manera, es posible realizar una estimación de la demanda y utilizar el recurso hídrico de manera racional. A pesar de la simpleza del modelo de balance hídrico, son habituales los casos en los que se puede sobreestimar esta demanda, conduciendo a la planta a un estrés por exceso de riego.

Estudios a corto plazo en vid, en Chile y Estados Unidos, demuestran que regar en base a la demanda calculada para 100% ETc se obtienen óptimos resultados productivos, pero que también se logran resultados estadísticamente iguales regando al 80% de la ETc (Ferreira et al., 2006; Williams et al., 2010). Otras experiencias indican que reducciones parciales de hasta un 40% del agua aplicada mediante la estimación de la evapotranspiración entre brotación y pinta, obtienen excelentes resultados productivos sin generar ningún tipo de estrés y ahorrando hasta un 20% del agua total (Ferreira et al., 2006; Sellés et al., 2012).

Al inicio de la temporada, desde brotación a floración, los agricultores podrían anticiparse a los riegos, ya que habitualmente ésta labor se realiza al menos una vez por semana (Cuadro 1), periodo en que la vid generalmente no presenta signos de estrés por falta de agua, ya que el reservorio de este recurso en el suelo, producto de las lluvias y/o riegos invernales a salidas del receso, es suficiente para satisfacer la demanda del cultivo (Peacock et al., 1999; Sellés et al., 2012). Incluso estos riegos pueden llegar a ser perjudiciales por el anegamiento e hipoxia del sistema radical (Sellés et al., 2012).

Cuadro 1. Dos metodologías para la estimación de riegos al inicio de la temporada por periodo (estado fenológico) para la Zona Central de Chile y volumen acumulado en $\text{m}^3 \cdot \text{ha}^{-1}$.

Metodología de estimación	Riegos ($\text{m}^3 \cdot \text{ha}^{-1}$) por periodo estados fenológicos ¹				
	Brotación (7días)	P.verdes (14 días)	Brote 30 cm (14 días)	Floración (7 días)	Acumulado (42 días)
Riego tradicional ²	80	200	200	120	600
Riego basado en la ETo ³ ($K_c = 0,3$)	70	145	155	80	450

¹ de acuerdo a Eichhorn Lorenz (1977)

² información obtenida de un huerto comercial de uva de mesa en la Región de L.B. O'Higgins.

³ de acuerdo a Kc de Allen et al. (2006).

Antecedentes sobre el inicio del consumo de agua en la temporada

La estimación de la demanda hídrica en primavera para la vid se encuentra ampliamente estudiada (Lopez-Urrea et al., 2012; Peacock et al. 1999; Williams et al., 2010; Williams y Ayars 2005). En la práctica, comúnmente se utiliza los coeficientes de cultivo (K_c) publicados por distintos autores para abordar el cálculo de la demanda hídrica en la vid de mesa (Allen et al., 2006; Balbontín, 2015; Sellés et al., 2012). Los autores también explican que los K_c son estimaciones locales y deben ajustarse a las condiciones de cultivo y climáticas, conduciendo a un coeficiente que integra las características del cultivo en sus etapas de desarrollo y evaporación directa del suelo. El coeficiente del cultivo en las etapas tempranas de desarrollo o K_c inicial ($K_{c_{in}}$), corresponde al periodo de brotación a floración. La principal característica del $K_{c_{in}}$ es que el consumo de agua en ésta etapa se produce principalmente producto de la evaporación directa del suelo entre 10 y 20 cm de profundidad, lo que representa en gran medida el consumo documentado en estas etapas de desarrollo (Allen et al., 2006; López-Urrea et al., 2012).

Williams y Ayars (2005) indican que la estimación del K_c es una función lineal del porcentaje de área sombreada en 'Thompson Seedless'. Esta información es similar a lo encontrado por López-Urrea et al. (2012) quienes expresan el consumo de agua por la planta como una función lineal al porcentaje de suelo cubierto por el follaje. Lo anterior clarifica que las estimaciones del consumo y coeficiente de cultivo dependen de la cobertura y del desarrollo foliar, pero no explican si dicho consumo es producido por la planta o que es generado mayoritariamente por la evaporación directa en los primeros centímetros de profundidad. Una observación importante al respecto es que al inicio de la temporada se puede observar un momento donde la tasa del consumo de agua aumenta de manera considerable (>50%), lo que se ha relacionado en diversos estudios con la cobertura y desarrollo del follaje (Netzer et al., 2009; Williams y Ayars, 2005).

Datos registrados de sensores de flujo de savia en 'Flame Seedless' (Proyecto Aguas Copiapó, FIA, datos no publicados) muestran que existe un aumento (>50%) en la tasa de flujo xilemático cercano a floración (Figura 1), lo cual coincide con las

determinaciones lisimétricas de coeficientes de cultivo para la vid (Figura 2) (López-Urrea et al., 2012), donde se observa un patrón similar. También es posible observar un comportamiento similar en lecturas continuas de sondas FDR al inicio de la temporada (Figura 3), donde el contenido de agua se mantiene estable luego de un riego invernal, hasta la segunda quincena de septiembre donde la planta comienza extraer agua el suelo. En el ejemplo anterior (Figura 3), el cultivo tiene aproximadamente un 20% de cobertura y se encuentra a inicios de la floración.

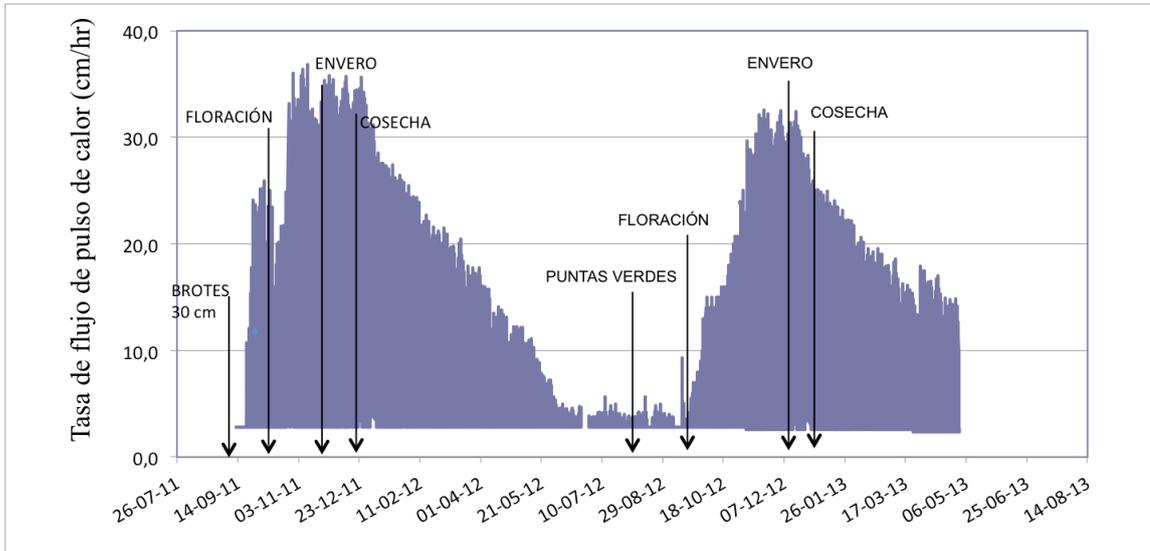


Figura 1. Mediciones con flujo de savia para ‘Flame Seedlees’ en dos temporadas, en el marco del proyecto: Aguas Copiapó, FIA (datos proporcionados por laboratorio de Viticultura, Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Agronómicas)

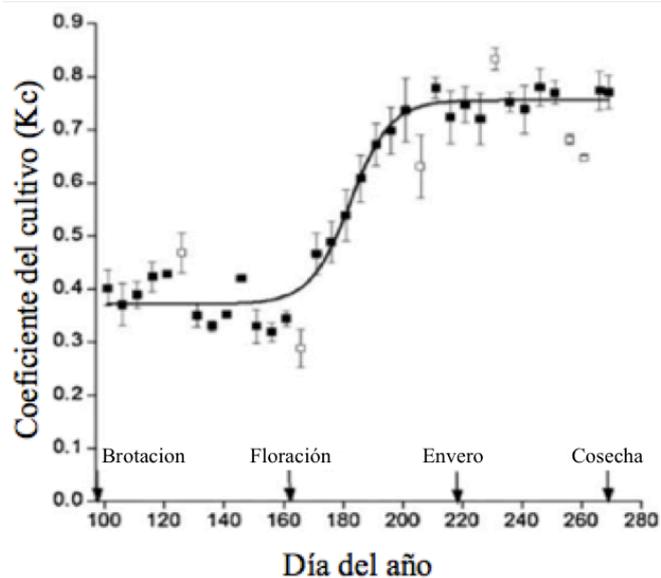


Figura 2. Coeficiente del cultivo determinado mediante lisímetro para la variedad Tempranillo en el Valle de San Joaquín, California (López-Urrea et al., 2012)

Los estudios antes mencionados sobre el consumo de agua al inicio de la temporada, no explican diferencia entre el consumo que se genera por la evaporación del suelo y el de la planta. Esta información es relevante cuando se desea regar, ya que la vid de mesa no presenta signos de estrés al inicio de la temporada (Sellés et al., 2012), donde es muy probable que el estatus hídrico se mantenga en niveles adecuados y que la tasa transpiratoria sea mínima todavía por el desarrollo de los tejidos, pudiendo atribuir el consumo de agua en éste periodo, casi exclusivamente a la evaporación directa del suelo (Callejas et al., 2014b). Por otra parte, variables climáticas podrían afectar notablemente el momento donde se inicia la actividad en la temporada, donde se ha observado mediante la observación de sondas FDR, que en zonas de alta radiación y baja humedad relativa (zona norte de Chile), el inicio del déficit de agua ocurre con 20 % de cobertura (brote de 40 cm), comparado con zonas de alta humedad relativa, donde ocurre en floración, con brotes de aproximadamente 1 metro y 50 % de cobertura. El momento donde se ha iniciado el consumo en la temporada tiene una relevancia práctica importante, ya que los agricultores podrían anticiparse al evento de inicio del consumo de agua, mejorando la eficiencia de aplicación (EUA) e incurrir en menor gasto del recurso hídrico. Además, estudios que relacionen este momento en la temporada con acumulación de unidades térmicas o con variables de demanda atmosférica (ETo y DPV), incluso estados fenológicos (observación visual) podrían representar una excelente ayuda para predecir el momento de inicio de consumo de agua en la vid de mesa, donde existan agricultores que deseen conocer el momento donde iniciar los riegos primaverales acorde a su tipo de suelo, sin tener tecnologías aplicadas al riego.

Concepto de inicio de consumo de agua en la temporada (ICAT)

El inicio de la temporada, consta del periodo que corresponde fenológicamente en la vid de mesa desde brotación a floración, con una duración aproximada de 6 semanas o 42 días. En éste periodo la vid extrae agua del suelo, pero su consumo es mínimo y no representa más del 10% de la tasa de consumo en la época de máxima demanda. Por ello, para esta investigación se plantea que el ICAT es un evento donde ocurre un cambio abrupto en la tasa de consumo y/o agotamiento de agua en el suelo, que puede detectarse mediante sondas FDR como el inicio del agotamiento o déficit de agua en el suelo (DCAS), que puede ser expresado como una variación porcentual en la tasa de consumo por la planta, la que puede ser explicada objetivamente utilizando indicadores como: la evapotranspiración de referencia o su comportamiento de tendencia en el tiempo.

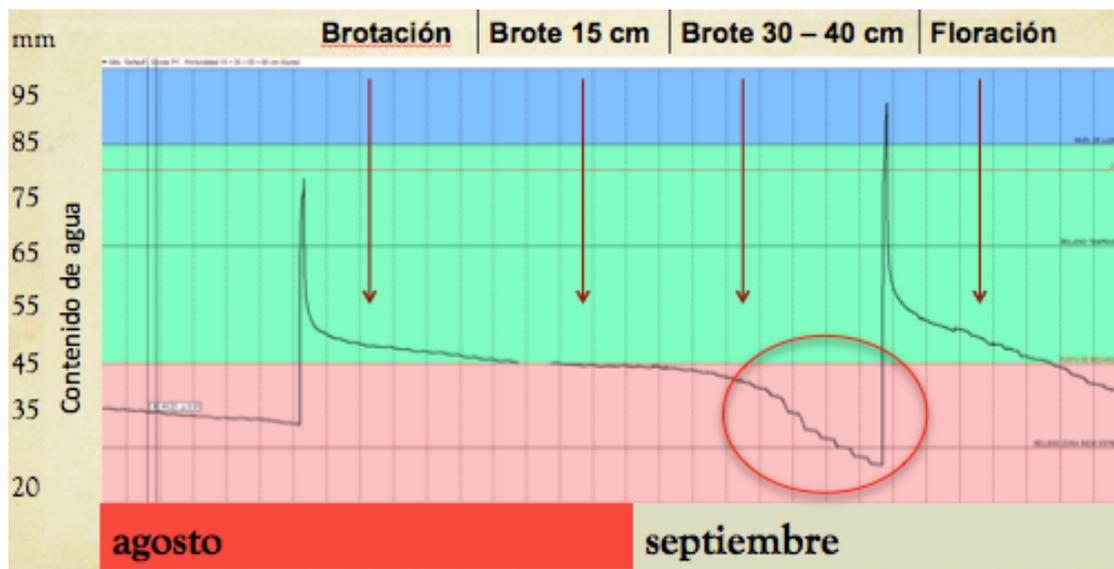


Figura 3. Interfaz gráfica del software IrriMax® al inicio de la temporada. Se observa el contenido de agua en el suelo en función del tiempo, donde se destaca en círculo rojo el inicio del déficit de agua en el suelo. Picos en la gráfica indican riegos. (Proyecto FIC UCHILECREA, 2014 (datos proporcionados por el Laboratorio de Viticultura, Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Agronómicas.)

La sonda de capacitancia en la programación del riego

La sonda de capacitancia o sonda FDR, consta de un vástago con cuatro sensores móviles a distinta profundidad, instalada en el suelo, protegido por un tubo de PVC con una cápsula superior. Este instrumento estima de manera muy precisa el contenido volumétrico de agua en el perfil de suelo (IAEA, 2008). Los sensores realizan mediciones continuas, con lecturas en intervalos de hasta cinco minutos, pudiendo registrar el nivel de humedad del suelo en todo momento. La sonda almacena estos datos en un 'logger' del cual pueden descargarse las bases de datos y visualizarse mediante una interfaz o software IrriMax® y/o Wiseconn®.

El funcionamiento de la sonda se basa en la técnica de reflectometría de dominio de la frecuencia (FDR). Los sensores de la sonda capacitancia corresponden a dos anillos de bronce distanciados, por donde se hace circular la corriente eléctrica. Entre estos anillos se genera un circuito oscilante de alta frecuencia (1 a 100 Mhz), que circula por el material (suelo, contenido de agua y aire) y ambos electrodos. La estimación del contenido de agua del suelo obedece a las diferentes constantes dieléctricas del suelo, aire y agua, siendo 1 para el aire, menor a 1 para el suelo y 80 para el agua. Por ello, la distorsión que se genera en el circuito se debe al contenido de agua y su efecto en la permitividad del medio conductor (Sentek, 2013). De esta manera se construye una curva de calibración entre la permitividad relativa del medio y el contenido de agua en el suelo.

La sonda FDR debe pasar por un proceso de calibración para cada tipo de suelo.

Para la visualización de los registros de la sonda FDR, puede utilizarse la interfaz IrriMax®, que corresponde una herramienta computacional para realizar la gestión del riego, donde se puede definir los límites de humedad con los cuales se desea trabajar en la programación del riego (Houssein et al., 2008; Callejas et al., 2014b). Para la programación de riego con la sonda se definen líneas de gestión (Callejas et al., 2013), que corresponden a umbrales de riego basados en el contenido actual de agua en el suelo a determinadas profundidades. Luego de la programación del riego, la sonda se utiliza para controlar la actividad de la planta, evaluar su consumo en distintas etapas y ver su respuesta ante condiciones climáticas.

Las sondas de capacitancia han demostrado ser muy efectivas para determinar la demanda, frecuencia y uso del agua de riego (Enciso, 2007; Houssein et al. 2008; Callejas et al., 2014a; Callejas et al., 2014b). Estos equipos registran de manera continua el agotamiento del agua por el cultivo a través de sus sensores de contenido de agua ubicados a diferentes profundidades (Kirkham, 2005; Enciso, 2007; IAEA, 2008).

Los autores que han evaluado el uso de la sonda FDR en plantas frutales, obtienen excelentes resultados productivos con un aumento significativo de la EUA (Enciso, 2007; Houssein et al., 2008). El uso de la sonda como instrumento para el control y programación del riego, optimiza el recurso hídrico, ya que al ser de lectura continua, la medición ocurre a tiempo real, permitiendo ver tendencias y administrar el reservorio de agua en el suelo de acuerdo a la tasa de consumo actual del huerto.

Cuando se realiza una adecuada gestión del riego mediante la sonda FDR y los software especializados, el control del riego al inicio de la temporada es ventajoso respecto a otras metodologías antes mencionadas, ya que la sonda FDR es capaz de medir pequeñas variaciones en el contenido de agua en el perfil (Enciso, 2007; IAEA, 2008; Kirkham, 2005; Lamm et al., 2007), facilitando la interpretación por el usuario, quien entiende que el agua debe reponerse cuando la humedad alcanzan el nivel de relleno o mínimo de humedad admisible (MDHA) (Callejas et al., 2014b). También es posible realizar una medición diferenciada del contenido de agua, separando mediante el software los sensores de las distintas profundidades, donde se pueden diferenciar los efectos generados por la evaporación directa del suelo (15 cm, primer sensor) y los que explica la actividad de la planta (30 y 50 cm, segundo y tercer sensor).

LITERATURA CITADA

- Allen, R.G.; L.S. Pereira.; D. Raes and M. Smith. 2006. Crop Evapotranspiration-Guidelines for Computing Crop Water Requirements [Evapotranspiración de los cultivos-Guía para calcular los requerimientos de agua para cultivos]. Documento 56 de la FAO Irrigación y Drenaje. Roma. 298p.
- Balbontín C. N. 2015. Riego en uva de mesa: Administración de recursos hídricos escasos. Instituto de investigaciones agropecuarias (INIA). Ficha técnica N° 11. Santiago de Chile. 9p
- Callejas, R.; J. Navarrete y M. Rioseco. 2013. Líneas de gestión para el riego. Facultad de Ciencias agronómicas. Antumapu profesional. Universidad de Chile. 17p.
- Callejas, R.; J. Vera; M. Rioseco; F. Prohens; H. Osorio; P. Pino; J. Navarrete y R. Gálvez. sep. 2014 a. Generación e integración de tecnologías destinadas al ahorro de agua de riego en dos regiones productoras de fruta en Chile. Aqua-LAC. (2):6, 71-83pp.
- Callejas, R.; J. Vera; C. Kremer; J.I. Covarrubias; C. Benavides y M. Rioseco. 2014 b. Riego de precisión en frutales con sensores de suelo. Santiago, Universidad de Chile. Facultad de Ciencias Agronómicas. Serie Ciencias Agronómicas N° 23. 112p
- CONAMA. Comisión nacional del medio ambiente. 2010. Análisis de vulnerabilidad del sector silvoagropecuario, recursos hídricos y edáficos de Chile frente a escenarios de Cambio Climático. Centro de agricultura y medio ambiente. Universidad de Chile. Facultad de Ciencias Agronómicas. 181p
- Eichhorn, K.W. und Lorenz, H. 1977. Phaenologische Entwick-lungstadien der Rebe. *Nachrichtenblatt des Deutschen Pflanzen-schutzdienstes* (Braunschweig) (29) 119-120.
- Enciso, J. 2007. Uso de sensores de humedad del suelo para efficientizar el riego. Texas A&M University, Servicios de extensión. , p12. B-6194. Disponible en: http://repository.tamu.edu/bitstream/handle/1969.1/87470/pdf_2437.pdf
- Fereres, E and V. González. 2009. Improving Productivity to Face Water Scarcity in Irrigated Agriculture. Crop Physiology. Capítulo 6. p. 122-143
- Ferreira, R.; G. Sellés; H. Silva; R. Ahumada; I. Muñoz, y V. Muñoz. 2006. Efecto del agua aplicada en las relaciones hídricas y productividad de la vid 'Crimson Seedless'. Brasília. *Investigación Agrícola Brasileira*, (41):7, 1109-1118.
- Houssein, O.; H. Mendoza; I. Abrisqueta; L. Tapia; J. Abrisqueta; J. Muñoz and M. Ruiz. 2008. Jun. Soil water content measure by FDR probes and thresholds for drip irrigation management in peach trees. Instituto nacional de investigaciones forestales. Mexico. *Agricultura Técnica Mexico*, (34)3: 313-322.

- Hsiao, T.. 2007. A systematic approach to the improvement of agricultural water use efficiency. Department of Land, Air and Water Resources. University of California. Davis. Series B N° 57. 7p
- IAEA. International Atomic Energy Agency. 2008. Field estimation of soil water content. a practical guide to methods instrumentation and sensor technology (cap. 30).Vienna. 141p. (Training course series)
- Jensen, M. 1968. Water consumption by agricultural plants. Agricultural Research Service (cap. 1), USDA, Kimberly, Idaho. Academic press, New York. 22p
- Kirkham, M. 2005. Principles of soil and water plant relations. Measurements of water potential with pressure chambers (cap. 17, pp 273-279). Kansas State University. United States of America, San Diego, California. 500p. (Academic press)
- Lamm F.R.; J. E. Ayars and F.S. Nakayama. 2007. Microirrigation for crop production, desing, operation and management. Developments in Agricultural ingeniering (cap. 2). El Sevier. 618p
- López-Urrea R.; A. Montoro; F. Mañas; P. López-Fuster and E. Fereres. 2012. Jun. Evapotranspiration and crop coefficients from lysimeter measurements of mature 'Tempranillo' wine grapes. *Agricultural Water Management*, 112: 13-20.
- Netzer, Y. A. Schwartz; B. Bravdo; C. Shenker and M. Yao. 2009. Water use and the development of seasonal crop coefficients for Superior Seedless grapevines trained to an open-gable trellis system grown in a semiarid region. *Irrigation Sciences*, 27: 109-120.
- Peacock, W.L.; L.E. Williams and L.P Christiansen. 1999. Water management and irrigation management and irrigation scheduling. n: Raisins production manual. L.P Christiansen (cap 16). University of California. 156-161
- Rodda J., y I. Shiklomanov. 2003. World water resources at the beginning of the 21st century. Cambridge: Cambridge University Press. 25p
- Rius, X. 2005. Apuntes de vitivicultura australiana. Agro Latino. Barcelona. 445p
- Sellés, G.; Ferreyra, R.; Aspillaga, C. y C. Zúñiga. 2012. Requerimientos de riego en uva de mesa: Experiencias en el Valle de Aconcagua. Instituto de Investigaciones Agropecuarias (INIA). Boletín INIA N° 242. Santiago de Chile.
- Sentek. 2013. Instalation manual for EnviroScan. Disponible en: <http://www.sentek.com.au/downloads/downloads.asp>
- Sierra, H. 2009. Modelación de la fenología en cultivares de vid de mesa (*Vitis vinifera* L.) en distintas localidades de Chile. Facultad de Ciencias Agronómicas. Universidad de Chile. 88p.
- Williams, L.; D. Grimes and J. Phene., 2010. The effects of applied water at various

fractions of measured evapotranspiration on reproductive growth and water productivity of Thompson Seedless grapevines. *Irrigation Science*, (28): 233–243

Williams, L. and L. Ayars. 2005. Grapevine water use and the crop coefficient are linear function of the shaded area measured beneath the canopy. University of California. *Viticulture & Enology. Agricultural and Forestry Meteorology*, (132): 201-211.

CAPÍTULO II: UTILIZACIÓN DE REGISTROS SONDAS FDR COMO HERRAMIENTA PARA DETECTAR EVENTOS DE CONSUMO DE AGUA AL INICIO DE LA TEMPORADA EN ‘THOMPSON SEEDLESS’

RESUMEN

Existe información imprecisa de los primeros eventos de consumo de agua en la temporada en las plantas de hábito caducifolio. Las tecnologías de sondas FDR permiten calcular el momento y cantidad de agua que debe aplicarse y son una alternativa para aumentar la eficiencia en el uso del agua en la agricultura. Se obtuvieron registros de sondas FDR de ‘Thompson Seedless’ desde salida del receso invernal hasta la floración, con el objetivo de determinar computacionalmente el inicio del consumo de agua en la temporada y evaluar un modelo predictivo de su ocurrencia en base a variables climáticas y fenológicas. Para el análisis computacional se desarrollaron dos funciones en Microsoft Excel y lenguaje de programación R. La primera función basada en la evapotranspiración de referencia (ETo) revela cuando el agotamiento de agua en el suelo sea superior a la relación $ETo \cdot 10^{-1}$. La segunda función detecta el cambio de tendencia del contenido de agua en el suelo en función el tiempo. El modelo predictivo del inicio del consumo de agua con las variables Evapotranspiración de referencia acumulado y días grado resultó ser significativo para ambas variables.

Palabras clave: Consumo, Riego, Modelación, Evapotranspiración, Días grado

ABSTRACT

There is no precise information of when do deciduous plants starts taking water from soil in the early season. Capacitance probes (FDR) were described to be very precise on measure water consumption and presumes to be an efficient tool to challenge efficient water management. Therefore, early season FDR ‘Thompson Seedless’ data was analyzed computationally in order to describe the first water intake in the season and assess a predictor model to describe when the starting point of water consumption occurs related to climatic and phonologic parameters. For the computational analysis, two programmable functions were developed in Microsoft Excel and R software with R language. The first function utilize potential evapotranspiration (ET_o), which reveal when soil water consumption overtake $ET_o \cdot 10^{-1}$ ratio. Second function detects changes in soil water tendency behavior in time. Further a predictor model relates de event with climatic variables such as cumulative ET_o and Day-Degree appears to be significant for both variables.

Keywords: Consumption, Irrigation, Modeling, Evapotranspiration, Day-degree

INTRODUCCIÓN

En agricultura de precisión el manejo del recurso hídrico uno de los mayores desafíos. La antigua concepción de mantener un cultivo bien regado ya no consiste en aplicar suficiente agua para mantener un nivel hídrico aceptable, sino que más bien involucra el aplicar la cantidad de agua necesaria en el momento que cada cultivo necesita (Castilla y Montalvo, 2005; Fereres y González, 2009). Las tecnologías disponibles para aumentar la eficiencia de aplicación del recurso hídrico han permitido a la agricultura moverse en dicha dirección, ya que la agricultura es responsable del 66 % de las pérdidas de agua dulce en el mundo (Rodda y Shiklomanov, 2003); entonces, cuidar el recurso hídrico se convierte en un problema que compete a todos por igual. Al respecto, las tecnologías de sondas de capacitancia tipo FDR (Frequency Domain Reflectometry) permiten al usuario llevar un control preciso del contenido de agua en el suelo en tiempo real, con excelentes resultados productivos en vid de mesa y otros cultivos, sin afectar en absoluto el rendimiento y calidad (Enciso, 2007; Ferreyra et al., 2006; Houssein et al., 2008; Callejas et al., 2014a). En algunos casos se ha logrado reducir hasta el 20% del agua que habitualmente se había estado aplicando en el parronal (Callejas et al., 2014a; Ferreyra et al., 2006). Sin ir más lejos, además de que el uso del recurso hídrico puede ser una limitante en el caso de algunos lugares del centro y norte de Chile (lugar donde se cultiva la vid de mesa), el agua representa un costo de aplicación, producto de la movilización de agua desde la bomba hacia los goteros o tranque de acumulación, instancia en donde es posible ahorrar hasta un 50 % de la energía eléctrica (Callejas et al., 2014a).

Por otra parte y en los lugares que el agua es escasa, muchos agricultores riegan en exceso, generando pérdidas de agua por percolación profunda, incluyendo con esta pérdida, el arrastre de fertilizante. En el largo plazo, ésta práctica perjudica enormemente la productividad de los huertos (Callejas et al., 2014a) ocasionado por la anoxia radicular, afectando los procesos metabólicos vitales de las plantas (Taiz y Zeiger, 2010).

Durante el periodo de brotación a floración, los agricultores tienden a regar prematuramente ya que el consumo en estas etapas suele ser mínimo y el reservorio de agua en el suelo se encuentra en el máximo nivel, siendo capaz de satisfacer agua suficiente para el cultivo en ésta etapa. Algunos autores declaran que bajo condiciones normales de suelo, riegos invernales o lluvias, el suelo puede satisfacer la demanda hídrica de la vid hasta la floración, que habitualmente ocurre 45 días posteriores a la brotación (Peacock et al., 1999; Sellés et al., 2012), donde podrían evitarse los excesos de riego, enfocados a satisfacer la demanda hídrica de la planta.

Antecedentes de flujo de savia para la variedad Flame Seedless, determinados en el valle de Copiapó (Proyecto FIA, datos no publicados), se ha observado que la tasa de flujo de savia se mantiene en el mínimo durante el invierno hasta la floración, donde la tasa aumenta de manera positiva e incremental. Siendo así, surge la pregunta: ¿Cuándo

debieran comenzarse los riegos en la temporada? , muchos estudios han documentado el consumo de agua temprana en la vid de mesa y desarrollado coeficientes de cultivo a nivel local (Williams y Ayars, 2005; López-Urrea et al., 2012, Sellés et al., 2012), sin embargo, se requieren mayores antecedentes para revelar la interrogante.

El coeficiente del cultivo (K_c) básicamente es un estimador de la fracción de consumo que representa un huerto sobre una condición climática referencial (E_{To}), en determinado momento del desarrollo del cultivo. considerando que la agricultura de hoy se sustenta en las bases del coeficiente del cultivo y evapotranspiración de referencia generados a nivel local (Allen et al., 2006). Posiblemente esta herramienta se aproxima bastante a la estimación requerida para realizar un manejo racional del riego. Sin embargo, la determinación del K_c al inicio de la temporada resulta en cálculos imprecisos, ya que mediante un riego de alta frecuencia, al inicio de la temporada el coeficiente del cultivo se puede explicar mayoritariamente por la evaporación directa del suelo. La situación al inicio de la temporada puede verse aún más incierta, considerando que la utilización del K_c para estimar los riegos, se vuelve una herramienta que sobre estima la demanda excesivamente al compararse con otros métodos de estimación como el potencial xilemático de mediodía medido con la bomba de presión de Schollander (Acevedo-Opazo et al., 2010) o la utilización de las sondas FDR (Callejas et al., 2013). Al seguir un método de riego de alta frecuencia la principal tarea en las etapas tempranas de desarrollo de la vid es reponer el agua que se evapora directamente del suelo, que ocurre mayoritariamente entre los 10 a 20 cm de profundidad. En cuanto a los requerimientos hídricos de la vid de mesa posiblemente el consumo de agua en la vid permanece al mínimo y el desarrollo de los tejidos vegetales no permite transportar agua prematuramente por su inmadurez (Netzer et al., 2009). En este trabajo se estudian los registros numéricos de sondas FDR en las etapas de primavera (de brotación a floración) para describir el comportamiento del agua en el suelo en este periodo de la temporada. El objetivo de este trabajo fue constituir una metodología y herramientas para determinar el inicio del consumo de agua en la temporada en 'Thompson Seedless' que equivale al inicio del déficit de contenido de agua detectado mediante las sondas FDR que puede analizarse mediante análisis computacional en conjunto con los registros climáticos y de desarrollo fenológico.

HIPÓTESIS

La detección del inicio del consumo de agua en ‘Thompson Seedless’ en la temporada es predecible de acuerdo a variables climáticas y fenológicas.

OBJETIVO GENERAL

Desarrollar un índice ó indicador de inicio del consumo de agua en la temporada para la vid, utilizando variables como: Evapotranspiración de referencia (ET_o), días grado (DG) y/o fenológicas.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Objetivo 1 Desarrollar un índice o indicador de inicio de consumo de agua para ‘Thompson Seedless’ basado en un análisis computacional de sondas FDR.

Objetivo 2 Predecir el momento de inicio del consumo agua de la planta en la temporada en base a variables climáticas y/o de desarrollo fenológico.

MATERIALES Y MÉTODO

Sitios de estudio

Los sitios de estudio corresponden a cuatro predios ubicados en las regiones de Atacama y Libertador Bernardo O'Higgins (Cuadro 2). Los predios consisten en huertos de vid de mesa cv. Thompson Seedless establecidos (adultos y en plena producción) destinados a la explotación comercial de fruta para exportación. De cada predio se obtuvieron registros de la sonda FDR o base de datos, lugar donde ya se contaba con la instalación previa de acuerdo al protocolo del fabricante (Sentek, 2013), ratificándose su correcto funcionamiento y variabilidad. Cada predio puede contener más de una sonda ó base de dato, ya que la sonda representa la información de una unidad productiva que es nombrada con un código.

Cuadro 2. Predios de donde provienen los registros de sondas de FDR. Nótese que de cada predio pueden existir más de una base de dato o unidad productiva.

Predio	Región	Comuna	Unidades productivas	Coordenadas de los predios			
1	Atacama	Tierra Amarilla	Sonda C5	27°	37'	19.41''	S
			Sonda C6	70°	14'	22.33''	O
2	L.B. O'Higgins	Sn. Vicente Tagua Tagua	Sonda Uetum1	34°	27'	52.59"	S
			Sonda Uetum2	71°	11'	36.51"	O
			Sonda Uetum3				
3	L.B. O'Higgins	Sn. Vicente Tagua Tagua	Sonda Uch6	34°	27'	52.62''	S
			Sonda Uch7	71°	11'	36.57''	O
4	L.B. O'Higgins	Placilla	Sonda Sumcz	34°	27'	52.62''	S
				71°	11'	36.57''	O

Materiales

Las sondas FDR utilizadas corresponden al modelo EnviroScan® que consiste en un tubo cilíndrico protector de PVC de 1,8 metros de largo que en su interior contiene un vástago con cuatro sensores móviles a profundidades de 15, 30, 50 y 80 cm, instalado en el suelo al pie de una planta sana, de productividad promedio. La sonda realiza mediciones continuas (cada 15, 20 o 30 minutos) del contenido volumétrico de agua en el suelo, donde cada sensor funciona de manera independiente, pudiendo posteriormente observarse e interpretarse en una interfaz gráfica. Finalmente cada sonda se acompaña

de un 'logger' donde se registran y almacena la información, desde donde se puede descargar directamente la información vía puerto USB ó también mediante un sistema de telemetría que permite enviar la información a un dispositivo o a internet en tiempo real. Todos los predios utilizan riego por goteo y son manejados para producción convencional de uva de mesa de exportación.

La información de la sonda se visualizó mediante el software IrriMax® v 9.1, que es comúnmente utilizado para prever los momentos de riego y revisar el contenido de agua del suelo en tiempo real. El software también permite al usuario exportar la información numérica en distintos formatos ejecutables como Microsoft Excel® u otro procesador de datos.

Los estados de desarrollo de la vid se registraron para cada sitio mediante la metodología descrita por Eichhorn y Lorenz (1977) modificado por Coombe (1995) (Cuadro 3).

El análisis de información se realizó mediante la plataforma RStudio® (R Core Team, 2016) y Microsoft Excel®.

Método

Caracterización de los sitios de estudio

Las bases de dato de la sonda FDR o unidades productivas obtenidas de los sitios de estudio provienen de las temporadas 2012 - 2013 y 2013 - 2014.

Cada unidad productiva fue caracterizada con las variables: rendimiento ($\text{ton}\cdot\text{ha}^{-1}$), clase textural del suelo, portainjerto, consumo anual de agua ($\text{m}^3\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{año}^{-1}$) registros de la temperatura media, evapotranspiración de referencia y estados fenológicos. Todos estos registros se obtuvieron gracias a la información de productores participantes en el marco de proyecto FIC, siendo UCHILECREA facilitador de la información. Los registros de fenología se registraron basándose en la metodología de descripción fenológica de Eichhorn y Lorenz (1977), adaptado por Coombe (1995) (Cuadro 3).

Cuadro 3. Escala de estados fenológicos de la vid. Eichhorn y Lorenz (1977) adaptado por Coombe (1995).

01 Reposo invernal; yema invernal con escamas mas o menos cerradas	23 50% caliptras caídas
02 Yema hinchándose, las yemas abren escamas	25 Finales de floración; 80% caliptras caídas
03 Punta algodonosa; borra pardusca claramente visible	27 Cuajado de frutos; jóvenes frutos comienzan a hincharse, quedan residuos de flores perdidas
05 Apertura de la yema; primer brote verde claramente visible	29 Bayas pequeñas; los racimos comienzan a colgar
07 Primera hoja abierta y nacida del brote	31 Bayas tamaño arveja; los racimos cuelgan
09 Dos a tres hojas extendidas	33 Comienzan a juntarse las bayas
12 Cinco a seis hojas extendidas	35 Comienzo de maduración de las bayas; inicio de la perdida de color verde (envero)
15 Inflorescencia alargándose; flores estrechamente juntas	38 Uvas maduras para la recolección o cosecha
17 Inflorescencia totalmente desarrollada; flores separándose	41 Después de cosecha, fin de maduración de la madera
19 Comienzo de la floración, caída de primeras caliptras	43 Comienzo caída de la hoja
21 Floración temprana; 25% de caliptras caídas. Plena floración;	47 Fin caída hoja

Determinación del inicio de consumo de agua en la temporada mediante los registros FDR

La determinación del inicio del consumo de agua consiste en estandarizar y proponer un concepto práctico para definir cuando el inicio del consumo de agua de la variedad Thompson Seedless es evidente en la temporada. Los siguientes pasos de este estudio dan a lugar a una metodología original para este evento en la temporada.

Consistencia de los archivos de datos y obtención de los registros FDR. La información de las sondas de capacitancia fue proporcionada a través de la plataforma UCHILECREA, en el Laboratorio de Viticultura, Facultad de Ciencias Agronómicas de la Universidad de Chile, Santiago, Chile.

Cada registro corresponde a un archivo equivalente a una base de datos de contenido de humedad en función del tiempo que ha registrado ésta información por al menos dos temporadas continuas. Luego de la obtención de los registros, se revisaron y verificaron

mediante el software IrriMax®, con el motivo de evaluar tres parámetros de consistencia del archivo, las que se codificaron con letra SI (si cumple con la condición), o NO.

Los parámetros son los siguientes:

a) Continuidad gráfica de las mediciones. Se realizó una revisión visual de la base de datos numérica, graficándose el contenido de agua en función del tiempo. Para que exista una continuidad gráfica se espera que la información mantenga una continuidad en el tiempo y que esté ausente de espacios sin información en la gráfica (superiores a 1 semana).

b) Máximo contenido de agua antes de brotación. De acuerdo con la metodología descrita en Callejas et al. (2014b) y Houssein et al. (2008), el máximo contenido de agua que puede contener un suelo se puede estimar mediante un análisis gráfico de los registros de sonda FDR. De esta manera se pudo identificar la condición de humedad con la que el suelo se encontraba antes de la brotación, lo que permite iniciar el análisis de las unidades productivas desde una condición de máxima capacidad de retención de agua.

c) Ausencia de anomalías en las mediciones. Cuando ha sucedido que bases de datos han sido dañadas por problemas eléctricos o no han sido cambiadas las baterías, se pueden observar patrones gráficos rectos que son incongruentes con el comportamiento habitual del contenido de agua en el tiempo (Sentek, 2013). Esta información errónea ocasiona datos numéricos demasiado extremos dificultando el análisis computacional y algorítmico.

Cada base de datos debió cumplir con cada uno de estos tres requisitos (continuidad, máximo contenido de agua previo a brotación y ausencia de anomalías), de lo contrario fueron descartadas si alguna de ellas no calificase en alguno de los parámetros. Posteriormente, las bases de datos se exportaron como archivos ejecutables mediante Microsoft Excel® donde cada medición de la sonda FDR es visible como información numérica. Posteriormente, los archivos se les otorga el formato que sea más conveniente, como por ejemplo: 'coma separated values' (csv). En este punto se obtuvo una base de datos numérica que contiene la información independiente de cada sensor, con mediciones cada 15 minutos en el tiempo. Finalmente la base de datos se compila con la variable evapotranspiración de referencia consolidándose la información necesaria para hacer el análisis.

El procedimiento anterior da origen a una base de datos numérica donde es posible realizar operaciones matemáticas, graficar y establecer relaciones.

Consideraciones previas al análisis computacional. Se consideró en el análisis los sensores de 30 y 50 cm de profundidad, los cuales se sumaron para unificar la información. El sensor de 80 cm fue descartado porque sólo permite evaluar el tiempo de riego (Callejas et al., 2014b) y el consumo de agua por debajo de éste sensor no representa ningún uso práctico cuando se tiene sistema de riego por goteo (Callejas et

al., 2014a). A pesar de que el sensor que mide a 15 cm de profundidad es de vital importancia en la práctica de riego, se descartó su uso en esta investigación porque altera la interpretación gráfica, ya que al estar ubicado cercano a la superficie, está sujeto a los efectos de la evaporación en los primeros 10 a 20 cm de profundidad (Allen et al., 2006).

Con el objetivo de generar una detección objetiva, se construyeron dos funciones programadas en lenguaje de programación R, mediante la plataforma (ambiente de trabajo) RStudio®. La primera función consistió en un buscador computacional basado en el consumo de agua diario y su asociación con la evapotranspiración de referencia (ET_o). La segunda función interpreta el comportamiento del contenido de agua en el suelo en función del tiempo.

Primera función programada (f₁) basada en la ET_o. La función utiliza la ET_o para objetivar la tasa diaria de consumo de agua, considerando los sensores de 30 y 50 cm. En esta metodología se propuso que cuando la tasa diaria de consumo de agua fuera superior al 10% de la ET_o del mismo día, y de acuerdo a lo observado en condiciones de campo mediante sondas FDR (Callejas et al., 2014b), corresponde a un instante donde el consumo de agua es importante y que debe ponerse atención. El desarrollo del algoritmo debió estar constituido de manera que pudiese considerar que cuando el consumo de agua supere al 10% de la ET_o, éste se mantenga en el tiempo. También la función evita la falsa interpretación de las variaciones positivas de contenido de agua, por ejemplo, los generados por un riego largo, lluvia abundante o movimientos de agua hacia la superficie por capilaridad, donde se descartaría que ocurrió este evento. En detalle, el algoritmo realiza iteraciones sobre cada día y evalúa si la condición es verdadera (TRUE) o falsa (FALSE), cuando encuentra una secuencia de más de 5 valores TRUE para esta condición, el algoritmo debe detenerse y retorna como resultado una fecha exacta, con lo cual finaliza la tarea de búsqueda. Se debe considerar que los registros completos de la sonda son mediciones del contenido de agua en el suelo que se separan 15 a 20 minutos entre sí. Para esta función consideraron los valores promedio diario de contenido de agua, llevando el análisis a un promedio del consumo diario. La utilización del valor diario se realiza de esta manera porque coincide con la unidad mínima de los registros de evapotranspiración de referencia (ET_o).

Segunda función programada (f₂) ó detección de cambio tendencial. La primera función solo es de utilidad si es complementada con la segunda función, dado que con f₂ se termina el análisis. La segunda función tiene como objetivo evaluar el comportamiento del contenido de agua en el suelo en función del tiempo, para corroborar si el comportamiento tendencial cambia desde una condición de estabilidad, a una que decrece en el tiempo. Por consiguiente, se propuso que la f₂ corroborara los siguientes supuestos:

- Probar si el contenido de agua proviene de una condición de estabilidad, asociado a una condición de humedad máxima explicando que la tendencia es cero y existe una alta probabilidad de que el consumo de agua sea mínimo.

- Detectar si el comportamiento del contenido de agua en el suelo en función del tiempo realiza un cambio tendencial. Este segmento de la función alerta si el contenido de agua tiene una tendencia hacia la baja del contenido de agua, explicado por un déficit de contenido de agua respecto a un instante pasado en tiempo.

- Verificar si el cambio de tendencia se mantiene en el tiempo. La función revisa si efectivamente el evento de cambio de tendencia es una condición distinta a la de tendencia cero o estable, y se encuentra en una situación donde el déficit de contenido de agua generado en el tiempo es una condición que se repite consecutivamente.

La f_2 se programó en lenguaje de programación R mediante la plataforma RStudio® (R Core Team, 2016) siguiendo la metodología de análisis de serie de tiempo (Edwards y Magee, 1996).

Como se mencionó anteriormente, f_2 utiliza y depende de f_1 ya que se concatenan ambas funciones para dar un resultado. A partir de la primera función se encuentra una fecha que la segunda utiliza para fijar un rango de análisis que corresponde a un periodo de 30 días en el pasado y 10 hacia el futuro. Finalmente el análisis de la segunda función terminó con una fecha exacta para cada una de las unidades productivas que se analizaron, indicando el inicio del consumo de agua en la temporada.

Herramienta automatizada de cálculo de riego en primavera. Finalmente, como parte de este estudio se propone un sistema programable de algoritmos indicadores que calculen y recomienden una calendarización de los riegos para la etapa temprana de la vid (de brotación a floración), basado en la detección del inicio del consumo de agua. La herramienta encuentra el nivel de humedad mínimo admisible (MDHA) (Castilla y Montalvo, 2005) para luego predecir en base al nivel de humedad en el instante de tiempo (t_i), cuantos días tardará el suelo secarse para alcanzar MDHA bajo una determinada tasa de consumo promedio.

Dicho lo anterior, se desarrollaron una serie de pasos metodológicos para generar la herramienta de riego. Primer paso (i) consistió en evaluar si la segunda función (f_2) es de utilidad para calcular el mínimo de humedad admisible (MDHA). Segundo paso (ii) llevar a cabo la integración en tiempo real de la función 1 (f_1) y función 2 (f_2). Tercer paso (iii) consistió en un predictor de los días que restan para realizar el riego, basado en un escenario simulado por el consumo actual y la condición de ETo.

Modelo predictivo del evento de inicio del consumo de agua en la temporada

Se utilizó un ‘biofix’, que corresponde a un evento o marcador biológico con el objetivo de estandarizar y hacer comparables las variables predictoras que se utilizaron en el estudio. El ‘biofix’ se estableció como la primera aplicación de oídica en la temporada, que fenológicamente corresponde a brote de 10 a 15 cm en vid de mesa (Flaherty et al., 1992) equivalente a estado fenológico 15 según Eichhorn y Lorenz (1977) modificado

por Coombe (1995). Las variables predictoras consistieron en variables climáticas cuantificadas en unidades térmicas o días grado (DG) y evapotranspiración de referencia acumulada (ETo Ac).

Una vez cuantificadas las variables predictoras días grado y evapotranspiración de referencia acumulada en unidades térmicas y milímetros acumulados, respectivamente, se calculó la media aritmética (μ), desviación estándar (ds) y coeficiente de variación (Cv) de cada variable con el objetivo de analizar los estadísticos de distribución, posición y variabilidad.

Posteriormente, mediante los estadísticos calculados (μ y ds), se simulan 940 datos con distribución normal (Braun y Murdoch, 2007; Wayne, 1991), utilizados posteriormente para realizar un análisis de regresión logística (R Core Team, 2016), el cual predice el inicio del consumo de agua en la temporada (variable binaria como éxito o fracaso) en función de las variables: evapotranspiración de referencia acumulada (EToAc) en milímetros y días grado (DG) en unidades térmicas. Los registros de la fecha de estados fenológicos para el día donde se determinó el inicio del consumo de agua se analizaron de manera descriptiva.

Análisis estadístico

Para la determinación del indicador de inicio del consumo agua se realizó un estudio que involucró las variables; contenido de agua en el suelo, tiempo y evapotranspiración de referencia, donde se utilizaron operaciones aritméticas para satisfacer los objetivos requeridos. Para ello se utilizó Microsoft Excel® y el lenguaje de programación R, mediante la plataforma RStudio®. La primera aproximación algorítmica (función 1) se realizó mediante Microsoft Excel® y posteriormente para la gráfica y análisis de serie de tiempo (función 2) se utilizó R (R Core Team, 2016).

Con el fin de generar un modelo estadístico predictivo del evento de punto de inicio, ya sea como éxito o fracaso (variable binaria) en función de las variables predictoras evapotranspiración de referencia acumulada (ETo Ac) y días grado (DG) (variables continuas), se realizó mediante modelos lineales generalizados (Infostat, 2016; Dobson, 2002). Esta modelación se realizó utilizando el lenguaje de programación estadística R (R Core Team, 2016).

El coeficiente de variación (Cv) de las variables ETo Ac y DG respuesta a este evento, se calculó mediante Microsoft Excel®.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Caracterización de los sitios de estudio

De acuerdo a ODEPA (2015), la producción (Cuadro 4) coincide con los rendimientos promedio para un cultivo de explotación comercial de ‘Thompson Seedless’ destinado a exportación y representan un consumo de agua anual razonable para un huerto gestionado a través de la sonda FDR (Callejas et al., 2014a; Sellés et al., 2012).

Cuadro 4. Caracterización de las unidades productivas, promedio de dos temporadas de rendimiento y consumo de agua, incluyendo el indicador de uso eficiente de agua de riego (EUA).

Unidades productivas	Portainjerto	Clase textural	Rendimiento (ton · ha ⁻¹)	Consumo de agua (m ³ · ha ⁻¹ · año ⁻¹)	EUA (ton · m ⁻³)
C5	Franco	Franco arenosa	23.700	8.000	2,92
C6	Franco	Franco arenosa	24.600	8.500	2,89
Uetum1	Franco	Franco arenosa	23.700	8.000	2,96
Uetum2	Freedom	Franco arenosa	25.400	7.500	3,38
Uetum3	Freedom	Franco arenosa	26.200	7.000	3,74
Uch6	Freedom	Franco arcillosa	25.750	6.000	4,29
Uch7	Freedom	Franco arcillosa	26.650	6.000	4,44
Sumcz	Franco	Franco arenosa	20.700	9.500	2,17

La información climática de ETo que se utilizó en el análisis del estudio, se graficaron con el objetivo de inspeccionar su comportamiento en el tiempo (figuras 4 y 5).

Los registros de temperatura media y fenológicos constan de dos archivos para las comunas de Tierra Amarilla y San Vicente de Tagua Tagua (Apéndices 1 y 2).

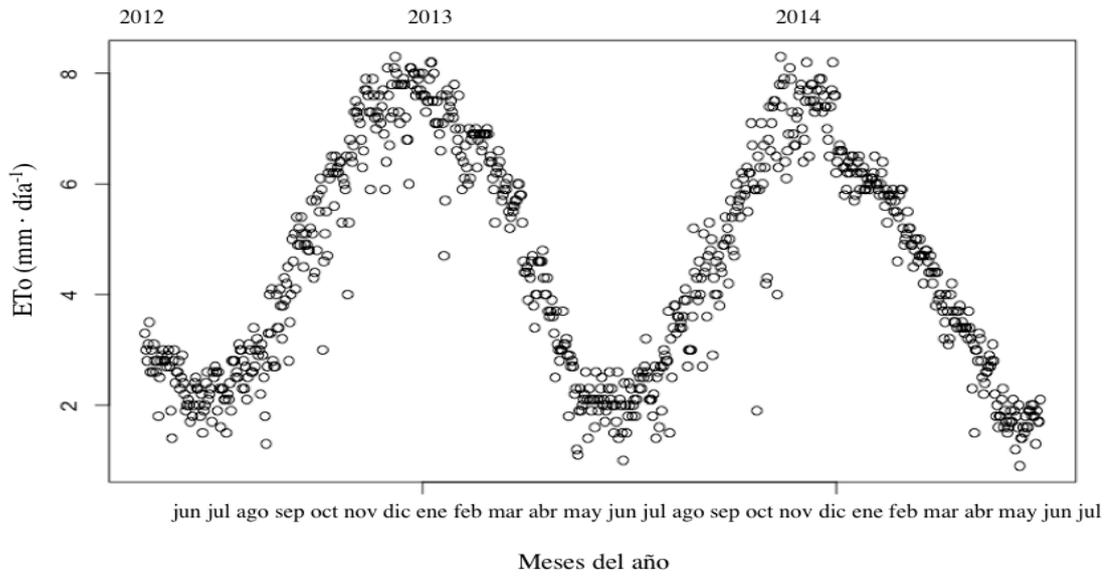


Figura 4. Registros de ETo para la comuna de Tierra Amarilla, representa a los registros de las bases de datos ‘C5’ y ‘C6’.

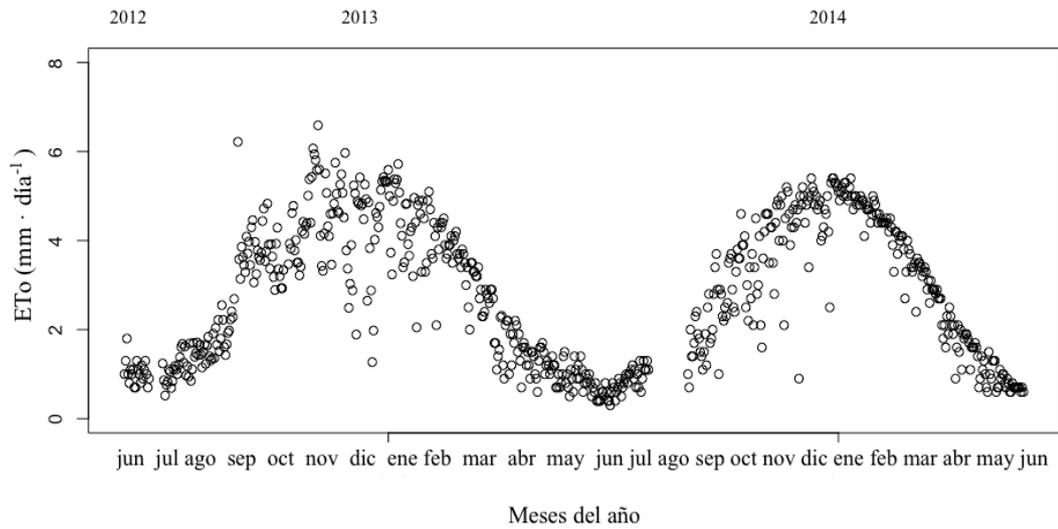


Figura 5. Registros de ETo para la comuna de San Vicente Tagua Tagua, representa a los registros de las bases de datos ‘Uetum1’, ‘Uetum2’, ‘Uetum3’, ‘Uch7’ y ‘Uch6’.

Determinación del inicio de consumo de agua en la temporada mediante los registros FDR

El análisis de desarrollo y determinación de inicio del consumo de agua resultó en un procedimiento metodológico computacional utilizando los registros de las sondas FDR.

Consistencia de los archivos de datos y obtención de los registros FDR

Las bases de dato de las sondas FDR descargadas desde la plataforma de sondas FDR en el sitio de UCHILECREA, fueron inspeccionadas mediante IrriMax® para evaluar su consistencia. Los criterios de análisis gráfico fueron acordes a la metodología propuesta para la utilización de sondas FDR (Callejas et al., 2014b; Houssein et al., 2008), permitiendo seleccionar las bases de dato y descartando las inconsistentes por falta de registros o actividad del sensor (Cuadro 5).

Comúnmente las anomalías en la sonda FDR (criterio de inconsistencia) indica que el equipo no se ha instalado adecuadamente o que la mantención ha sido descuidada (Sentek, 2013). Otra causa de descarte que ocasiona anomalías, son las prácticas de riego incompatibles con el análisis gráfico, como: frecuencias de riego muy altas o volúmenes demasiado grandes, como se pudo observar en ‘Sumcz’ (Cuadro 5).

Para evaluar la condición de máxima humedad previo a la brotación, se verificó de acuerdo a la metodología según Houssein et al. (2008) la manera de conocer si esta condición se cumple en la observación gráfica de las sondas de capacitancia. La condición de máxima humedad ocurre cuando transcurren 24 o 48 horas después de un riego largo o lluvia invernal, ya que es de conocimiento común, que la capacidad de campo, se determina tras 24 o 48 horas después de un riego, dependiendo del tipo de suelo (Castilla y Montalvo, 2005).

Respecto a la continuidad de las bases de datos, se puede mencionar que a pesar de que la base de dato de una unidad productiva puede estar parcialmente rota o incompleta, no resultó impedimento para ser estudiada mediante el análisis computacional, ya que el periodo requerido es desde finales del receso invernal hasta la floración. Por ejemplo la unidad productiva ‘Uch7’ no fue descartada por continuidad a pesar de que la temporada 2013- 2014 se encontraba con anomalías y registros faltantes, en la temporada 2012-2013 los registros FDR se encontraban en un estado aceptable de acuerdo a los criterios consistencia.

Cuadro 5. Resultados del proceso de limpieza y consolidación para las bases de dato, basado en la observación gráfica¹ mediante software IrriMax® v 9.1.

Unidad productiva	Región	Parámetros			
		Continuidad	Max. contenido de agua	Anomalías	Descartada
C5	Atacama	SI	SI	OK	NO
C6	Atacama	NO	SI	OK	SI
Uetum1	L.O'Higgins	SI	SI	OK	NO
Uetum2	L.O'Higgins	SI	SI	OK	NO
Uetum3	L.O'Higgins	SI	SI	OK	NO
Uch7	L.O'Higgins	SI	SI	OK	NO
Uch6	L.O'Higgins	NO	SI	OK	SI
Sumcz	L.O'Higgins	SI	NO	NO	SI

¹ Acorde a la metodología descrita por Callejas et al. (2014b).

Al finalizar esta limpieza se descartaron las unidades productivas: 'Uch6', 'Sumcz' y 'C6'. Como aparece en el Cuadro 5, las unidades productivas 'Uch6' y 'C6' se descartaron por falta de continuidad de la información, ya que en este caso existían datos faltantes en el periodo crítico del análisis (desde brotación a floración). En el caso de 'Sumcz' el motivo de descarte proviene de una serie de anomalías en los valores del contenido de agua, atribuibles a un problema de mantenimiento (Sentek, 2013), también pudo haberse descartado por la excesiva frecuencia de riegos, lo que altera la interpretación gráfica y posteriormente su análisis numérico. Se terminó con cinco bases de datos

Primera función programada (f_1) basada en la ETo

El objetivo de la primera función es obtener el punto donde la tasa de agotamiento de agua en el suelo o consumo de agua sea superior al 10 % de la ETo.

Para sustentar la idea de que un 10% de la ETo representa un consumo de agua relevante, se graficó el comportamiento del consumo de agua conjuntamente con la relación consumo \cdot ETo⁻¹ en el tiempo (Figura 6). En el gráfico se observa que ambas líneas se comportan de manera similar hasta que se distancian entre el 30 de octubre y 3 de noviembre. A pesar de que la escala de la gráfica está adecuada para hacer más evidente esta separación, lo que se pretende mostrar es que ocurre un aumento considerable del consumo en torno a la relación consumo \cdot ETo⁻¹ = 0,1 o 10%. El consumo de agua para este análisis corresponde a una representación del déficit diario de agua detectado mediante la sonda FDR, ya que la sonda FDR mide las variaciones del contenido de agua en el suelo y un déficit en el contenido corresponde a una extracción o movimiento de agua.

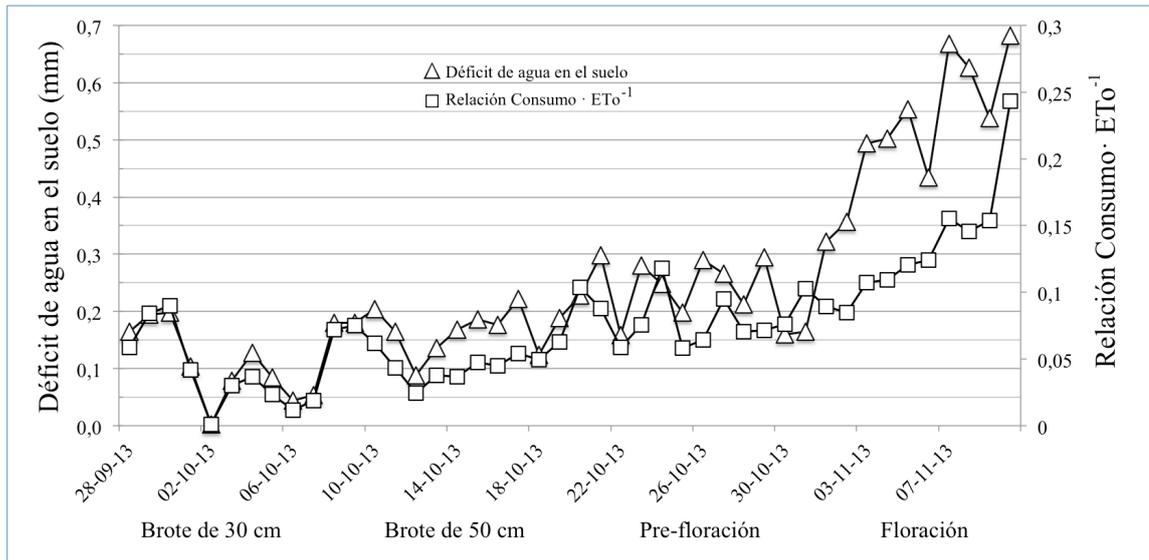


Figura 6. Déficit de agua en el suelo en función del tiempo contrastado con la relación consumo de agua y 10% de ET_0 . Unidad productiva ‘Uetum3’.

La utilización de la variable ET_0 como un algoritmo buscador, se sustenta en que es una variable comúnmente utilizada en la agricultura, lo que aumenta la posibilidad de implementarla de manera práctica en condiciones de terreno.

Por otra parte, se utilizó el valor de 10% de ET_0 como indicador debido a que usualmente el 10 % de ET_0 explica en gran medida cuando la planta comienza a activar su capacidad de extraer agua del suelo, ya que en condiciones de terreno y evaluado mediante la sonda FDR correspondería a un punto crítico en la temporada (Callejas et al., 2013). Cabe mencionar que el valor del 10 % para esta investigación, continúa siendo un valor arbitrario que se ha seleccionado en base a las experiencias de riego que se tienen con las sondas FDR (Callejas et al., 2014a) y no se encuentra sustentado bibliográficamente.

Teniendo en cuenta estas consideraciones, se construyó la primera función (f_1), que consiste en un algoritmo de búsqueda que se explica mediante un flujo de trabajo (Figura 7). Al ejecutar la f_1 sobre las bases de datos, ésta retorna una fecha para cada unidad productiva (Cuadro 6).

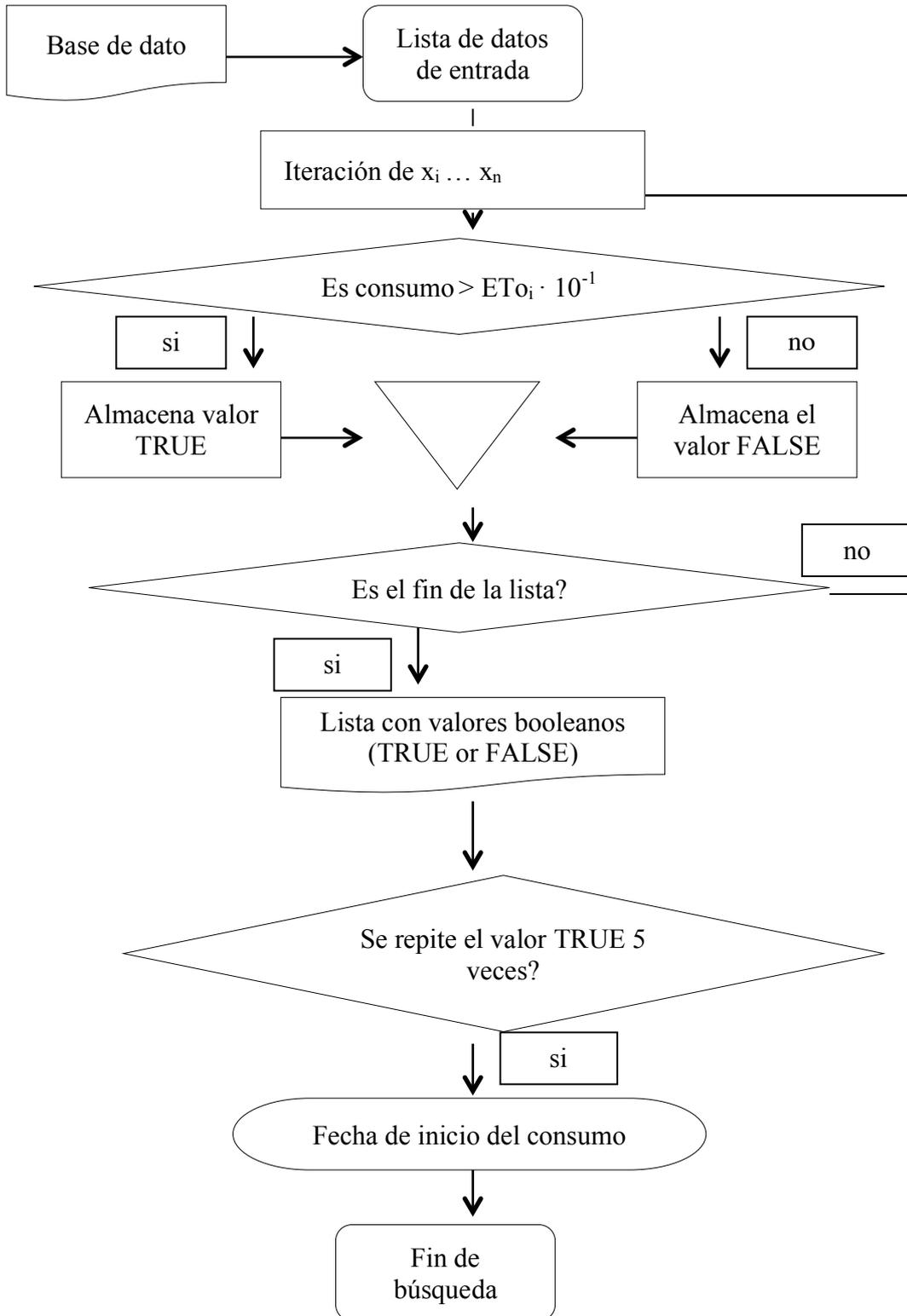


Figura 7. Diagrama de tareas realizadas en la función 1 (f₁).

Cuadro 6. Fechas de inicio del consumo de agua de acuerdo a la primera función (f_1).

Unidad productiva	Temporada 2012- 2013	Temporada 2013-2014
C5	28 agosto	21 agosto
Uetum1	04 noviembre	04 noviembre
Uetum2	24 noviembre	08 diciembre
Uetum3	06 noviembre	30 noviembre
Uch7	27 octubre	18 octubre

Es importante mencionar que la propuesta de que el consumo de agua supera la relación 10% de la ETo, puede compararse con el coeficiente del cultivo ($K_c = 0,1$ (Allen et al, 2006), sin embargo, no es correcto afirmar, debido a que este estudio sólo se considera el consumo que ocurre entre los 30 a 50 cm de profundidad, evitando incluir lo que ocurre con la evaporación directa de los primeros centímetros de suelo. Siendo que para la etapa de desarrollo desde brotación a floración, el consumo de agua registrado depende mayoritariamente de la evaporación directa.. De acuerdo a los K_c determinados por Sellés et al. (2012), se aprecia que las fechas de los coeficientes de cultivo de valor $K_c = 0,1$ no coinciden con las fechas presentadas en la primera determinación, separando la posibilidad de relacionar un coeficiente 0,1 equivalente al 10% de ETo utilizado.

Segunda función programada (f_2) ó detección de cambio de tendencia

Las fechas que se encontraron en la primera función se utilizan como insumo para la segunda función, ya que el algoritmo requiere que se le indique una fecha de punto de inicio de consumo de agua para realizar el análisis, donde el algoritmo utilizará la información de 30 días atrás y diez días hacia el futuro de dicha fecha (f_1). Ésta función tiene como tarea (i) verificar la condición de estabilidad de contenido de agua (ii) encontrar un cambio en la tendencia del contenido de agua en función del tiempo y (iii) verificar si el cambio de tendencia se mantiene en el tiempo. A diferencia de la primera función (que utilizó los valores diarios de consumo de agua), se utilizaron los registros completos. Para cumplir los objetivos de la función, la primera tarea fue transformar todas las mediciones a medias móviles con $n = 81$, donde el valor n corresponde aproximadamente a la cantidad de datos que registra la sonda durante un día. Adicionalmente, el valor de $n = 81$ fue elegido porque éste logró suavizar la curva de contenido de agua y minimiza los valores extremos (Edwards y Magee, 1996). El siguiente procedimiento consistió en comparar cada valor de media móvil respecto a su anterior explicado en el siguiente pseudocódigo [1]:

$$\text{Media móvil } (x) = \frac{1}{n} \sum_{i=0}^{n-1} x - i \quad [1]$$

Si $\{x_i < x_{(i-1)}\}$;

$$x_i == \text{TRUE}$$

De otro modo;

$$x_i == \text{FALSE}$$

A partir del procedimiento se genera una lista indexada de valores TRUE o FALSE. La lista indexada se modifica expresando los valores booleanos en términos numéricos binarios; 0 y 1. En otras palabras, la tarea que realizó el algoritmo señala que siempre que se cumpla la regla, existe una variación negativa del contenido de agua en el suelo, ya que si el valor de contenido de agua actual (x_i) es menor al del día anterior ($x_{(i-1)}$) significa que se ha generado un déficit en el contenido de agua en el instante i . De lo contrario, el valor FALSE indica que el contenido de agua el suelo no ha variado.

Para poder realizar el análisis y responder a los objetivos de esta función, se vuelve a operar sobre la lista booleana con media móvil $n = 436$, equivalente a 5 días de registros de la sonda (10% de los datos pueden estar ausentes). Finalmente se genera una nueva lista con promedios de los valores numéricos 0 y 1. El volver a operar sobre la lista con medias móviles $n = 436$ genera promedios de los valores 0 y 1 generando a su vez valores continuos entre 0 y 1.

La presencia de valores cercanos a 1 representa en la segunda lista una alta proporción de valores TRUE. Lo anterior se utilizó como el indicador definitivo, ya que se pudo observar que la frecuencia de valores TRUE aumenta abruptamente desde 0,2 hasta 0,9, indicando que la tendencia de los valores ha cambiado desde una condición de estabilidad de contenido de agua, hacia un inicio de agotamiento de agua evidente, marcado por la frecuencia de valores TRUE en la función (Figura 8). Lo anterior queda en evidencia cuando se grafica la lista que retorna el algoritmo, observándose que la frecuencia de valores TRUE aumenta desde 0,2 hasta 0,9, indicando que la tendencia cambia abruptamente en este punto (Figura 8). Para ésta parte del desarrollo, se tuvo que considerar la gran cantidad de valores verdaderos que se encontraban fuera de contexto o erróneos, es por eso que no existe el valor 1 absoluto ni 0 absoluto.

Aunque para efectos del análisis, la condición de una gran cantidad de datos erróneos o incongruentes no se generaron contradicciones en el código (Apéndice III), la presencia de riegos (variaciones positivas en el contenido de agua en el suelo), movimiento de agua hacia sectores con menor humedad, debieron considerarse previo a la construcción de la función, permitiendo que esos valores no generen alteraciones numéricas y consecuente mal interpretación del indicador. Por ello, se ha tenido en cuenta que los datos analizados poseen una variación importante respecto a su comportamiento promedio, alejándose de la posibilidad de modelar los datos de una manera determinista (Wayne, 1991). En consecuencia, se decidió generar un modelo con operaciones aritméticas simples y eficientes, considerando los datos con distribución y comportamiento promedio. A pesar de que se reflexionó que el modelo podría carecer de precisión, la simpleza en la modelación de ambientes complejos como lo es la rizósfera, se considera algo deseable dentro de ésta disciplina (Braun y Murdoch, 2007) y puede anteponerse a la complejidad de los ambientes con grandes utilidades prácticas.



Figura 8. Comportamiento gráfico del resultado del algoritmo. Recorrido corresponde al número de iteraciones sobre la lista. En un inicio la fracción de valores TRUE se mantiene por debajo de 0,2, aumentando drásticamente hasta llegar a 0,9 (recorrido de la lista $x = 2100$).

Se pudo verificar que la función que da origen al indicador, cumple con los requisitos y es capaz de responder a las tres consideraciones o restricciones que se impusieron:

(i) Detectar la estabilidad del contenido de agua. Cuando los valores de la lista no sean superiores a 0,9 el contenido de agua del suelo indica que no hay suficientes valores que representen un consumo de agua. Así mismo, ‘el flanco’ que corresponde al periodo de transición entre los valores inferiores 0,2 hasta el valor 0,9 no representa interés en este estudio, porque deben considerarse como periodos de inestabilidad tendencial (Edwards y Magee, 1996).

(ii) Detectar el cambio de tendencia. El valor 0,9 representa un punto crítico que marca un cambio de la dinámica del agua en el suelo, donde queda en evidencia el agotamiento de agua en el suelo, dado que la condición del algoritmo: $\{x_i < x_{(i-1)}\}$ es verdadera en un promedio de 90%.

(iii) Verificar si la tendencia se perpetúa en el tiempo. Si el valor 0,9 vuelve a repetirse al menos 45 veces (de uno a dos días según los intervalos de medición), indica que la condición de agotamiento de agua en el suelo está ocurriendo de manera reiterada, lo que significa en términos de un análisis técnico, que la tendencia va hacia la baja. Éste hito representa dentro del código algoritmo (Apéndice III), información de que el inicio del consumo de agua ocurrió en algún punto del pasado.

Finalmente, la función retorna una fecha exacta para cada unidad productiva, indicando en qué momento se ha iniciado el consumo de agua en la temporada (Cuadro 7). El procedimiento y las tareas llevadas a cabo en la f_2 se muestran en detalle en la Figura 9.

Cuadro 7. Fechas de inicio del consumo de agua de acuerdo la segunda función (f_2).

Unidad productiva	2012-2013	Días de diferencia de f_1	2013-2014	Días de diferencia de f_1
C5	08 agosto	20	21 agosto	0
Uetum1	04 noviembre	0	01 noviembre	3
Uetum2	16 noviembre	8	04 noviembre	26
Uetum3	06 noviembre	0	30 noviembre	0
Uch7	23 octubre	4	a ¹	a ¹

¹ Ausente producto de registros incompletos en la temporada 2013-2014.

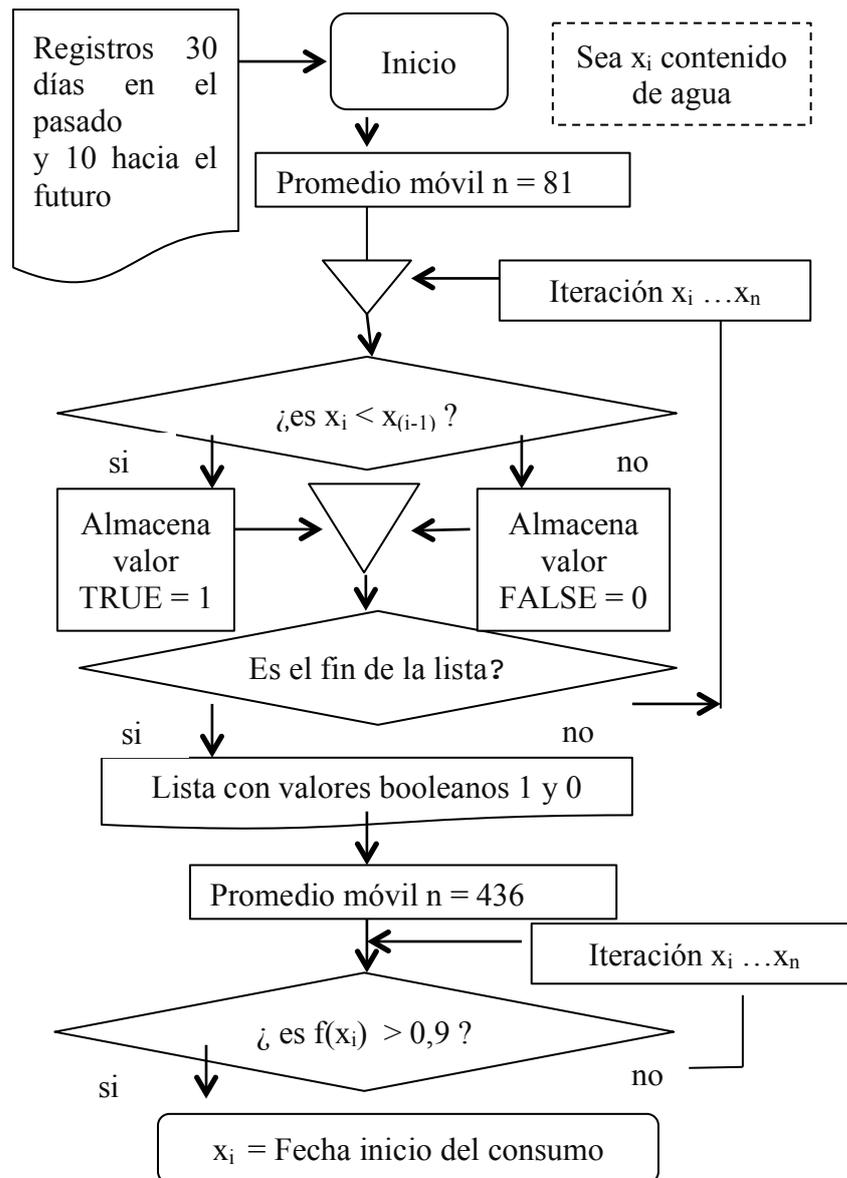


Figura 9. Diagrama de flujo de la segunda función (f_2).

Un aspecto relevante que se puede notar de la segunda función, es que en todos los casos se encontró una fecha de inicio del consumo de agua, terminando el análisis efectivamente, ya que dentro de las posibilidades, el algoritmo puede no encontrar fecha alguna por incumplimiento de la condición. En este aspecto la función es efectiva para encontrar la información del inicio del consumo de agua. Otro aspecto que se podría considerar dentro de este trabajo y que quedará como antecedente para futuros estudios, es que cuatro de las seis bases de dato tuvieron menos de diez días de diferencia a la fecha proporcionada por la f_1 .

Herramienta automatizada de cálculo de riego en primavera. La herramienta consiste en un sistema inteligente que interpreta, calcula y propone estrategias de riego en base a los datos de la sonda y ETo.

La herramienta tiene tres tareas básicas: (i) calcular la condición de inicio del consumo de agua en tiempo real, alertando al usuario que el evento ha ocurrido, (ii) recomendar cuando deben realizarse los futuros riegos y (iii) si el evento no ha sido detectado, recomendar riegos de protección. La herramienta programable opera para alertar en tiempo real a los usuarios y generar una propuesta de riego en base a las condiciones de humedad en el suelo y la evapotranspiración de referencia (ETo). Dada estas consideraciones, el sistema de recomendación utiliza los mismos algoritmos que se desarrollaron con anterioridad, pero con ciertas modificaciones al código para ser utilizados en tiempo real (Apéndice V).

Un antecedente importante de la utilización de la sonda como herramienta de gestión del riego, es que la estabilidad del contenido de agua en el suelo puede observarse en dos situaciones de acuerdo a los registros de la sonda (Callejas et al., 2014b; Houssein et al., 2008). El primer caso se da cuando el suelo es regado abundantemente y luego de 24 horas, el nivel de agua se encuentra cercano a capacidad de campo, momento donde se estabiliza la curva de humedad. El otro caso, corresponde al momento cuando el contenido de humedad en el suelo es lo suficientemente bajo para generar dificultades para la planta de extraer agua del suelo, producto de que el potencial hídrico para extraer el agua es limitante para la planta (Balbontín, 2015). En la práctica, llevar el contenido de agua hasta un nivel de humedad al mínimo, es comúnmente utilizado dentro de los manejos de la sonda para calcular el punto de recarga del suelo o umbral mínimo admisible (Callejas et al., 2014b; Castilla y Montalvo 2005 ; Sentek, 2013) ya que de esa manera se conocen los umbrales del tipo de suelo y cultivo, caracterizando los límites de humedad para cada condición.

Se utilizó la segunda función (f_2) para detectar el contenido mínimo admisible de humedad (MDHA). Se seleccionó arbitrariamente la unidad productiva ‘Uetum3’ revisándose mediante el software IrriMax® el momento donde ocurre el MDHA . Acto seguido, se implementó la segunda función en éste contexto.

Los resultados indican que la función (f_2) puede ser utilizada para explicar una condición de estabilidad o tendencia cero, generada por un aumento en la resistencia del suelo para secarse. El siguiente procedimiento del análisis consistió en la integración de ambas

funciones (f_1 y f_2) para ser utilizados en una condición de tiempo real. El desarrollo de la integración de ambas funciones consistió en una modificación al código de las funciones f_1 y f_2 , que se constituye en tres etapas:

(i) primero pregunta diariamente si la tasa de consumo diaria es superior a el 10% de la ETo. Si el resultado es TRUE, entra en modo alerta y espera. (ii) luego, si se encuentra en modo alerta, la función 2 (f_2) comienza a recorrer la información registrada 30 días hacia el pasado buscando la condición de estabilidad o mínimo de humedad admisible (MDHA). (iii) si la etapa (ii) es verdadera, se inicia la segunda tarea de f_2 que corresponde a buscar el cambio de tendencia. Adicionalmente el programa posee un sistema que indica los días que restan para regar, basado en tiempo que demora llegar a MDHA, de acuerdo al consumo promedio de 3 días en el momento actual. El flujo de trabajo puede visualizarse en las figuras 10 y 11.

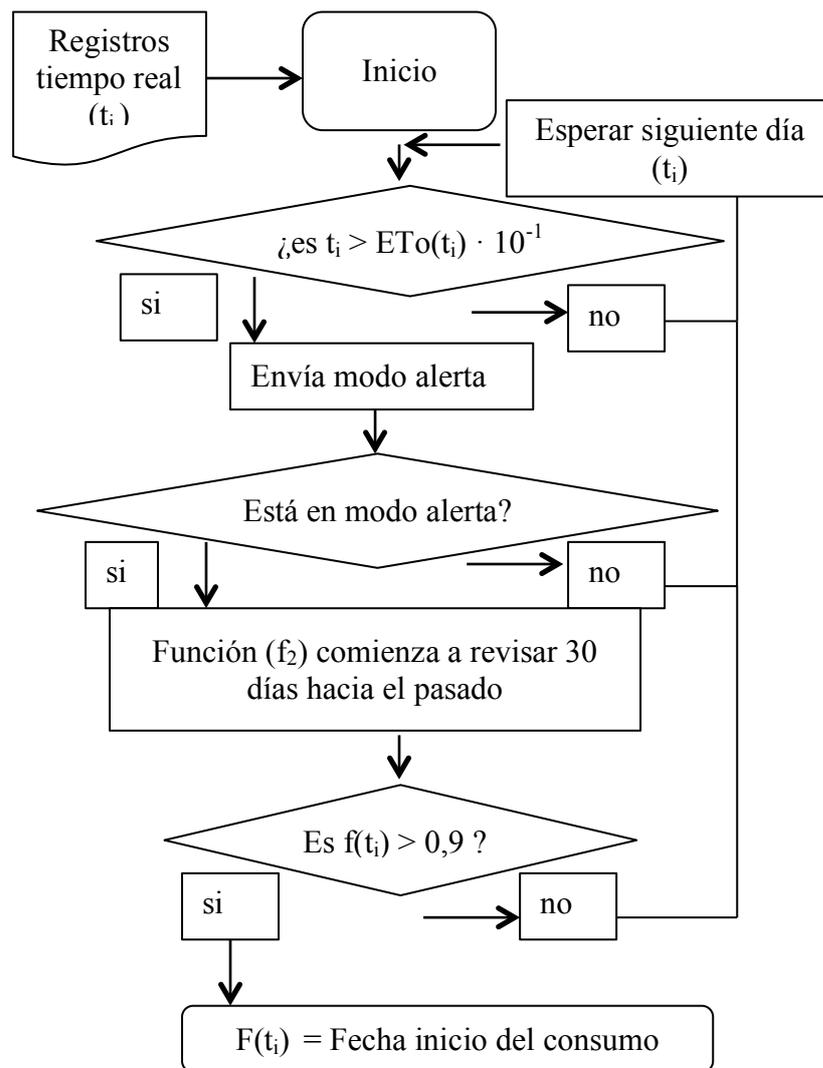


Figura 10. Diagrama de flujo de herramienta de predicción de riego en primavera (continúa en Figura 11).

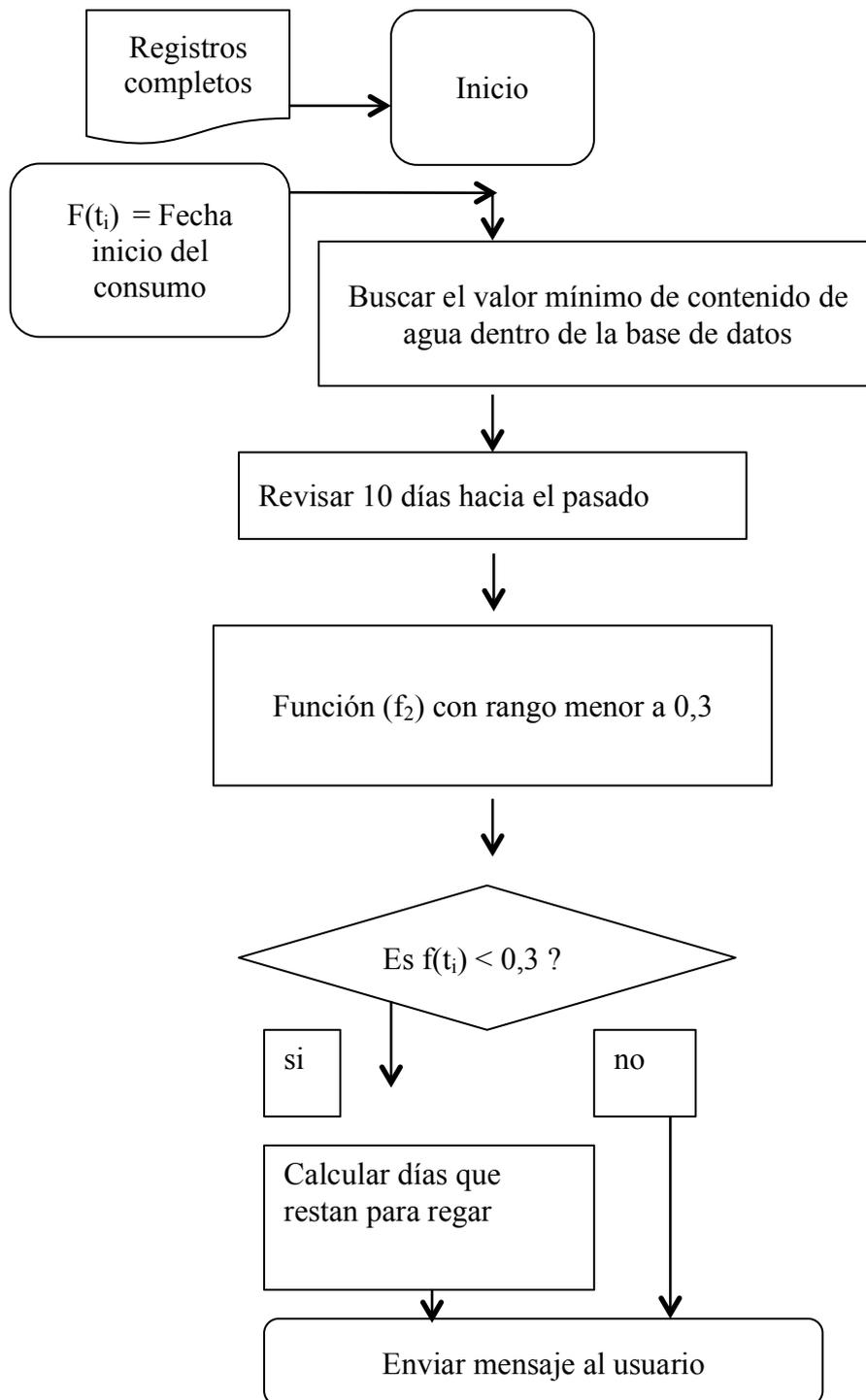


Figura 11. Diagrama de flujo (continuación de Figura 10) para calcular los días restantes para el mínimo de humedad admisible (MDHA).

En un futuro próximo, la herramienta desarrollada podría proporcionar un ‘plug in’ tecnológico que se adjunte al análisis gráfico que habitualmente realizan los agricultores para gestionar el riego con las sondas FDR. Para ello es un requerimiento que la herramienta sea validada en un análisis de concordancia estadística (Dobson, 2002) entre lo observado por un técnico especializado sobre la gestión del riego en sondas FRD y la herramienta especializada para la gestión del riego en primavera.

Modelo predictivo del evento de inicio del consumo de agua en la temporada

Basado en los resultados anteriores, se continuó con la caracterización de las unidades productivas, relacionando las variables de evapotranspiración de referencia acumulada (ETo Ac.), días grado (Dg Ac.) y estados fenológicos (EF) (Cuadro 8) con el punto de inicio del consumo de agua. El modelo estadístico se programó en lenguaje de programación R (Apéndice IV).

La caracterización de la base de dato genera una tabla de variables acumuladas (Evapotranspiración de referencia acumulada y días grado) (Cuadro 8) para una determinada fecha de inicio del consumo de agua (Cuadro 7). Mediante los estadísticos, se discutió acerca de la heterogeneidad de las variables.

Cuadro 8. Resultados del segundo algoritmo, fechas resultantes de la búsqueda basada en la segunda función (f_2).

Unidad productiva	Año	Fecha inicio consumo de agua	Biofix (brote de 15 cm)	Días después del Biofix	ETo Ac.	DGAc.	E. Fenológico
C5 ¹	2012	08-08-12	18-08-12	-10	-	-	Brote 15 cm
C5	2013	21-08-13	12-08-13	9	37,6	77,8	Brote 30 cm
Uetum1	2012	04-11-12	24-10-12	11	60,91	92,45	Brote 90 cm
Uetum1	2013	01-11-13	22-10-13	10	47,0	56,55	Brote 90 cm
Uetum2	2012	16-11-12	24-10-12	23	115,18	191,5	Brote 100 cm
Uetum2	2013	04-11-13	22-10-13	13	33,6	85,5	Brote 90 cm
Uetum3	2012	06-11-12	24-11-12	13	73,1	115,75	Brote 100 cm
Uetum3	2013	30-10-13	22-10-13	8	28,4	46,6	Brote 30 cm
Uch7 ²	2012	23-10-12	02-08-12	82	222,4	494,6	Brote 30 cm

¹ eliminado porque evento ocurre previo al biofix

² ‘outlier’ : eliminado por variación demasiado alta respecto a la media de los otros valores > 3· desviación estándar (Infostat, 2016).

Cuadro 9. Heterogeneidad de las variables del estudio en función de la fecha de inicio del consumo de agua.

Estadísticos	Variables	
	EToAc	DG
Media	51,35	86,79
Desviación estándar	± 31,69	± 50,53
Coefficiente de variación	0,617	0,582

El coeficiente de variación (Cv) para las variables ETo Ac fue de un 61,17% respecto a la media, levemente más heterogénea que la variable días grado acumulada, con un 58,20 % de variación respecto a la media (Cuadro 9). La información que entrega este estadístico es relevante a la hora de determinar cuáles serían las variables más importantes para predecir el inicio del consumo de agua en términos de éxito o fracaso. Las variables con menor Cv suelen ser más homogéneas y menor variabilidad respecto a su media que las que tienen alto Cv, quedando descartadas variables que no pueden predecir el comportamiento futuro de alguna variable predictora (Infostat, 2016).

El rango de los estados de desarrollo que se registraron para el punto de inicio del consumo de agua se encuentran entre 12 (brote de 30 cm) a 19 (brote de 100 cm) en la escala fenológica de Eichhorn y Lorenz (1977), equivalente seis hojas extendidas e inicio de floración respectivamente. La información anterior nos dice que el evento de inicio del consumo de agua se inicia entre brotes de 30 a 100 cm, a excepción de la base de dato 'C5' la cual ocurrió previo al 'biofix', donde se desconoce si esta detección corresponde a un error de análisis algorítmico o un comportamiento singular de la unidad productiva.

Un aspecto interesante sobre esta materia, es que no existe información descrita de un estado de desarrollo donde la vid comienza su actividad transpiratoria. Comúnmente se sabe que el factor que media la tasa de extracción agua en el suelo es dependiente de la evapotranspiración de referencia (Allen et al., 2006) y que ésta condición es limitada por el estado de desarrollo del cultivo y la inmadurez de sus órganos (Netzer et al., 2009).

Es importante señalar que el evento de inicio de consumo de agua (ICAT) posterior un estado de floración es bastante improbable, ya que el porcentaje de cobertura sobrepasa el 50%. Diversos autores han determinado que con ese nivel de cobertura, un cultivo de vid de mesa debe ser suministrado con riegos basados en un coeficiente de cultivo cercano a 0,5 (Sellés et al 2012; Williams y Ayars, 2005). Ésta información podría contraponerse a Peacock (1999), quien afirma que la vid puede tolerar la ausencia de riegos tradicionales desde brotación a floración sin ocasionar problemas fisiológicos. Estos resultados contrapuestos dejan en evidencia que es el reservorio de agua en el suelo lo que podría influir en gran parte sobre la toma de decisión en los criterios de riego al inicio de la temporada.

Los resultados del presente estudio concuerdan parcialmente con lo antes discutido, ya que la utilización de las sondas FDR indica que el suelo debería soportar una condición de riego mínimo de brotación a floración. Sin embargo se debe tener en cuenta que deberían realizarse riegos de bajo volumen para satisfacer la demanda evaporativa de los primeros 30 centímetros de suelo, con el objetivo de conservar la conductividad hidráulica justo antes de la floración (brote de 90 cm), práctica comúnmente utilizada para prevenir riegos largos y mantener una condición de humedad segura para el cultivo, ya que un estrés hídrico (ya sea por anegamiento o sequedad) en la etapa temprana de desarrollo, genera mermas en la productividad (Balbontín, 2015) o deshidratación de las raíces superficiales, sobre todo cuando no se tiene suficiente contenido superficial de materia orgánica.

Modelo predictivo

A partir de los estadísticos del Cuadro 9, se simularon 940 datos para mejorar la representatividad del modelo lineal generalizado de regresión logística (regresión poisson) (Infostat, 2016; Dobson, 2002).

Los modelos se representaron gráficamente (figuras 12 y 13) donde se visualiza la magnitud de la variable (eje horizontal) y la probabilidad de que el evento de inicio de consumo de agua ocurra (eje vertical) o ya haya ocurrido en el pasado.

En este caso, cada modelo representa una variable binaria (éxito o fracaso) las que son predecibles de acuerdo a variables continuas que corresponden a evapotranspiración acumulada y días grado. Ambos modelos permiten generar una representación probabilística de la ocurrencia del evento de inicio del consumo de agua (éxito o fracaso). Para ello debe desarrollarse la ecuación de enlace a una ecuación predictora de la probabilidad de éxitos (π), en función de la(s) variables evapotranspiración acumulada (ETo Ac) y días grado (DG) (Dobson, 2002). Al ser desarrollada, se puede expresar como aparece a continuación:

$$\log \pi = b_0 + b_1x_1 \dots + b_nx_n \quad [2]$$

Desarrollada la ecuación y despejada la probabilidad, se obtiene la ecuación siguiente

$$\pi = e^{b_0 + b_1x} \quad [3]$$

Entonces para cada modelo, se expresa de la siguiente manera:

$$\pi(Dg) = e^{4,32433 - 0,049159 \cdot Dg} \quad [4]$$

$$\pi(ETo Ac) = e^{4,487442 - 0,068001 \cdot ETo} \quad [5]$$

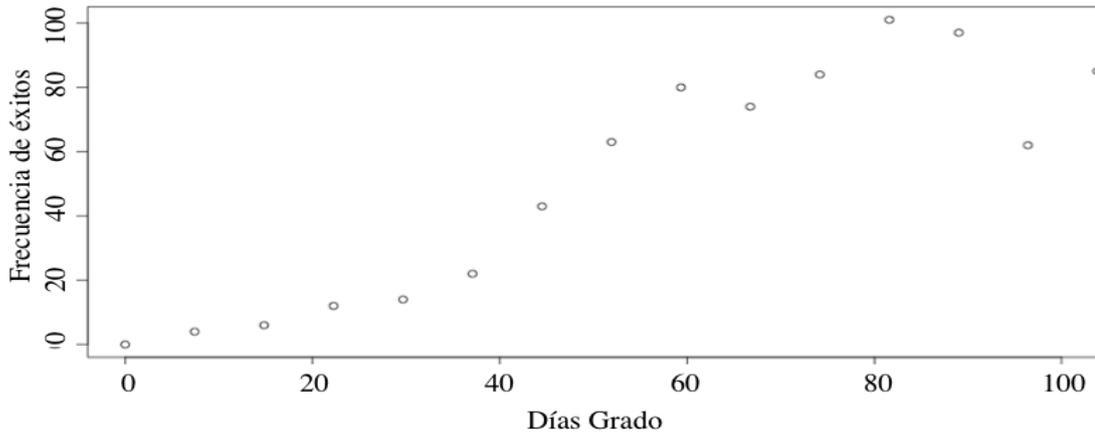


Figura 12. Gráfico de frecuencia de eventos exitosos (100/100) en función de la variable DG.

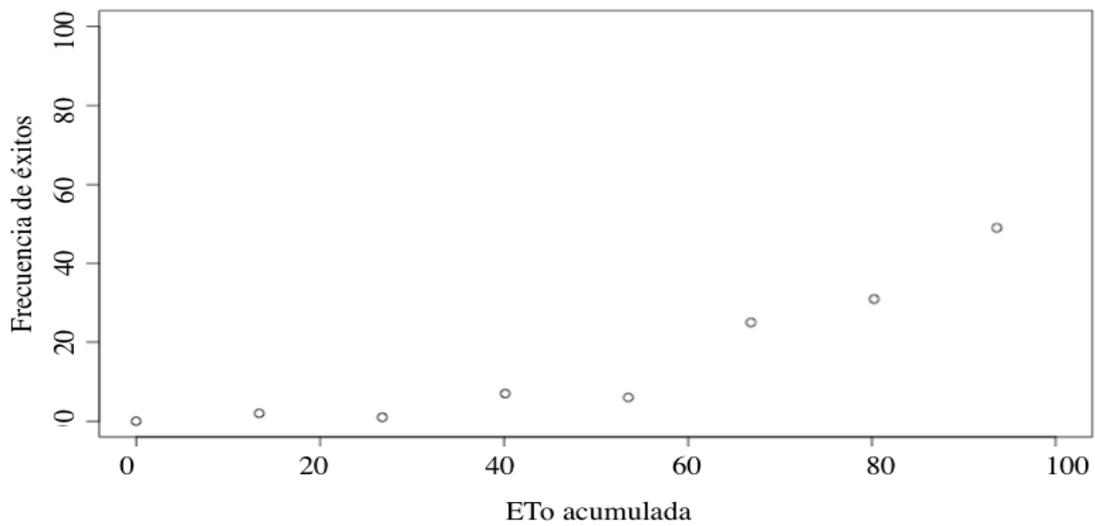


Figura 13. Gráfico de frecuencia de eventos exitosos (100/100) en función de la variable ETo acumulada.

En base a la simulación, se obtienen las ecuaciones finales [4] y [5] del modelo que permiten predecir la probabilidad de éxito en términos porcentuales en función de las variables días grado (DG) ec. [4] o evapotranspiración acumulada (ETo Ac) ec. [5] (Cuadro 10).

Cuadro 10 . Resultados del modelo logístico.

Variable	Modelo	p-valor	Significancia ¹
Días Grado	$\pi(Dg) = e^{4,32433 - 0,049159 \cdot Dg}$	$2,2 \cdot 10^{-16}$	*
ETo Ac.	$\pi(ETo Ac) = e^{4,487442 - 0,068001 \cdot ETo}$	$2,2 \cdot 10^{-16}$	*

¹ asterisco significa p-valor significativo menor a 0,05

Los resultados del análisis estadístico de la modelación indican un modelo significativo para las variables de interés ETo Ac y DG.

Se debe mencionar que los datos modelados corresponden a un set de datos simulado y para validar el modelo se requiere realizar el análisis sobre un set de datos independiente al del trabajado (Dobson, 2002).

Si bien los modelos predictivos fueron significativos, afirmar que el inicio del consumo de agua es predictivo de acuerdo a las variables de Evapotranspiración acumulada y días grado, no es posible. La razón en gran medida se debe a la dificultad que resulta probar una base de datos climática que represente fielmente a la realidad, ya que muchas veces se puede encontrar que los datos no son congruentes o tienen valores extremos que imposibilitan su interpretación, por lo tanto siempre existirá la incertidumbre sobre el estado de los equipos y la calidad de la información proveniente. Finalmente, también es necesario considerar que las mediciones realizadas a nivel del suelo no son una representación exacta de la fisiología a nivel de la planta, y la interpretación que acá se realiza no permite ser categórico sobre el ICAT. Otro aspecto que se considera importante evaluar es el nivel de cobertura del cultivo, parámetro que se utiliza ampliamente para explicar el consumo de agua.

A pesar que los objetivos de este estudio no involucran una validación del modelo predictivo, se propone que su validación se base en un modelo de 'Machine learning' creando un flujo que alimente los datos de entrenamiento iterativamente para mejorar la calidad de los mismos (Braun y Murdoch, 2007); una propuesta de modelos estadísticos que pueden utilizarse para validar modelos lineales generalizados es el análisis de 'K nearest neighbours (Knn)', que consiste generar n número de grupos de clasificación de la variables de clasificación a predecir y evaluar mediante estadígrafos su concordancia (Venables y Ripley, 2002).

Para su validación futura se propone un mínimo de 10 bases de datos o unidades productivas para realizar un análisis aceptable (Venables y Ripley, 2002), siguiendo la metodología descrita para la validación de modelos lineales generalizados (Dobson, 2002).

CONCLUSIONES

De acuerdo a las condiciones en que se realizó el estudio se concluye lo siguiente:

El indicador de inicio del consumo de agua en ‘Thompson Seedless’ se basa en la utilización de la evapotranspiración de referencia y el análisis de serie temporal del contenido de agua en el suelo en función del tiempo. Su desarrollo resultó en un desarrollo y descripción de dos funciones algorítmicas en Microsoft Excel y lenguaje de programación R, que dan como resultado una fecha exacta de inicio del consumo de agua al analizar una base de datos.

El modelo predictivo del inicio del consumo de agua resultó ser significativo para las variables evapotranspiración de referencia acumulada y días grado. A su vez, el registro descriptivo de fenología que se realizó, indicó que éste evento ocurre entre brote de 30 a 100 cm.

LITERATURA CITADA

- 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.G.; L.S. Pereira.; D. Raes and M. Smith. 2006. Crop Evapotranspiration-Guidelines for Computing Crop Water Requirements [Evapotranspiración de los cultivos-Guía para calcular los requerimientos de agua para cultivos]. Documento 56 de la FAO Irrigación y Drenaje. Roma. 298p.
- Balbontín, C. N. 2015. Riego en uva de mesa: Administración de recursos hídricos escasos. Instituto de investigaciones agropecuarias (INIA). Ficha técnica N° 11. Santiago de Chile. 9p
- Braun, J. W. and D. J. Murdoch. 2007. A First Course in Statistical Programming With R. Cambridge University Press. 175p. ISBN-13 978-0-511-50614-7
- Callejas, R.; J. Navarrete y M. Rioseco. 2013. Líneas de gestión para el riego. Facultad de Ciencias agronómicas. Universidad de Chile. 17p.
- Callejas, R.; J. Vera; M. Rioseco; F. Prohens; H. Osorio; P. Pino; J. Navarrete y R. Gálvez. sep. 2014 a. Generación e integración de tecnologías destinadas al ahorro de agua de riego en dos regiones productoras de fruta en Chile. *Aqua-LAC*. (2):6, 71-83pp.
- Callejas, R.; J. Vera; C. Kremer; J.I. Covarrubias; C. Benavides y M. Rioseco. 2014 b. Riego de precisión en frutales con sensores de suelo. Santiago, Universidad de Chile. Facultad de Ciencias Agronómicas. Serie Ciencias Agronómicas N° 23. 112p. ISBN - 978-956-19-0893-2
- Castilla N. y T. Montalvo. 2005. Programación del riego. en: Fertirrigación, cultivos hortícolas, frutales y ornamentales. Cadahía C. (Ed). 3a edición, Ediciones Mundi-Prensa. Madrid. 277-298p
- Coombe, G. 1995. Adoption of a system for identifying grapevine growstages. *Australian Journal of Grape and Wine Research* (1): 100-110.
- Dobson, J. A. 2002. An introduction to Generalized Linear Models. Chapman & Hall/CRC. (Ed). 2nd edition. Text in statistical sciences. London. 221p
- Edwards R. D. and J. E. Magee. 1996. Technical analysis and stock trends (vol. 3, cap. 36 pp 91- 99). Springfield. Mass. 171p
- Eichhorn, K.W. und Lorenz, H. 1977. Phaenologische Entwicklungstadien der Rebe.

Nachrichtenblatt des Deutschen Pflanzen-schutzdienstes (Braunschweig) (29) 119-120.

Enciso, J. 2007. Uso de sensores de humedad del suelo para eficientizar el riego. Texas A&M University, Servicios de extensión. , p12. B-6194. Disponible en: http://repository.tamu.edu/bitstream/handle/1969.1/87470/pdf_2437.pdf

Fereres, E and V. González. 2009. Improving Productivity to Face Water Scarcity in Irrigated Agriculture. Crop Physiology. Capítulo 6. p. 122-143

Ferreira, R.; G. Sellés; H. Silva; R. Ahumada; I. Muñoz, y V. Muñoz. 2006. Efecto del agua aplicada en las relaciones hídricas y productividad de la vid 'Crimson Seedless'. Brasília. *Investigación Agrícola Brasileira*, (41):7, 1109-1118.

Flaherty, D.; W. Barnett; L. Bettiga, P. Mites; T. Wilson and S. Welter. 1992. Grape pest management. 2^a ed. University of California. División of agricultura and natural resources. Calendars of Viticulture Management. Sección 1. p. 18-19

Houssein, O.; H. Mendoza; I. Abrisqueta; L. Tapia; J. Abrisqueta; J. Muñoz and M. Ruiz. 2008. Jun. Soil water content measure by FDR probes and thresholds for drip irrigation management in peach trees. Instituto nacional de investigaciones forestales. Mexico. *Agricultura Técnica Mexico*, (34)3: 313-322.

Infostat. 2016. Infostat versión 2016. Grupo Infostat, FCA, Universidad Nacional de Córdoba, Argentina. 334p

López-Urrea R.; A. Montoro; F. Mañas; P. López-Fuster and E. Fereres. 2012. Jun. Evapotranspiration and crop coefficients from lysimeter measurements of mature 'Tempranillo' wine grapes. *Agricultural Water Management*, 112: 13-20.

Netzer, Y.; A. Schwartz; B. Bravdo; C. Shenker and M. Yao. 2009. Water use and the development of seasonal crop coefficients for Superior Seedless grapevines trained to an open-gable trellis system grown in a semiarid region. *Irrigation Sciences*, 27: 109-120.

Oficina de Estudios y Políticas Agrarias (ODEPA). Jul. 2015. Catastro frutícola. Principales resultados. Región del Libertador B.O'Higgins. Gobierno de Chile. 56p

Peacock, W.L.; L.E. Williams and L.P Christiansen. 1999. Water management and irrigation management and irrigation scheduling. En: Raisins production manual. L.P Christiansen (cap 16). University of California. 156-161

R Core Team. 2016. R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. Disponible en: <https://www.R-project.org/>.

Rodda J., y I. Shiklomanov. 2003. World water resources at the beginning of the 21st century. Cambridge: Cambridge University Press. 25p

Sellés, G.; Ferreyra, R.; Aspillaga, C. y C. Zúñiga. 2012. Requerimientos de riego en uva de mesa: Experiencias en el Valle de Aconcagua. Instituto de Investigaciones Agropecuarias(INIA). Boletín INIA N° 242. Santiago de Chile.

Sentek. 2013. Instalation manual for EnviroScan. Disponible en: <http://www.sentek.com.au/downloads/downloads.asp>

Taiz, L. and Zeiger, E. 2010. Stress physiology (cap. 25, pp. 591-623). En: Plant Physiology. United States of America: Sinauer Associates. 782p.

Venables, W. and B. Ripley. 2002. Modern Applied Statistics with S. 4 ed. Springer. 481p. ISBN 0-387-95457-0

Wayne, W. D. 1991. Biostatistics: a foundation for analysis in the health sciences. Mexico DF. Mexico. 3 ed. Limusa. 655p. ISBN 968-18-0178-4

Williams, L. and L. Ayars. 2005. Grapevine water use and the crop coefficient are linear function of the shaded area measured beneath the canopy. University of California. *Viticulture & Enology. Agricultural and Forestry Meteorology*, (132): 201-211.

APÉNDICE I

A1. Registros térmicos para la comuna de San Vicente de Tagua Tagua.

FECHA	T media	FECHA	T media	FECHA	T media
07-11-12	17,4	18-12-12	18	27-01-13	21,2
08-11-12	14,35	19-12-12	13,85	28-01-13	19,65
09-11-12	15,3	20-12-12	14,55	29-01-13	22,2
10-11-12	16,1	21-12-12	18	30-01-13	21,7
11-11-12	19,45	22-12-12	19,85	31-01-13	20,05
12-11-12	19,85	23-12-12	19,65	01-02-13	20,05
13-11-12	19,9	24-12-12	19,05	02-02-13	24
14-11-12	18,3	25-12-12	16,3	03-02-13	24,95
15-11-12	19,95	26-12-12	18	04-02-13	22,5
16-11-12	15,15	27-12-12	19,7	05-02-13	20,1
17-11-12	19,1	28-12-12	21	06-02-13	22,55
18-11-12	20,15	29-12-12	21,25	07-02-13	24,6
19-11-12	21,65	30-12-12	21,75	08-02-13	23,55
20-11-12	19,7	31-12-12	22,05	09-02-13	22,25
21-11-12	18,8	01-01-13	23,2	10-02-13	22,25
22-11-12	16,65	02-01-13	20,85	11-02-13	22,5
23-11-12	16,35	03-01-13	18,8	12-02-13	22,65
24-11-12	18	04-01-13	20,3	13-02-13	22,15
25-11-12	20,05	05-01-13	21,45	14-02-13	22,65
26-11-12	21,2	06-01-13	22,4	15-02-13	24,25
27-11-12	21,1	07-01-13	21,8	16-02-13	21,25
28-11-12	17,95	08-01-13	21,8	17-02-13	20,1
29-11-12	17,45	09-01-13	25,9	18-02-13	19,4
30-11-12	16,15	10-01-13	22,6	19-02-13	18,15
01-12-12	19,65	11-01-13	23,35	20-02-13	19,55
02-12-12	20,4	12-01-13	19,85	21-02-13	22,1
03-12-12	18,95	13-01-13	20,95	22-02-13	21,8
04-12-12	20,35	14-01-13	20,15	23-02-13	20,4
05-12-12	17,9	15-01-13	21,55	24-02-13	21
06-12-12	14,6	16-01-13	22,35	25-02-13	23,75
07-12-12	17,1	17-01-13	20	26-02-13	19,2
08-12-12	21,95	18-01-13	21,1	27-02-13	19,65
09-12-12	22,15	19-01-13	19,95	28-02-13	19,2
10-12-12	19,8	20-01-13	20,85	01-03-13	16,25
11-12-12	21	21-01-13	20,8	02-03-13	20,1
12-12-12	19,25	22-01-13	23,6	03-03-13	18,95
13-12-12	22,5	23-01-13	23,1	04-03-13	21,25
14-12-12	19,6	24-01-13	19,95	05-03-13	18,1
15-12-12	18,8	25-01-13	22,35	06-03-13	18,05
16-12-12	21,15	26-01-13	21,85	07-03-13	19,3
17-12-12	21,3				

FECHA	T media	FECHA	T media	FECHA	T media
07-11-12	17,4	18-12-12	18	27-01-13	21,2
08-11-12	14,35	19-12-12	13,85	28-01-13	19,65
09-11-12	15,3	20-12-12	14,55	29-01-13	22,2
10-11-12	16,1	21-12-12	18	30-01-13	21,7
11-11-12	19,45	22-12-12	19,85	31-01-13	20,05
12-11-12	19,85	23-12-12	19,65	01-02-13	20,05
13-11-12	19,9	24-12-12	19,05	02-02-13	24
14-11-12	18,3	25-12-12	16,3	03-02-13	24,95
15-11-12	19,95	26-12-12	18	04-02-13	22,5
16-11-12	15,15	27-12-12	19,7	05-02-13	20,1
17-11-12	19,1	28-12-12	21	06-02-13	22,55
18-11-12	20,15	29-12-12	21,25	07-02-13	24,6
19-11-12	21,65	30-12-12	21,75	08-02-13	23,55
20-11-12	19,7	31-12-12	22,05	09-02-13	22,25
21-11-12	18,8	01-01-13	23,2	10-02-13	22,25
22-11-12	16,65	02-01-13	20,85	11-02-13	22,5
23-11-12	16,35	03-01-13	18,8	12-02-13	22,65
24-11-12	18	04-01-13	20,3	13-02-13	22,15
25-11-12	20,05	05-01-13	21,45	14-02-13	22,65
26-11-12	21,2	06-01-13	22,4	15-02-13	24,25
27-11-12	21,1	07-01-13	21,8	16-02-13	21,25
28-11-12	17,95	08-01-13	21,8	17-02-13	20,1
29-11-12	17,45	09-01-13	25,9	18-02-13	19,4
30-11-12	16,15	10-01-13	22,6	19-02-13	18,15
01-12-12	19,65	11-01-13	23,35	20-02-13	19,55
02-12-12	20,4	12-01-13	19,85	21-02-13	22,1
03-12-12	18,95	13-01-13	20,95	22-02-13	21,8
04-12-12	20,35	14-01-13	20,15	23-02-13	20,4
05-12-12	17,9	15-01-13	21,55	24-02-13	21
06-12-12	14,6	16-01-13	22,35	25-02-13	23,75
07-12-12	17,1	17-01-13	20	26-02-13	19,2
08-12-12	21,95	18-01-13	21,1	27-02-13	19,65
09-12-12	22,15	19-01-13	19,95	28-02-13	19,2
10-12-12	19,8	20-01-13	20,85	01-03-13	16,25
11-12-12	21	21-01-13	20,8	02-03-13	20,1
12-12-12	19,25	22-01-13	23,6	03-03-13	18,95
13-12-12	22,5	23-01-13	23,1	04-03-13	21,25
14-12-12	19,6	24-01-13	19,95	05-03-13	18,1
15-12-12	18,8	25-01-13	22,35	06-03-13	18,05
16-12-12	21,15	26-01-13	21,85	07-03-13	19,3
17-12-12	21,3				

A2 . Registros térmicos para la comuna de Atacama.

Fecha	T media	Fecha	T media	Fecha	T media
01-01-12	21,0990083	09-02-12	20,9556277	20-03-12	19,38816201
02-01-12	21,11396577	10-02-12	20,9324266	21-03-12	19,33539967
03-01-12	21,12792889	11-02-12	20,90828495	22-03-12	19,28217002
04-01-12	21,14089353	12-02-12	20,88320989	23-03-12	19,22848881
05-01-12	21,15285585	13-02-12	20,85720887	24-03-12	19,17437197
06-01-12	21,16381229	14-02-12	20,83028959	25-03-12	19,11983552
07-01-12	21,17375962	15-02-12	20,80246002	26-03-12	19,06489564
08-01-12	21,18269488	16-02-12	20,77372841	27-03-12	19,00956858
09-01-12	21,19061543	17-02-12	20,74410327	28-03-12	18,95387077
10-01-12	21,19751892	18-02-12	20,71359338	29-03-12	18,89781868
11-01-12	21,20340331	19-02-12	20,68220779	30-03-12	18,84142895
12-01-12	21,20826685	20-02-12	20,64995579	31-03-12	18,78471826
13-01-12	21,21210809	21-02-12	20,61684693	01-04-12	18,72770344
14-01-12	21,21492591	22-02-12	20,58289104	02-04-12	18,67040138
15-01-12	21,21671947	23-02-12	20,54809818	03-04-12	18,61282904
16-01-12	21,21748823	24-02-12	20,51247864	04-04-12	18,55500351
17-01-12	21,21723197	25-02-12	20,47604299	05-04-12	18,4969419
18-01-12	21,21595076	26-02-12	20,43880203	06-04-12	18,43866142
19-01-12	21,21364499	27-02-12	20,40076678	07-04-12	18,38017935
20-01-12	21,21031533	28-02-12	20,36194852	08-04-12	18,32151302
21-01-12	21,20596278	29-02-12	20,32235876	09-04-12	18,2626798
22-01-12	21,20058862	01-03-12	20,28200922	10-04-12	18,20369713
23-01-12	21,19419444	02-03-12	20,24091186	11-04-12	18,14458249
24-01-12	21,18678215	03-03-12	20,19907886	12-04-12	18,0853534
25-01-12	21,17835393	04-03-12	20,15652262	13-04-12	18,0260274
26-01-12	21,16891228	05-03-12	20,11325573	14-04-12	17,96662208
27-01-12	21,15846001	06-03-12	20,06929104	15-04-12	17,90715504
28-01-12	21,14700021	07-03-12	20,02464156	16-04-12	17,8476439
29-01-12		08-03-12	19,97932052	17-04-12	17,7881063
30-01-12	21,13453627	09-03-12	19,93334135	18-04-12	17,72855987
31-01-12	21,12107189	10-03-12	19,88671768	19-04-12	17,66902227
01-02-12	21,10661105	11-03-12	19,83946333	20-04-12	17,60951113
02-02-12	21,09115805	12-03-12	19,79159229	21-04-12	17,55004409
03-02-12	21,07471747	13-03-12	19,74311876	22-04-12	17,49063877
04-02-12	21,05729416	14-03-12	19,69405709	23-04-12	17,43131277
05-02-12	21,0388933	15-03-12	19,64442182	24-04-12	17,37208368
06-02-12	21,01952034	16-03-12	19,59422766	25-04-12	17,31296904
07-02-12	20,99918103	17-03-12	19,54348949	26-04-12	17,25398637
08-02-12	20,97788137	18-03-12	19,49222234	27-04-12	17,19515315
		19-03-12	19,4404414	28-04-12	17,13648682

Fecha	T media	Fecha	T media	Fecha	T media
29-04-12	17,07800475	08-06-12	15,07786415	18-07-12	14,29917794
30-04-12	17,01972427	09-06-12	15,04062318	19-07-12	14,2999467
01-05-12	16,96166266	10-06-12	15,00418753	20-07-12	14,30174026
02-05-12	16,90383713	11-06-12	14,968568	21-07-12	14,30455808
03-05-12	16,84626479	12-06-12	14,93377513	22-07-12	14,30839933
04-05-12	16,78896273	13-06-12	14,89981924	23-07-12	14,31326287
05-05-12	16,73194791	14-06-12	14,86671039	24-07-12	14,31914725
06-05-12	16,67523722	15-06-12	14,83445838	25-07-12	14,32605074
07-05-12	16,61884749	16-06-12	14,80307279	26-07-12	14,33397129
08-05-12	16,5627954	17-06-12	14,7725629	27-07-12	14,34290656
09-05-12	16,50709759	18-06-12	14,74293777	28-07-12	14,35285388
10-05-12	16,45177053	19-06-12	14,71420615	29-07-12	14,36381033
11-05-12	16,39683065	20-06-12	14,68637658	30-07-12	14,37577264
12-05-12	16,3422942	21-06-12	14,6594573	31-07-12	14,38873728
13-05-12	16,28817736	22-06-12	14,63345628	01-08-12	14,40270041
14-05-12	16,23449615	23-06-12	14,60838123	02-08-12	14,41765788
15-05-12	16,1812665	24-06-12	14,58423957	03-08-12	14,43360526
16-05-12	16,12850416	25-06-12	14,56103847	04-08-12	14,45053784
17-05-12	16,07622477	26-06-12	14,5387848	05-08-12	14,46845058
18-05-12	16,02444383	27-06-12	14,51748515	06-08-12	14,48733819
19-05-12	15,97317668	28-06-12	14,49714583	07-08-12	14,50719506
20-05-12	15,92243851	29-06-12	14,47777287	08-08-12	14,52801532
21-05-12	15,87224435	30-06-12	14,45937201	09-08-12	14,54979279
22-05-12	15,82260908	01-07-12	14,44194871	10-08-12	14,57252102
23-05-12	15,77354741	02-07-12	14,42550812	11-08-12	14,59619327
24-05-12	15,72507388	03-07-12	14,41005512	12-08-12	14,62080254
25-05-12	15,67720284	04-07-12	14,39559429	13-08-12	14,64634152
26-05-12	15,62994849	05-07-12	14,3821299	14-08-12	14,67280265
27-05-12	15,58332482	06-07-12	14,36966596	15-08-12	14,70017809
28-05-12	15,53734565	07-07-12	14,35820616	16-08-12	14,72845973
29-05-12	15,49202461	08-07-12	14,34775389	17-08-12	14,75763919
30-05-12	15,44737513	09-07-12	14,33831224	18-08-12	14,78770781
31-05-12	15,40341044	10-07-12	14,32988402	19-08-12	14,8186567
01-06-12	15,36014355	11-07-12	14,32247173	20-08-12	14,85047668
02-06-12	15,31758731	12-07-12	14,31607755	21-08-12	14,88315831
03-06-12	15,27575431	13-07-12	14,31070339	22-08-12	14,91669193
04-06-12	15,23465695	14-07-12	14,30635084	23-08-12	14,95106758
05-06-12	15,19430741	15-07-12	14,30302118	24-08-12	14,98627509
06-06-12	15,15471765	16-07-12	14,30071541	25-08-12	15,02230401
07-06-12	15,11589939	17-07-12	14,2994342	26-08-12	15,05914369

APÉNDICE II

A3. Registro de los estados fenológicos

Unidad productiva	Estado de desarrollo							
	01	05	09	12	19	25	27	38
C5	30 jul	15 ago	20 ago	30 ago	10 sep	25 sep	20oct	10 dic
Uetum1	25 jul	05 ago	20 oct	30 oct	10 nov	25 nov	20 dic	15 feb
Uetum1	25 jul	05 ago	20 oct	30 oct	10 nov	25 nov	20 dic	15 feb
Uetum1	25 jul	05 ago	20 oct	30 oct	10 nov	25 nov	20 dic	15 feb
Uch7	21 jul	01 ago	15 ago	25 ago	10 sep	05 oct	25dic	15 ene

APÉNDICE III

A3. Desarrollo de la segunda función (f_2)

```

#open archive

base_de_dato <- read.csv( 'uch72013.csv' ) , sep= ';' , header= T, dec= (',' )

x <- base_de_dato$index

y <- base_de_dato$consumo_agua

#plot water v/s time

plot (x,y, type= 'l' )

promedio_movil <- filter (y , filter = rep (1/81 , 81) )

lines( promedio_movil, col = 'red' ) # moving average

y <- as.vector(y)

#create logical vector in memory

b <- vector(mode = 'logical', length = length(x) )

# iteration over dataset

for (i in 1:length(promedio_movil)){

  b[i] <- (promedio_movil[i] > promedio_movil[i + 1])

}

c <- as.numeric(b)

#create

cprom <- filter ( c, filter = rep(1/436, 436) )

```

```
#find the day in the which function
index <- which(cprom > 0.9)
sensibility <- 45 #how many TRUE items do you want to gather after the first item
indice <- index[sensibility]
lines (c(indice, indice), y = c(100, 25), type='l', col = 'red')
# plot numeric boolean
plot (x, cprom, type = 'l')
print(index[sensibility])
```

APÉNDICE IV

A4. Desarrollo del modelo predictivo de las variables

```
#-----DG-----
```

```
quarter=c(n1)
```

```
counts.HIV=c(28,30,32,35,38,40,44,47,55,62,70,79,94,114,146,191,276,403,694,939)
```

```
d.HIV=data.frame(quarter,counts.HIV)
```

```
glm.HIV <- glm(counts.HIV ~ quarter, family = poisson())
```

```
anova(glm.HIV)
```

```
anova(glm.HIV,test="Chisq")
```

```
plot(log(n1),log(counts.HIV), xlab = 'log(Dias grado)', ylab = 'log(frecuencias)')
```

```
plot(n1,counts.HIV, xlim = c(0,100) ,xlab = 'Dias grado', ylab = 'Frecuencia de exitos')
```

```
abline(h= max(frec_dg/2), v= max(frec_dg/2), col ='red' )
```

```
#-----ETO-----
```

```
quarter=c(n2)
```

```
counts.HIV=c(frec_eto)
```

```
d.HIV=data.frame(quarter,counts.HIV)
```

```
glm.HIV <- glm(counts.HIV ~ quarter, family = poisson())
```

```
anova(glm.HIV)
```

```
anova(glm.HIV,test="Chisq")
```

```
plot(log(n2),log(counts.HIV), xlab = 'log(ETo acumulada)', ylab = 'log(frecuencias)')
```

```
plot(n2,counts.HIV, xlim = c(0,100) ,xlab = 'ETo acumulada ', ylab = 'Frecuencia de exitos')
```

```
abline(h= max(frec_eto/2), v= max(frec_eto/2), col ='red' )
```

APÉNDICE V

A5. Herramienta para predecir los riegos en primavera

```

#open archive

base_de_dato <- read.csv( 'uch72013.csv' ) , sep= ';' , header= T, dec= (',' )

x <- base_de_dato$index

y <- base_de_dato$consumo_agua

z <- base_de_dato$ETo

# 10% ETo ratio

z <- z/10

lista_boolean <- which (z < y) # which iteration surpass the ETo ratio

#plot water v/s time

plot (x,y, type= 'l' )

promedio_movil <- filter (y , filter = rep (1/81 , 81) )

lines( promedio_movil, col = 'red' ) # moving average

y <- as.vector(y)

#create logical vector in memory

b <- vector(mode = 'logical', length = length(x) )

# iteration over dataset

for (i in 1:length(promedio_movil)){

  b[i] <- (promedio_movil[i] > promedio_movil[i + 1])

}

c <- as.numeric(b)

```

```
#create
cprom <- filter ( c, filter = rep(1/436, 436) )
#find the day in the which function
index <- which(cprom > 0.3)
sensibility <- 45 #how many TRUE items do you want to gather after the first item
indice <- index[sensibility]
lines (c(indice, indice), y = c(100, 25), type='l', col = 'red')
# plot numeric boolean
plot (x, cprom, type = 'l')
print(index[sensibility])
indice <- sum ( indice[c(1,2,3)] )
indice2 <- indice/3
# how many days must wait to irrigate
dias_para_regar <- y[indice [1] ] - indice2
```