



UNIVERSIDAD DE CHILE

FACULTAD DE CIENCIAS AGRONÓMICAS
ESCUELA DE POSTGRADO

**EFFECTO DE DISTINTOS CRITERIOS DE RIEGO SOBRE VARIABLES
FISIOLÓGICAS Y PARÁMETROS PRODUCTIVOS DE UVA DE MESA
(*Vitis vinifera* L.) VARIEDAD RED GLOBE**

TESIS PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO AGRÓNOMO Y AL GRADO DE MAGÍSTER EN
CIENCIAS AGROPECUARIAS MENCIÓN PRODUCCIÓN FRUTÍCOLA

JAIME GUSTAVO NAVARRETE YÁNEZ

DIRECTORES DE TESIS

RODRIGO CALLEJAS R.
OSCAR SEGUEL S.

PROFESORES CONSEJEROS

GABINO REGINATO M.
CRISTIAN KREMER F.

SANTIAGO DE CHILE
2012

UNIVERSIDAD DE CHILE
FACULTAD DE CIENCIAS AGRONÓMICAS
ESCUELA DE POSTGRADO

**EFFECTO DE DISTINTOS CRITERIOS DE RIEGO SOBRE VARIABLES
FISIOLÓGICAS Y PARÁMETROS PRODUCTIVOS DE UVA DE MESA
(*Vitis vinifera* L.) VARIEDAD RED GLOBE**

TESIS PRESENTADA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO AGRÓNOMO Y AL GRADO DE
MAGÍSTER EN CIENCIAS AGROPECUARIAS MENCIÓN PRODUCCIÓN FRUTÍCOLA

JAIME GUSTAVO NAVARRETE YÁNEZ

	Calificaciones* (Memoria de Título)	Calificaciones** (Tesis de Grado)
Directores de tesis		
Rodrigo Callejas Rodríguez Ingeniero Agrónomo, Dr.	<u>6,8</u>	<u>Aprobada</u>
Oscar Seguel Seguel Ingeniero Agrónomo, Dr.	<u>7,0</u>	<u>Aprobada</u>
Profesores Consejeros		
Gabino Reginato Meza Ingeniero Agrónomo, Mg. Sc.	<u>7,0</u>	<u>Aprobada</u>
Cristian Kremer Fariña Ingeniero Agrónomo, Ph. D.	<u>6,8</u>	<u>Aprobada</u>

*: Escala de 1 a 7; válido para alumnos de educación continua.

** : Aprobado o reprobado.

AGRADECIMIENTOS

Quiero agradecer a todas las personas que participaron de esta etapa de formación profesional, ya sea de manera directa en este trabajo, o formando parte en el día día de mi vida personal.

A mis amigos de la Arena, la señora Rosita, Don Germán, Don Edo y sus respectivas familias, quienes fueron mi familia durante el tiempo que estuve allá. Al profesor Rodrigo y su familia, especialmente a Don José Callejas y la Señora Paula, por sus consejos y los gratos momentos vividos.

A mis amigos de la universidad, Carlo, Riky, Dolito, Marcelo, Oscar, Pato, Oly, Betza, Franki, Grone, Panchito, Giova, Cururo, Mario, Mati, Alexis, Manu, Nachito, Marco, 15, Vane, Pavel, Skin, Karla y tantos otros que fueron parte de mi vida universitaria, con los que compartimos tantos buenos momentos, conversaciones, carretes, y por sobre todo, mucha risa, se les quiere a todos.

A Ismael, Miguel, Pibe, Mu y Naro, amigos de tantos años que siempre han estado conmigo, gracias por su amistad incondicional y apoyo, tanto en las buenas como en las malas....warryors por siempre y labor omnia vincit!

A los docentes que generaron mi pasión por el suelo y a quienes admiro mucho: Oscar Seguel y Osvaldo Salazar, gracias por enseñarme el rol vital del suelo en la agricultura.

A los profesores Rodrigo Callejas y Gabino Reginato, por enseñarme a ser un buen agrónomo y a hacer las cosas a nivel profesional.

A mis profesores guía y colaboradores por sus aportes a esta tesis.

Agradezco también a INNOVA-CORFO por financiar mi tesis por medio del proyecto 06FC01IAC-34 titulado "Centro Regional de Estudios Agronómicos".

A los miembros de UCHILECREA, Pola, Juan, Max, Rodrigo, Marcela, Pauli, Fernanda, Cecilia y Erika, gracias por sus aportes profesionales y personales.

A tres personas que me han apoyado muchísimo durante este período: Helen, mi hermanita y mi abuelo, gracias por todo su cariño y consejos.

A Dios, por guiarme en la vida y rodearme de tantas buenas personas. Estoy muy contento de haber podido estudiar en la mejor escuela de Agronomía de Chile, donde nacen los Agrónomos de verdad.

Finalmente, quiero agradecer y dedicar este trabajo a mis padres José y Etelvina, quienes con su amor y esfuerzo de toda una vida me entregaron la posibilidad de llegar hasta este momento y ser quién soy. Han sido tiempos complicados, pero incluso así, me siguen mostrando que con esfuerzo y fe, todo se puede lograr en la vida. Son mis mejores amigos y los amo mucho.

"caminante no hay camino, se hace camino al andar"

ÍNDICE

CAPÍTULO I: REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

Relación agua-productividad.....	1
Problemática de la escasez de agua	1
El agua en la planta	3
Efectos del estrés hídrico en la planta	3
Mejora del uso del agua basada en nuevas formas de control del riego	5
El agua en el suelo.....	6
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	8

CAPÍTULO II: EFECTO DE DISTINTOS CRITERIOS DE RIEGO SOBRE VARIABLES FISIOLÓGICAS Y PARÁMETROS PRODUCTIVOS DE UVA DE MESA (*Vitis vinifera* L.) 'RED GLOBE'

RESUMEN	15
ABSTRACT	16
INTRODUCCIÓN	17
HIPÓTESIS	19
OBJETIVO	19
MATERIALES Y MÉTODO	20
Materiales	20
Metodología	21
Análisis estadístico	25
RESULTADOS.....	26
DISCUSIÓN	32
CONCLUSIONES	35
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	36

Apéndice I: Evolución de conductancia estomática, potencial hídrico xilemático, temperatura foliar y déficit de presión de vapor a través del día y la relación entre ellos.....	40
--	----

CAPÍTULO III: DINÁMICA DEL AGUA Y DETERMINACIÓN DE LA CONDUCTIVIDAD HIDRÁULICA NO SATURADA EN UN SUELO FRANCO SOMETIDO A DIFERENTES FRECUENCIAS DE RIEGO

RESUMEN	41
ABSTRACT	42
INTRODUCCIÓN	43
HIPÓTESIS.....	44
OBJETIVO	44
MATERIALES Y MÉTODO	45
Materiales	45
Metodología.....	46
Análisis estadístico	49
RESULTADOS.....	50
DISCUSIÓN	62
CONCLUSIONES	66
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	67
Apéndice I: Curva de calibración para la sonda FDR Diviner 2000	70
Apéndice II: Descripción morfológica del suelo del estudio	71
Apéndice III: Consumo de la humedad aprovechable del suelo (H.A.) en los distintos tratamientos	72
Apéndice IV: Contenido de agua del suelo entre las hileras, en profundidad y a través del tiempo.....	73

CAPÍTULO I: REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

Relación agua-productividad

El agua constituye entre el 80 a 95% de la masa de los tejidos vegetales en crecimiento y, como solvente, forma el medio para el movimiento de moléculas dentro y entre las células, jugando un rol central en la estructura de proteínas, ácidos nucleicos, polisacáridos y otros constituyentes celulares. Además, forma el medio donde ocurren la mayoría de las reacciones bioquímicas de la célula y participa directamente en muchas reacciones químicas esenciales para la vida vegetal (Taiz y Zeiger, 2007). Los nutrientes minerales que se necesitan para el crecimiento y los productos orgánicos de la fotosíntesis son transportados a través de la planta mediante soluciones acuosas (Nobel, 2005). En plantas terrestres en activo crecimiento, existe una columna continua de agua que va desde el suelo, pasando a través de la planta, hasta los sitios de evaporación en las hojas (Nobel, 2005).

Las plantas absorben y pierden agua continuamente, la que se evapora desde la hoja a medida que el CO₂ requerido para la fotosíntesis es absorbido desde la atmósfera. En un día cálido, seco y asoleado, una hoja intercambia cerca del 100% de su agua en una hora (Taiz y Zeiger, 2007).

Si se aplica una cantidad insuficiente de agua durante el ciclo del cultivo, éste no logrará desarrollarse de manera completa, lo que resultará en un rendimiento bajo ó en una pérdida total de rendimiento (Yazar y Sezen, 2006). Sin embargo, si se aplica más agua que la requerida por la evapotranspiración del cultivo, no se incrementa el rendimiento y el agua aplicada al suelo se pierde por evaporación y/o percolación profunda. Incluso, si se aplica mucho más agua, el rendimiento podría decaer como resultado del anegamiento o la lixiviación de nutrientes desde la zona de raíces (Cabello *et al.*, 2009; Sun *et al.*, 2006).

En plantas de vid, distintos abastecimientos de agua en el suelo pueden provocar cambios en la acumulación de materia seca en cada una de las etapas fenológicas del cultivo (Gómez del Campo *et al.*, 2002). Este cambio en la acumulación de materia seca es producto de la alteración de la maquinaria fisiológica de la planta, lo que se ve reflejado en el cambio de la actividad de variables fisiológicas de ésta, como la fotosíntesis, transpiración, conductancia estomática y el potencial hídrico (Cui *et al.*, 2009; Gómez del Campo *et al.*, 2002; Gómez del Campo *et al.*, 2007).

Problemática de la escasez de agua

El agua es cada vez más escasa, no sólo en áreas propensas a aridez y sequía, sino que también en regiones donde las precipitaciones son abundantes. La escasez de

agua considera la cantidad de recurso disponible y la calidad de éste, debido a que un agua de mala calidad no es propicia para su uso (Pereira *et al.*, 2002). Debido a esta creciente problemática es que, en agendas públicas y privadas, se ha promovido la modernización y optimización de los sistemas de riego, como herramientas para mejorar la eficiencia del riego, obteniendo productos agrícolas con menos uso de agua (Playán y Mateos, 2006). La modernización de los sistemas de riego mejora las condiciones de vida en el mundo rural y añade tecnología a la producción agrícola, por lo que el empleo en estas zonas se vuelve más atractivo y competitivo (Playán y Mateos, 2006).

Es conveniente incrementar la productividad hídrica donde el agua es escasa comparada con otros recursos involucrados en la producción (Molden *et al.*, 2010). La productividad hídrica se entiende como la relación entre la producción de un cultivo y la cantidad de agua utilizada, expresada como la producción del cultivo por unidad de volumen de agua (Ali y Talukder, 2008). Sin embargo, los especialistas en riego han usado el término **eficiencia del uso del agua** para describir cuán eficientemente se entrega el agua a los cultivos, y para indicar la cantidad de agua que se ha consumido (Molden *et al.*, 2010). El problema principal que se debe resolver en la investigación agrícola con respecto al ahorro de agua, es el cómo elevar la tasa de utilización y la eficiencia de uso de ésta, lo que se traduce en alcanzar altos rendimientos en terrenos agrícolas bajo riego con un mínimo uso del recurso (Deng *et al.*, 2006).

En áreas donde la sequía coincide con la temporada de crecimiento de la vid, como en climas mediterráneos, los déficits hídricos progresivos del suelo y los altos gradientes de presión de vapor entre la hoja y el aire, junto con las altas temperaturas y la radiación, ejercen grandes limitaciones sobre el rendimiento y la calidad (Flexas *et al.*, 2010).

Investigaciones en especies como pera-jujuba (*Zizyphus jujube* Mill.) (Cui *et al.*, 2009), vid (Acevedo-Opazo *et al.*, 2010; De Souza *et al.*, 2005; Intrigliolo y Castel, 2009; Medrano *et al.*, 2003; Poni *et al.*, 1994; Santesteban *et al.*, 2011), trigo y maíz (Zhang *et al.*, 2004), damasco (Torrecillas *et al.*, 2000), naranjo (García-Tejero *et al.*, 2010) y almendro (Stewart *et al.*, 2011), han dejado en evidencia que existe una posibilidad real de aplicar déficits hídricos en zonas donde el agua es escasa, sin afectar de manera significativa los rendimientos. Sin embargo, en especies como cerezo (Livellara *et al.*, 2011), tomate (Savić *et al.*, 2008) y algodón (Jalota *et al.*, 2006), el déficit hídrico aplicado disminuyó el rendimiento. Otros trabajos indican que los déficits hídricos pueden tener efectos positivos sobre la biosíntesis de compuestos fenólicos en la piel de la bayas (Castellarin *et al.*, 2007; Ojeda *et al.*, 2002), aunque este efecto parece estar relacionado con el estado fenológico en el cual se aplica el déficit y la intensidad de éste (Ojeda *et al.*, 2002).

La diferencia en la respuesta al déficit hídrico entre especies se debe a la variación que existe entre cada uno de sus requerimientos hídricos (Ali y Talukder, 2008), más aun, esta diferencia no sólo existe entre especies, sino que también entre variedades (Bota *et al.*, 2000; De Souza *et al.*, 2005; Gómez del Campo *et al.*, 2002; Gómez del Campo *et al.*, 2007; Santesteban *et al.*, 2009). Como se espera que aumente la escasez de agua fresca para la agricultura en el mundo, se necesita un aumento de la eficiencia del

uso del agua, ya sea mejorando el desarrollo genético y las prácticas hortícolas, o mejorando la programación del riego (Naor, 2008).

El agua en la planta

El agua juega un rol crucial en la vida de los vegetales. Por cada gramo de materia orgánica sintetizada por la planta, aproximadamente 500 g de agua se absorben a través de las raíces, son transportados a través de los tejidos de la planta y liberados a la atmósfera. Incluso suaves desbalances en este flujo pueden causar déficits de agua y severos daños en muchos procesos celulares (Taiz y Zeiger, 2007). El crecimiento vegetal está altamente correlacionado con la disponibilidad de agua, por lo que el estrés hídrico puede afectar procesos como la expansión celular, actividad enzimática, respiración, metabolismo de carbohidratos, partición de materia seca entre raíces y brotes, fotosíntesis, síntesis de proteínas y el balance de reguladores de crecimiento (Pallardy, 2008). El movimiento de agua en la planta es un proceso pasivo, inducido por diferencias de potencial hídrico entre dos sistemas particulares, el cual ocurre desde zonas de mayor a otras de menor potencial hídrico. En el interior de la planta, el potencial hídrico es más elevado en las raíces, disminuyendo progresivamente en el tallo, observándose los valores más bajos en las hojas (Azcón-Bieto y Talón, 2000).

El potencial hídrico se cuantifica como la diferencia de energía que existe entre el agua de un sistema específico y el agua pura, a la misma temperatura y presión atmosférica, el cual se mide en unidades de presión (MPa) (Lambers *et al.*, 2008). Es una medida de cuán hidratada está una planta, por lo que provee un índice relativo del estrés hídrico que pueda estar sufriendo (Taiz y Zeiger, 2007). En hojas de plantas bien hidratadas, el potencial hídrico varía de -0,2 a cerca de -1,0 MPa, pero las hojas de plantas en climas áridos pueden tener valores mucho más bajos, en un rango de -2 a -5 MPa bajo condiciones extremas (Taiz y Zeiger, 2007). Así, el mecanismo hidráulico que conduce e impulsa el agua desde el suelo a través de la planta y la inyecta en la atmósfera se comporta como un verdadero sistema continuo suelo-planta-atmósfera, en el que cambios en el potencial del agua en cualquier punto, por ejemplo en el suelo, causa cambios en el resto de puntos del sistema (Santa Olalla *et al.*, 2005).

Efectos del estrés hídrico en la planta

El estrés se define, usualmente, como un factor externo que ejerce una influencia desventajosa sobre la planta. Comprender los procesos fisiológicos que sufren daño por estrés, la adaptación y los mecanismos de aclimatación de los vegetales al estrés medioambiental, es de inmensa importancia para la agricultura y el medioambiente (Taiz y Zeiger, 2007).

El estrés hídrico es considerado como el factor más limitante para el crecimiento vegetal y la producción en zonas mediterráneas (Patakas y Noitsakis, 2001; Patakas *et al.*, 2002). En estas regiones, las vides crecen a menudo expuestas a condiciones de estrés hídrico, debido a la alta demanda hídrica de la atmósfera y la baja disponibilidad de agua en el suelo.

Las plantas pueden estar sometidas a distintos períodos de escasez de agua, lo cual genera distintas respuestas de aclimatación en ellas, con el objeto de evitar la deshidratación. Entre las respuestas más comunes están la disminución del ciclo de vida del cultivo, minimizar la pérdida de agua, o mostrar cambios metabólicos que la protejan contra los efectos dañinos de la deshidratación y el estrés oxidativo (Chaves *et al.*, 2003). Dentro de los cambios metabólicos, el ajuste osmótico ha sido considerado como uno de los procesos cruciales en la adaptación de las plantas a la sequía, debido a que mantiene la actividad metabólica de los tejidos y permite a la planta rehidratarse (Morgan, 1984, citado por Chaves *et al.*, 2003). Este fenómeno consiste en la acumulación de solutos dentro de la célula vegetal, con el fin de mantener la diferencia de potencial hídrico entre la planta y el suelo en situaciones de sequía, permitiendo continuar con el proceso de absorción de agua (Taiz y Zeiger, 2007), comportamiento que ha sido observado en especies como olivo (Dichio *et al.*, 2005) y vid (Patakas *et al.*, 2002).

Lovisoló y Schubert (1998) observaron que la aplicación de déficits hídricos moderados y severos a plantas de vid 'Freisa' redujeron el diámetro de sus vasos xilemáticos, además de disminuir el flujo de savia xilemático, la tasa transpiratoria de las hojas, la conductancia estomática y la conductividad hidráulica de brotes y hojas. Adicionalmente, el déficit hídrico severo (-0,80 MPa) disminuyó en mayor medida la conductividad hidráulica del brote y generó la aparición de embolismo en los vasos xilemáticos. Los mismos autores estiman que la reducción del diámetro de los vasos del xilema contribuye a un control en el flujo del agua y a evitar el embolismo en los vasos xilemáticos.

La cavitación es común en la naturaleza como resultado del estrés hídrico (Tyree y Sperry, 1989). Es biológicamente importante, ya que los conductos embolizados reducen la conductividad hidráulica del xilema, lo que puede ser relevante para la ecofisiología de las plantas, aumentando la tolerancia a una disponibilidad baja de agua (Tyree y Sperry, 1989).

El estrés hídrico en vid también puede ser producto del anegamiento por la aplicación excesiva de agua al suelo o del mal drenaje del mismo, el que provoca cambios fisiológicos y/o anatómicos, tales como la reducción de la fotosíntesis, la conductancia estomática y la tasa de elongación del brote (Stevens y Prior, 1994), alteraciones que pueden tener un impacto negativo sobre el rendimiento de la vid.

La aplicación de un déficit hídrico moderado en vid podría ser usado de manera positiva, controlando la relación fuente-sumidero, manteniendo ó mejorando la calidad de la fruta y aumentando la eficiencia del uso del agua en relación a cultivos regados de manera óptima (Chaves *et al.*, 2007).

Mejora del uso del agua basada en nuevas formas de control del riego

El riego es la operación más intensiva a través de la temporada de producción hortícola. Su importancia depende del clima y se incrementa desde zonas templadas a zonas más áridas (Naor, 2008). Hasta ahora, la estrategia ha sido abastecer con suficiente agua las áreas bajo riego, con lo que el cultivo transpira a su máximo potencial a través de la temporada, lo que implica un alto costo para los agricultores (Ferreeres y Soriano, 2007). La solución fundamental para la programación del riego sería predecir el nivel óptimo de riego; esto evitaría la necesidad de evaluar el estrés hídrico (Naor, 2008).

Recientemente, se ha investigado acerca de dos estrategias para desarrollar soluciones prácticas con respecto al manejo del riego en vid: el déficit de riego controlado (DRC) y el secado parcial de raíces (SPR) (Patakas *et al.*, 2008). Estas técnicas han sido evaluadas en especies como vid (De Souza *et al.*, 2005; El-Ansary y Okamoto, 2008) y durazno (Abrisqueta *et al.*, 2008), obteniendo efectos negativos sobre la conductancia estomática, el estado hídrico de la plantas, la densidad de raíces y, en algunos casos, la tasa fotosintética de la hoja. Sin embargo, el rendimiento no se ha visto afectado, y se ha incrementado el uso eficiente del agua.

Otras herramientas que han sido postuladas para el control del riego son los indicadores del estrés hídrico basados en la planta, varios de los cuales han sido mostrados como buenas alternativas para la programación del riego (Cifré *et al.*, 2005; Choné *et al.*, 2001; Gálvez, 2011; Intrigliolo y Castel, 2006; Jones, 2004; Loveys *et al.*, 2008; McCutchan y Schackel, 1992; Naor, 2008; Patakas *et al.*, 2005).

VARIABLES fisiológicas como el potencial hídrico de la hoja (Loveys *et al.*, 2008); la variación diaria del diámetro del tronco (Ferreeres y Goldhamer, 2003; Remorini y Massai, 2003); el índice de conductancia de la copa (Loveys *et al.*, 2008); mediciones que combinan el flujo de savia con modelos computacionales (Green, 2008) y con la variación del diámetro del tronco, junto a un modelo matemático para predecir el potencial hídrico xilemático (Steppe y Lemeur, 2008); e, incluso, propiedades físicas del suelo, como el potencial mátrico evaluado mediante el uso de sensores (Intrigliolo y Castel, 2004), han sido postulados como buenas alternativas para la programación del riego. Sin embargo, muchas de las variables anteriores carecen de sensibilidad en la detección del estrés hídrico o presentan una alta variabilidad, lo que las hace poco confiables como programadores del riego (Naor, 2008).

Una de las variables fisiológicas que ha mostrado tener alta sensibilidad al estrés hídrico, y que ha sido postulada como herramienta para el control del riego, es el potencial hídrico xilemático evaluado a mediodía (Choné *et al.*, 2001; Doltra *et al.*, 2007; Ferreyra *et al.*, 2006; Gálvez, 2011; McCutchan y Schackel, 1992; Naor *et al.*, 1999; Naor, 2008; Patakas *et al.*, 2005; Williams y Trout, 2005). Estudios en ciruelo (Shackel *et al.*, 2000), almendros (Stewart *et al.*, 2011), vid de mesa (Galvez, 2011) y vid vinífera (Acevedo-Opazo *et al.*, 2010) han mostrado que es posible el uso de esta variable como programador del momento de riego (frecuencia), con beneficios sobre el ahorro

de agua y el uso eficiente de ésta, sin afectar los rendimientos y mejorando la calidad de la fruta.

La estrecha relación observada entre las variables fisiológicas de la planta, como el potencial hídrico xilemático o la conductancia estomática y el contenido de agua del suelo (Ferreira *et al.*, 2006; Green, 2008; Patakas *et al.*, 2005; Williams y Trout, 2005), muestra que es importante controlar esta última variable como medida complementaria para el manejo óptimo del riego, con lo cual se podría aumentar aún más el uso eficiente del agua (Gálvez, 2011).

El agua en el suelo

El rendimiento y calidad de la uva de mesa están directamente relacionados con el manejo del agua en el suelo (Ferreira *et al.*, 2006; Myburg, 1996; Sellés *et al.*, 2003; Vita *et al.*, 2005), de tal manera que resulta fundamental la integración de las relaciones suelo-agua-planta para la obtención de un óptimo producto comercial.

La localización del agua dentro del suelo tiene una implicancia sobre el desarrollo de las raíces de la planta. Se sostiene que el sistema radical de los árboles frutales se concentra en el volumen de suelo mojado por el sistema de riego, aumentando la densidad radical y la eficiencia de extracción de agua y nutrientes (Box, 1996). Según Ruíz (2000), la calidad del sistema radical define en gran medida el desarrollo y vigor de las plantas; es así como, en general, existe concordancia en afirmar que mayores producciones están relacionadas a un mayor desarrollo del sistema radical (Davies y Zhang, 1991; Honorato *et al.*, 1988, 1990; Richards, 1983; Ruíz, 2000; Ruíz *et al.*, 2007; Sellés *et al.*, 2003; Silva *et al.*, 1991).

Benavides (1992) y Sellés y Ferreira (2007) mencionan que el desarrollo del sistema radical de las plantas se ve directamente afectado por las condiciones de humedad, aireación, temperatura y de resistencia mecánica que se producen en los suelos, y enfatizan que el contenido de agua es el que controla el comportamiento de los factores anteriormente mencionados.

Las dos características más importantes de la fase líquida del suelo son la cantidad de agua, en una cantidad específica de suelo, y la fuerza con que la matriz de suelo atrae el agua (Jury *et al.*, 1991). En suelos no saturados, el agua está sujeta a una presión subatmosférica, o succión mátrica, la que es equivalente a un potencial de presión negativo. La succión mátrica se debe a la afinidad física entre el agua y la matriz porosa del suelo (Hillel, 1998).

La cantidad de agua en el suelo afecta muchos procesos, incluyendo el intercambio de gas con la atmósfera, la difusión de nutrientes a las raíces de las plantas, la temperatura del suelo y la velocidad con la que los solutos se mueven a través de la zona radical durante el riego o lluvia (Jury *et al.*, 1991). La fuerza con la que el agua es retenida por la matriz del suelo también influye en otros procesos, incluyendo la

eficiencia de extracción de agua por parte de las plantas, el drenaje que ocurre bajo gravedad y el grado de movimiento ascendente de agua y solutos en contra de la gravedad (Hillel, 1982; Jury *et al.*, 1991).

La mayoría de los procesos que involucran a los factores suelo-agua interaccionan en el campo, particularmente el flujo de agua en la zona radical de las plantas de cultivo; esto último generalmente ocurre mientras el suelo está en condición no saturada (Hillel, 1982).

La conductividad de agua en el suelo describe la funcionalidad del sistema poroso (Ellies *et al.*, 1997; Pachepsky *et al.*, 2000) y está influenciada fundamentalmente por el tamaño y forma de los poros por los cuales fluye el agua (Tschapek, 1969). En la matriz del suelo, el espacio poroso es aquella parte del volumen que no está ocupada por partículas sólidas, pero sí por gases y por agua; se encuentra íntimamente relacionado con la textura, la estructura y el contenido de materia orgánica (Hillel, 1998). La porosidad se relaciona con propiedades como retención y movimiento del agua, aireación, transferencia de gases en la rizósfera y la facilidad con que las raíces pueden penetrar en el suelo y absorber nutrientes (Hillel, 1998).

El movimiento de agua en los suelos no saturados es materia de interés para el estudio de las relaciones suelo-planta, recuperación de suelos y calidad del medioambiente. El agua no solamente se infiltra y se almacena para uso futuro, sino también se mueve de un suelo no saturado a las raíces de la planta y a los sitios de evaporación, o bien se pierde por percolación profunda (Gavande, 1972; Hillel, 1982), arrastrando consigo nutrientes y contaminantes (Jury *et al.*, 1991). La comprensión del continuo suelo-agua-planta es de utilidad para la adecuada gestión del agua, con miras a un uso eficiente de ésta, manteniendo un nivel de producción elevado y estable en el tiempo y no comprometiéndolo la calidad ambiental.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Abrisqueta, J.M., O. Mounzer, S. Álvarez, W. Conejero, Y. García-Orellana, L.M. Tapia, J.Vera, I. Abrisqueta and M.C. Ruiz-Sánchez. 2008. Root dynamics of peach trees submitted to partial rootzone drying and continuous deficit irrigation. *Agricultural Water Management* 95 (8): 959-967.
- 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.
- Ali, M.H. and M.S.C. Talukder. 2008. Increasing water productivity in crop production-A synthesis. *Agricultural Water Management* 95 (11): 1201-1213.
- Azcon-Bieto, J. y M. Talón. 2000. *Fundamentos de fisiología vegetal*. Eudeba y McGraw-Hill. Barcelona, España. 521 p.
- Benavides, C. 1992. El suelo como sistema físico. pp. 121-152. In: Vera, W. (Ed.). *Suelos, una visión actualizada del recurso*. Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Agrarias y Forestales. Publ. Misc. Agr. N° 38. 345 p.
- Bota, J., J. Flexas and H. Medrano. 2000. Genetic variability of photosynthesis and water use in Balearic grapevine cultivars. *Annals of Applied Biology* 138 (3): 353-361.
- Box, J., 1996. Modern methods for root investigations. pp. 193-237 In: Eshel, A., U. Kafkafi, Y. Waisel. (eds). *Plants roots, the hidden half*. 2a ed. Marcel Dekker. New York, USA. 1002 p.
- Cabello, M.J., M.T. Castellanos, F. Romojaro, C. Martinez-Madrid and F. Ribas. 2009. Yield and quality of melon grown under different irrigation and nitrogen rates. *Agricultural of Water Management* 96 (5): 866–874.
- Castellarin, S., M. Matthews, G. Di Gaspero and G. Gambetta. 2007. Water deficits accelerate ripening and induce changes in gene expression regulating flavonoid biosynthesis in grape berries. *Planta* 227 (1): 101-112.
- Cifré, J., J. Bota, J.M. Escalona, H. Medrano and J. Flexas. 2005. Physiological tools for irrigation scheduling in grapevine (*Vitis vinifera* L.) An open gate to improve water-use efficiency?. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 106 (2-3): 159-170.
- Chaves, M., J. Moroco and J. Pereira. 2003. Understanding plant responses to drought – from genes to the whole plant. *Functional Plant Biology* 30 (3): 239-264.
- Chaves, M.M., T.P. Santos, C.R. Souza, M.F. Ortuño, M.C. Rodrigues, C.M. Lopes, J.P. Maroco and J.S. Pereira. 2007. Deficit irrigation in grapevine improves water use efficiency while controlling vigour and production quality. *Annals of Applied Biology* 150 (2): 237-252.

- Choné, X., C. Van Leeuwen, D. Dubourdieu, and J.P. Gaudillere. 2001. Stem water potential is a sensitive indicator of grapevine water status. *Annals of Botany* 87 (4): 477-483.
- Cui, N., T. Du, F. Li, L. Tong, S. Kang, M. Wang, X. Liu and Z. Li. 2009. Response of vegetative growth and fruit development to regulated deficit irrigation at different growth stages of Pear-Jujube tree. *Agricultural Water Management* 96: 1237-1246.
- Davies, W. J. and J. Zhang. 1991. Root signals and the regulation of growth and development of plants in drying soil. *Plant Physiol.* 42: 55-76.
- De Souza, C.R., J.P. Maroco, T.P. Dos Santos, M.L. Rodrigues, C. Lopes, J.S. Pereira and M.M. Chaves. 2005. Control of stomatal aperture and carbon uptake by deficit irrigation in two grapevine cultivars. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 106 (2-3): 261-274.
- Deng, X., L. Shan, H. Zhang and N.C. Turner. 2006. Improving agricultural water use efficiency in arid and semiarid areas of China. *Agricultural Water Management* 80: 23-40.
- Dichio, B., C. Xiloyannis, A. Sofo and G. Montanaro. 2005. Osmotic regulation in leaves and roots of olive trees during a water deficit and rewatering. *Tree Physiology* 26 (2): 179-185.
- Doltra, J., J.A. Oncins, J. Bonany and M. Cohen. 2007. Evaluation of plant-based water status indicators in mature apple trees under field conditions. *Irrigation Science* 25 (4): 351-359.
- Ellies, A., R. Grez y C. Ramírez. 1997. La conductividad hidráulica en fase saturada como herramienta para el diagnóstico de la estructura del suelo. *Agro Sur* 25 (1): 51-56.
- El-Ansary, D.O. and G. Okamoto. 2008. Improving table grape quality with less irrigation water in Japan: partial root-zone drying versus regulated deficit. *Acta Horticulturae* 792: 265-271.
- Fereres, E. and D.A. Goldhamer. 2003. Suitability of stem diameter variations and water potential as indicators for irrigation scheduling of almond trees. *Journal of Horticultural Science & Biotechnology* 78 (2): 139-144.
- Fereres, E. and M.A. Soriano. 2007. Deficit irrigation for reducing agricultural water use. *Journal of Experimental Botany* 58 (2): 147-159.
- 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'. *Pesquisa Agropecuária Brasileira* 41 (7): 1109-1118.
- Flexas, J., J. Galmés, A. Gallé, J. Gulías, A. Pou, M. Ribas-Carbo, M. Tomás and H. Medrano. 2010. Improving water use efficiency in grapevines: potential physiological targets for biotechnological improvement. *Australian Journal of Grape and Wine Research* 16 (1): 106-121.

- Gálvez, R. 2011. Evaluación del uso conjunto del potencial hídrico xilemático y el déficit de presión de vapor en el manejo del riego en vides de mesa. Tesis de Magíster. Universidad de Chile. Facultad de Ciencias Agronómicas. Santiago, Chile. 59 p.
- García-Tejero, I., J.A. Jiménez-Bocanegra, G. Martínez, R. Romero, V.H. Durán-Zuazo and J.L. Muriel-Fernández. 2010. Positive impact of regulated deficit irrigation on yield and fruit quality in a comercial citrus orchard [*Citrus sinensis* (L.) Osbeck, cv. Salustiano]. *Agricultural Water Management* 97 (5): 614-622.
- Gavande, K. H. 1972. Física de suelos. Principio y aplicaciones. Ed. Limusa. Wiley, México. 351 p.
- Gómez del Campo, M., C. Ruiz and J.R. Lissarrague. 2002. Effect of water stress on leaf area development, photosynthesis, and productivity in Chardonnay and Airén grapevines. *American Journal of Enology and Viticulture* 53 (2): 138-143.
- Gómez del Campo, M., P. Baeza, C. Ruiz, V. Sotés and J.R. Lisarrague. 2007. Effect of previous water conditions on vine response to rewatering. *Vitis* 46 (2): 51-55.
- Green, S.R. 2008. Measurement and modeling the transpiration of fruit trees and grapevines for irrigation scheduling. *Acta Horticulturae* 792: 321-332.
- Hillel, D. 1982. *Introductions to Soil Physics*. Academic Press. Orlando, EE.UU. 364 p.
- Hillel, D. 1998. *Environmental Soil Physics*. Academic Press. San Diego, EE.UU. 771 p.
- Honorato, R., H. Silva y C. Bonomelli. 1988. Efecto del suelo en el patrón de enraizamiento y productividad de la vid. *Ciencia e Investigación Agraria* 15 (3): 159-171.
- Honorato, R., H. Silva y C. Bonomelli. 1990. Productividad de parronales de la Región Metropolitana y sus relaciones edáficas. *Ciencia e Investigación Agraria* 17 (3): 133-143.
- Intrigliolo, D.S. and J.R. Castel. 2004. Continuous measurement of plant and soil water status for irrigation scheduling in plum. *Irrigation Science* 23 (2): 93-102.
- Intrigliolo, D.S. and J.R. Castel. 2006. Performance of various water stress indicators for prediction of fruit size response to deficit irrigation in plum. *Agricultural Water Management* 83 (1-2): 173-180.
- Intrigliolo, D.S. and J.R. Castel. 2009. Response of *Vitis vinifera* cv. 'Tempranillo' to partial rootzone drying in the field: water relations, growth, yield and fruit and wine quality. *Agricultural Water Management* 96 (2): 282-292.
- Jalota, S.K., A. Sood, G.B.S. Chahal and B.U. Choudhury. 2006. Crop water productivity of cotton (*Gossypium hirsutum* L.) – Wheat (*Triticum aestivum* L.) system as influenced by deficit irrigation, soil texture and precipitation. *Agricultural Water Management* 84 (1-2): 137-146.

Jones, H.G. 2004. Irrigation scheduling: advantages and pitfalls of plant-based methods. *Journal of Experimental Botany* 55 (407): 2427-2436.

Jury, W., W. Gardner and W. Gardner. 1991. *Soil physics*. 5a edición. Ed. John Wiley & Sons, Inc. California, USA. 328 p.

Lambers, H., F. Chapin and T. Pons. 2008. *Plant physiological ecology*. 2a edición. Springer-Verlag, New York. 604 p.

Livellara, N., F. Saavedra and E. Salgado. 2011. Plant Based indicators for irrigation scheduling in young cherry trees. *Agricultural Water Management* 98 (4): 684-690.

Loveys, B.R., J.C. Theobald, H.G. Jones and M.G. McCarthy. 2008. An assessment of plant-based measures of grapevine performance as irrigation scheduling tools. *Acta Horticulturae* 792: 421-427.

Lovisoló, C. and A. Schubert. 1998. Effects of water stress on vessel size and xylem hydraulic conductivity in *Vitis vinifera* L. *Journal of Experimental Botany* 321 (49): 693-700.

McCutchan, H. and K.A. Schackel. 1992. Stem-water potential as a sensitive indicator of water stress in prune trees (*Prunus domestica* L. cv. French). *Journal of the American Society for Horticultural Science* 117 (4): 607-611.

Medrano, H., J.M. Escalona, J. Cifre, J. Bota and J. Flexas. 2003. A ten year study on the physiology of two Spanish grapevine cultivars under field conditions: effects of water availability from leaf photosynthesis to grape yield and quality. *Functional Plant Biology* 30 (6): 607-619.

Molden, D., T. Oweis, P. Steduto, P. Bindraban, M.A. Hanjra, and J. Kijne. 2010. Improving agricultural water productivity: between optimism and caution. *Agricultural Water Management* 97: 528-535.

Myburg, P. 1996. Response of *Vitis vinifera* L. cv. Barlinka/Ramsey to soil water depletion levels with particular reference to trunk growth parameters. *South African Journal of Enology and Viticulture* 17:3-14.

Naor, A. 2008. Water stress assessment for irrigation scheduling of deciduous trees. *Acta Horticulturae* 792: 467-481.

Naor, A., I. Klein, H. Hupert, Y. Grinblat, M. Peres and A. Kaufman. 1999. Water stress and crop level interactions in relation to nectarine yield, fruit size distribution, and water potentials. *Journal of American Society of Horticultural Science* 124 (2): 189-193.

Nobel, P. 2005. *Physicochemical and Environmental plant physiology*. 3a edición. Academic Press. New York, EE.UU. 567 p.

Ojeda, H., C. Andary, E. Kraeva, A. Carbonneau and A. Deloire. 2002. Influence of pre- and postveraison water deficit on synthesis and concentration of skin phenolic

compounds during berry growth of *Vitis vinifera* cv. Shiraz. *American Journal of Enology and Viticulture* 53 (4): 261-267.

Pachepsky, Y., W. Rawls and D. Timlin. 2000. A one-parameter relationship between unsaturated hydraulic conductivity and water retention. *Soil Science* 165 (12): 911-920.

Pallardy, S. 2008. *Physiology of woody plants*. 3a edición. Academic Press. New York, EE.UU. 454 p.

Patakas, A. and B. Noitsakis. 2001. Leaf age effects on solute accumulation in water stressed grapevines. *Journal of Plant Physiology* 158 (1): 63-69.

Patakas, A., N. Nikolaou, E. Zioziou, K. Radoglou and B. Noitsakis. 2002. The role of organic solute and ion accumulation in osmotic adjustment in drought – stressed grapevines. *Plant Science* 163 (2): 361-367.

Patakas, A., B. Noitsakis and A. Chouzouri. 2005. Optimization of irrigation water use in grapevines using the relationship between transpiration and plant water status. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 106 (2-3): 253-259.

Patakas, A., B. Noitsakis, A. Chouzouri, A. Beis, A. Zotos and K. Chartzoulakis. 2008. Physiological and biochemical changes induced by different irrigation strategies in grapevines. *Acta Horticulturae* 792: 511-517.

Pereira, L.S., T. Oweis and A. Zairi. 2002. Irrigation management under water scarcity. *Agricultural Water Management* 57: 175-206.

Playán, E. and L. Mateos. 2006. Modernization and optimization of irrigation systems to increase water productivity. *Agricultural Water Management* 80: 100-116.

Poni, S., A.N. Lakso, J.R. Turner and R.E. Melious. 1994. Interactions of crop level and late season water stress on growth and physiology of field-grown Concord Grapevines. *American Journal of Enology* 45 (2): 252-258.

Remorini, D. and R. Massai. 2003. Comparison of water status indicators for young peach trees. *Irrigation Science* 22 (1): 39-46.

Richards, D. 1983. The grape root system. *Horticultural Reviews* 5:127-168.

Ruíz, R. 2000. Dinámica nutricional en cinco parrones de diferente productividad del valle central regado de Chile. *Agricultura Técnica* 60 (4): 379-398.

Ruíz, R., G. Sellés y R. Ahumada. 2007. Aspectos físicos del suelo y calidad de fruta en parronales de uva de mesa. pp. 101-114. In: Muñoz, I., M. González y G. Sellés. (eds.). *Manejo de suelo y riego en vides para vino y mesa*. Instituto de Investigaciones Agropecuarias, INIA. Santiago. Serie Actas Nº 39. 196 p.

Santa Olalla, F.M., P. López y A. Calera. 2005. *Agua y agronomía*. Mundi Prensa. Madrid, España. 606 p.

Santesteban, L.G., C. Miranda and J.B. Royo. 2009. Effect of water deficit and rewatering on leaf gas exchange and transpiration decline of excised leaves of four grapevine (*Vitis vinifera* L.) cultivars. *Scientia Horticulturae* 121 (4): 434-439.

Santesteban, L.G., C. Miranda and J.B. Royo. 2011. Regulated deficit irrigation effects on growth, yield, grape quality and individual anthocyanin composition in *Vitis vinifera* L. cv. 'Tempranillo'. *Agricultural Water Management* 98 (7): 1171-1179.

Savić, S., R. Stikic, B. Vucelic, B. Bogicevic, Z. Jovanovic and V. Hadzi-Taskovic. 2008. Comparative effects of regulated deficit irrigation (RDI) and partial root-zone drying (PRD) on growth and cell wall peroxidase activity in tomato fruits. *Scientia Horticulturae* 117 (1): 15-20.

Sellés, G., R. Ferreyra, G. Contreras, R. Ahumada, J. Valenzuela y R. Bravo. 2003. Manejo del riego por goteo en uva de mesa cv. Thompson Seedless cultivada en suelos de textura fina. *Agricultura Técnica* 63 (2):180-192.

Sellés, G. y R. Ferreyra. 2007. Criterios para controlar el riego en uva de mesa. pp: 15-58. In: Muñoz, I., M. González y G. Sellés. (eds.). Manejo de suelo y riego en vides para vino y mesa. Instituto de Investigaciones Agropecuarias INIA. Serie Actas N° 39. 196 p.

Shackel, K.A., B. Lampinen, S. Southwick, W. Olson, S. Sibbett, W. Krueger, J. Yeager and D. Goldhamer. 2000. Deficit irrigation in *Prunus*: Maintaining productivity with less water. *HortScience* 35 (6): 1063-1066.

Silva, H., R. Honorato y C. Bonomelli. 1991. Crecimiento radical y desarrollo de la vid variedad Thompson Seedless. *Aconex* 34: 14-21.

Steppe, K. and R. Lemeur. 2008. A novel methodology for irrigation scheduling using plant-based measurements and mathematical modelling. *Acta Horticulturae* 792: 631-638.

Stevens, R.M. and L.D. Prior. 1994. The effect of transient waterlogging on the growth, leaf gas exchange, and mineral composition of potted sultana grapevines. *American Journal of Enology and Viticulture* 45 (3): 285-290.

Stewart, W., A. Fulton, W. Krueger, B. Lampinen and K.A. Shackel. 2011. Regulated deficit irrigation reduces water use of almonds without affecting yield. *California Agriculture* 65 (2): 90-95.

Sun, H.Y., C.M. Liu, X.Y. Zhang, Y.J. Shen and Y.Q. Zhang. 2006. Effects of irrigation on water balance, yield and WUE of winter wheat in the North China Plain. *Agricultural Water Management* 85: 211-218.

Taiz, L. and E. Zeiger. 2007. *Plant Physiology*. 3a edición. Ed. Sinauer Associates, Inc. Sunderland, EE.UU. 580 p.

Torrecillas, A., R. Domingo, R. Galego and M.C. Ruiz-Sánchez. 2000. Apricot tree response to withholding irrigation at different phenological periods. *Scientia Horticulturae* 85: 201-215.

Tschapek, M. 1969. El agua en el suelo. Consejo Superior de Investigaciones Científicas. Madrid. 479 p.

Tyree, M.T. and S. Sperry. 1989. Vulnerability of xylem to cavitation and embolism. *Annual Review of Plant Physiology and Plant Molecular Biology* 40: 19-38.

Vita, F., M. Liotta y C. Parra. 2005. Efecto de diferentes láminas de riego en la producción de uva de mesa cv. Sugarone Seedless. Disponible en: <http://www.uvademesa.cl/ARCHIVOS%20PDF/3%20laminasdeaguaen%20Sugarone.pdf> f. Leído 2 de Mayo de 2011.

Williams, L.E. and T.J. Trout. 2005. Relationship among vine- and soil-based measures of water status in a Thompson Seedless vineyard in response to high-frequency drip irrigation. *American Journal of Enology and Viticulture* 56 (4): 357-366.

Yazar, A. and S.M. Sezen. 2006. Effects of full and deficit irrigation on yield and water use efficiency of winter wheat in the arid southeast Anatolia region of Turkey. In: *Proceedings of the 1st International Symposium on Land and Water Management for Sustainable Irrigated Agriculture*, Adana Turkey. 4-8 April. Cukurova University, Adana. Turkey.

Zhang, Y., E. Kendy, Y. Qiang, L. Changming, S. Yanjun and S. Hongyong. 2004. Effect of soil water deficit on evapotranspiration, crop yield, and water use efficiency in the North China Plain. *Agricultural Water Management* 64: 107-122.

CAPÍTULO II. EFECTO DE DISTINTOS CRITERIOS DE RIEGO SOBRE VARIABLES FISIOLÓGICAS Y PARÁMETROS PRODUCTIVOS DE UVA DE MESA (*Vitis vinifera* L.) 'RED GLOBE'

RESUMEN

En la Región de Atacama, y a nivel mundial, la disponibilidad de agua para el uso agrícola es escasa, situación que se ha visto agravada en los últimos años por la demanda hídrica de otros sectores productivos. El uso de variables fisiológicas y el contenido de agua del suelo, en conjunto con la comprensión de la interacción planta-medioambiente, han permitido aumentar la eficiencia del uso del agua de riego (EUAr). El objetivo de esta investigación fue evaluar el efecto de distintos criterios de riego sobre variables fisiológicas y parámetros productivos de uva de mesa 'Red Globe'. Se utilizaron plantas de vid de 20 años establecidas en parrón español, las cuales fueron sometidas a: control del riego desde baya de 6 mm hasta envero, con un Ψ_{hx} umbral de -0,77 MPa, y desde envero a cosecha según la relación DPV (déficit de presión de vapor)- Ψ_{hx} (T1), consumo del 30% de la humedad aprovechable del suelo (T2) y testigo de campo, con alto volumen de riego cada tres días, equivalente a $1.281 \text{ m}^3 \cdot \text{ha}^{-1}$ semanales (T3). En todos los tratamientos se determinó Ψ_{hx} , conductancia estomática, temperatura foliar, temperatura ambiente, humedad relativa, DPV y contenido de agua del suelo. Se evaluó rendimiento total y comercial, fecha de cosecha, sólidos solubles, calibre y peso de poda. El Ψ_{hx} fue la variable más sensible a la disponibilidad de agua en el suelo. El uso de variables fisiológicas (T1) y del contenido de agua del suelo (T2) como herramienta de control del riego redujo en un 22% y 54% el agua aplicada, respectivamente, con respecto al riego tradicional de campo, generando un aumento en la EUAr. El rendimiento comercial de T1 y T2 no se vio afectado, observándose en el testigo de campo (T3) un retraso en la cosecha y un aumento en la cantidad de fruta de descarte, debido principalmente a la falta de color de cubrimiento de los racimos. Los resultados permiten concluir que los criterios de riego aplicados a T1 y T2 permiten un ahorro de agua sin afectar de manera significativa la producción comercial de fruta.

Palabras clave: Déficit de presión de vapor, estrés hídrico, potencial hídrico xilemático, consumo de agua.

**CHAPTER II. EFFECT OF DIFFERENT IRRIGATION CRITERIA ON PHYSIOLOGICAL
VARIABLE AND PRODUCTIVE PARAMETERS OF 'RED GLOBE'
TABLE GRAPES (*Vitis vinifera* L.)**

ABSTRACT

In the Atacama region, and at global scale, water availability for agricultural purposes is becoming scarce, situation that has been exacerbated in the last years by water demanded by other productive sectors. The use of physiological variables and soil water content, joined to the understanding of the plant-environment interaction, have increased the water use efficiency (WUE). The aim of this study was to evaluate the effect of different irrigation criteria on physiological variables and productive parameters of 'Red Globe' table grapes. Twenty-year-old vines trained on a pergola trellis system were irrigated by different criteria: according to $\Psi_{hx} = -0,77$ MPa from 6 mm berry size to veraison, and according to VPD (vapor pressure deficit)- Ψ_{hx} relationship from veraison to harvest (T1), 30% consumption of available soil moisture (T2), and control, based on a high volume irrigation each three days, equivalent to $1,281 \text{ m}^3 \cdot \text{ha}^{-1}$ per week (T3). On every treatment, Ψ_{hx} , stomatal conductance, leaf and air temperature, relative humidity, VPD and soil water content were determined. Total and marketable yield, harvest date, soluble solids, berry diameter and pruning weight were evaluated. Ψ_{hx} was the more sensitive variable to soil water availability. The use of physiological variables (T1) and soil water content (T2) as irrigation control tool reduced 22% and 54% the water applied, respectively, compared with control irrigation (T3), generating an increase in WUE. Marketable yield of T1 and T2 remain the same, while larger volume of water applied to T3 generated a delayed harvest and increased cull production, mainly due to poor color of clusters. The results indicated that the applied irrigation criteria allow water savings without significantly affect on marketable yield.

Keywords: Vapor pressure deficit, water stress, stem water potential, water consumption.

INTRODUCCIÓN

En zonas mediterráneas con escasez de agua, el riego es considerado como uno de los factores más importantes para la producción de vid (Patakas *et al.*, 2005). Si bien es una herramienta clave para aumentar la productividad de los cultivos, muchos agricultores aplican grandes cantidades de agua de manera ineficiente, debido a que carecen de las herramientas correctas que les permitan programar el riego de forma efectiva (De Oliveria *et al.*, 2009). Debido a esto, existe preocupación por obtener técnicas de control de riego más precisas, como herramienta para manipular la calidad del cultivo y mantener la productividad (Jones, 2008). Sumado a esto, los estudios con respecto al cambio climático indican una reducción de la disponibilidad de agua para la agricultura, especialmente en áreas donde se produce la vid, lo que obliga a aumentar el uso eficiente del agua con el fin de asegurar una viticultura sustentable (Flexas *et al.*, 2010).

En los últimos años, se ha investigado acerca de la posibilidad de utilizar nuevos criterios de programación de riego, los cuales se basan tanto en el control de variables relacionadas al crecimiento y estado hídrico de planta, como del estado hídrico del suelo. En este contexto, la variación del diámetro del tronco (Fereres *et al.*, 1999; Ortuño *et al.*, 2004; Remorini y Massai, 2003), el flujo de savia (González-Altozano *et al.*, 2008; Ortuño *et al.*, 2004; Sousa *et al.*, 2006), el índice de reflectancia (Serrano *et al.*, 2010), la conductancia estomática (Grimes y Williams, 1990), el potencial hídrico xilemático al alba (Doltra *et al.*, 2007), el potencial hídrico de la hoja al alba (Intrigliolo y Castel, 2006), la termometría infrarroja (Jones, 1999) y el potencial hídrico de la hoja a mediodía (Girona *et al.*, 2006; Sousa *et al.*, 2006) han mostrado ser sensibles a déficits hídricos en variadas especies frutales y, por lo tanto, han sido propuestas como herramientas para el control del riego. A esto se suma el uso del potencial hídrico del suelo y el contenido de agua de éste, los cuales también han sido evaluados como posibles herramientas de control de riego (El-Ansary y Okamoto, 2008; Goldhamer *et al.*, 2001; Intrigliolo y Castel, 2004; Naor, 2001).

Las variables nombradas anteriormente no son precisas al momento de ser utilizadas como indicadores del grado de estrés hídrico que pueda estar sufriendo la planta, pues como indica Naor (2008), un indicador del estrés hídrico debe responder a los cambios en el contenido de agua del suelo, presentar una correlación con parámetros productivos, detectar tempranamente el estrés y permitir fijar valores umbrales para el control del riego, condiciones que son difíciles de cumplir a cabalidad con un solo indicador. Adicionalmente, Loveys *et al.* (2008) señalan que las técnicas que se basan en instrumentos portables son más convenientes, ya que permiten una mayor cantidad de mediciones, de manera de poder evaluar variaciones espaciales y temporales en los parámetros medidos.

Una de las variables que cumple con las características antes citadas es el potencial hídrico xilemático evaluado a mediodía (Ψ_{hx}), el cual ha sido postulado como una herramienta eficaz para el control del riego por diversos autores (Choné *et al.*, 2001; Doltra *et al.*, 2007; Ferreyra *et al.*, 2006; Gálvez, 2011; McCutchan y Shackel, 1992;

Naor *et al.*, 1999; Naor, 2008; Patakas *et al.*, 2005; Williams y Trout, 2005) y que ha sido probada con éxito como programador de riego en especies frutales como ciruelo (Shackel *et al.*, 2000), almendro (Stewart *et al.*, 2011), vid de mesa (Gálvez, 2011) y vid vinífera (Acevedo-Opazo *et al.*, 2010), con beneficios sobre el ahorro de agua y el uso eficiente de ésta, sin afectar los rendimientos y mejorando la calidad de la fruta. Sin embargo, si bien es un índice que refleja bien la accesibilidad de las raíces al agua y la disponibilidad de ésta, no necesariamente indica el volumen de agua almacenada o la eficiencia de uso a nivel de suelo, por lo que es necesario contrastarlo con algún parámetro directamente relacionado con el agua del suelo.

Por otra parte, Gálvez (2011) propuso complementar la medición del Ψ_{h_x} con la demanda hídrica atmosférica, representada por el DPV, para el control del riego a partir de valores de Ψ_{h_x} que mantienen a la planta de vid bajo una óptima condición hídrica, lo que trae como ventaja suministrar agua a la planta sólo cuando ésta lo requiere.

En la Región de Atacama la producción de uva de mesa se ha basado tradicionalmente en la aplicación de grandes volúmenes de agua a las plantas de vid, alcanzando una alta ineficiencia en el uso del recurso (Gálvez, 2011), por lo que resulta interesante contrastar distintos criterios de riego, evaluando su efecto sobre parámetros fisiológicos y productivos de la vid de mesa.

HIPÓTESIS

Es factible incrementar la eficiencia del uso de agua utilizando como criterio de riego variables fisiológicas y de suelo, sin afectar la producción comercial de uva de exportación.

OBJETIVO

Evaluar el efecto de distintos criterios de riego sobre variables fisiológicas y parámetros productivos de uva de mesa (*Vitis vinifera L.*) variedad Red Globe.

MATERIALES Y MÉTODO

Materiales

Lugar del estudio

El estudio se realizó en el Fundo San Ignacio (28°55'18.23" S, 70°16'29.04" O, elevación 1.178 msnm), localidad de la Arena, Comuna de Alto del Carmen, Región de Atacama, durante la temporada agrícola 2009-2010.

Los análisis de suelo se realizaron en las dependencias del Departamento de Ingeniería y Suelos de la Facultad de Ciencias Agronómicas de la Universidad de Chile.

Material vegetal

Se utilizaron plantas de vid de mesa (*Vitis vinifera* L.) 'Red Globe' en plena producción, de 20 años de edad, conducidas en sistema de parrón español, con una distancia de plantación de 3 x 1,5 m, regadas con doble línea de goteros y una distancia entre goteros de 0,75 m (4 goteros por planta de 4 L·h⁻¹ cada uno).

Suelo

El suelo pertenece a la Serie Chancoquín (CIREN, 2007); de textura franco arcillosa y origen aluvio-coluvial, de pendiente 3%, pedregosidad superficial menor al 2% y clase de capacidad de uso IIs.

Clima

Se caracteriza por ser del tipo árido, donde la evapotranspiración supera las precipitaciones. La vegetación nativa es escasa y dispersa, concentrándose mayormente en quebradas y otros cursos de agua. La temperatura media anual supera los 18° C y las temperaturas diarias presentan fuertes oscilaciones entre el día y la noche (20°C o más). La evapotranspiración potencial es máxima en los meses de diciembre y enero, oscilando entre 7 a 8 mm·día⁻¹, mientras que las precipitaciones son

casi inexistentes, concentrándose en los meses de invierno y alcanzando un valor anual de 30 mm. Las horas de frío anuales corresponden a 360 horas¹.

Metodología

Diseño experimental

Se seleccionaron plantas homogéneas en cuanto a su desarrollo (diámetro del tronco a 1 m de altura) y estado fitosanitario, además de ser representativas de las condiciones generales del cuartel.

El diseño experimental fue de bloques completamente al azar, con tres tratamientos y tres repeticiones por tratamiento. La unidad experimental correspondió a un grupo de cuatro plantas ubicadas en la misma hilera. El bloque lo constituyó la hilera.

Los tratamientos consistieron en distintos criterios de riego: tratamiento 1 (T1), criterio fisiológico, que correspondió a control del riego desde baya de 6 mm hasta envero con un Ψ_{h_x} umbral de -0,77 MPa (Ferreyra *et al.*, 2006) y desde envero a cosecha según la relación $DPV-\Psi_{h_x}$ postulada por Gálvez (2011); tratamiento 2 (T2), criterio de suelo, correspondiendo a consumo del 30% de la humedad aprovechable del suelo y, tratamiento 3 (T3), testigo de campo, donde el riego se aplicó según observación subjetiva de la humedad del suelo (frecuencia de riego de 3 días). En el período evaluado, los tratamientos totalizaron un monto equivalente de agua de 4.552; 2.703 y 5.833 $m^3 \cdot ha^{-1}$ para T1, T2 y T3, respectivamente.

El umbral de riego para T2 se definió con la ayuda del programa Soil Water Characteristics 6.02.74 (USDA Agricultural Research Service). Se midió la curva característica de retención de agua del suelo y se registró la humedad con la sonda FDR Diviner 2000; al final del ensayo se realizó la calibración de la sonda, con lo que se corrigieron los valores de contenido de agua medidos por la sonda durante el ensayo.

VARIABLES FISIOLÓGICAS Y AMBIENTALES EVALUADAS

En cada uno de los tratamientos se evaluaron variables fisiológicas y ambientales, entre baya de 6 mm y cosecha.

¹PROYECTO SITOP HUASCO, estación meteorológica La Arena.

Potencial hídrico xilemático a mediodía (Ψ_{hx}). La medición se realizó entre las 12:30 y 14:30 horas, momento en el cual existe el máximo déficit diario de agua. Se utilizaron hojas sombrías, maduras y cercanas al tronco de la planta, las cuales fueron cubiertas con bolsas plásticas recubiertas de papel aluminio por un periodo de 90 minutos. Posteriormente, se retiró la hoja de la planta y, sin retirar la hoja de la bolsa, se midió el Ψ_{hx} (MPa). Para esto se utilizó la cámara de presión tipo Scholander, modelo Pump-up (PMS Instrument Company, Oregon, EE.UU.). Las mediciones se realizaron en una hoja por planta ($n = 4$ por cada unidad experimental), en todas las plantas del ensayo, tres veces por semana.

Conductancia estomática (Ce). Se midió con un porómetro foliar, modelo SC-1 (Decagon Devices, Pullman, WA, EE.UU.), en unidades de $\text{mmol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$. Se realizaron tres mediciones por planta, en todas las plantas del ensayo, en hoja expuestas al sol de mediodía. Las mediciones se realizaron tres veces por semana, hasta antes de enero, y una vez por semana después de éste.

Temperatura foliar. Se evaluó con un termómetro infrarrojo (VWR, Taiwán). Se evaluaron 3 hojas expuestas al sol por planta, que tuvieran una inclinación y exposición al sol similar, en todas las plantas del ensayo. La medición se realizó previa a la determinación del potencial hídrico xilemático. Las mediciones se realizaron tres veces por semana en todo el período del ensayo.

Temperatura ambiental, humedad relativa y déficit de presión de vapor (DPV). La temperatura del aire ($^{\circ}\text{C}$) y la humedad relativa (HR) (%) se obtuvieron mediante un higrómetro digital (modelo AZ 8701; AZ Instrument Corp, Tai-chung, Taiwán) ubicado a la sombra, a 1 m de altura sobre el follaje de la vid. Estas mediciones se realizaron en forma simultánea a la determinación del Ψ_{hx} . Con el valor de temperatura del aire se determinó la presión de vapor a saturación (e_s), a través de la ecuación de Murray (1967).

$$e_s(T) = 0,611 \exp \left[\frac{17,27 T}{T + 237,3} \right]$$

(Murray, 1967)

Donde:

T = Temperatura del aire ($^{\circ}\text{C}$)

e_s = Presión de vapor a saturación (kPa)

A partir de ello se determinó la presión parcial de vapor del aire (e) a través de la relación $\text{HR} = e/e_s$, mediante los datos colectados y calculados de humedad relativa y e_s . Finalmente, se obtuvo el DPV (kPa), por diferencia de $e_s - e$.

Parámetros productivos

Fecha de cosecha. Se registró la fecha de cosecha y producción (masa de racimos) de cada "floreo", utilizando el color de baya como parámetro de cosecha.

Rendimiento y calidad. Se evaluó el peso de cada racimo por planta. Para evaluar calidad se determinó el calibre (5 bayas por racimo) y sólidos solubles (3 bayas por racimo) mediante un refractómetro. Se midió el peso de racimos rechazados por no cumplir la norma de exportación.

Parámetros vegetativos. Al final de la temporada se pesó la poda de cada planta.

Contenido de agua del suelo

Contenido volumétrico de agua. A través de todo el período de duración del ensayo se registró a diario el contenido volumétrico de agua del suelo sobre la hilera, utilizando la sonda FDR Diviner 2000 Sensor II (Sentek Pty Ltd., Australia). Se consideró el contenido de agua promedio entre los 10 y 60 cm de profundidad de suelo, debido a que fue el rango de profundidad que presentó la mayor variación temporal y espacial y donde, probablemente, las raíces absorbían agua más activamente.

Para esto, se instalaron tubos de PVC de dos pulgadas de diámetro y 1 m de largo, en cada uno de los tratamientos, y a 40 cm del tronco de la planta.

La medición se realizó cercana a las 16:00 horas, después de que las plantas ya han sufrido el momento máximo de estrés diario y han absorbido la mayor parte del agua del suelo que consumen diariamente.

Al final del período de evaluación se realizó la calibración de los datos entregados por el DIVINER. Para ello, en sitios previamente seleccionados, e inmediatamente después de registrar los datos con el equipo, se emuló la forma de medición de la sonda mediante la extracción de muestras de suelo en distintas condiciones de humedad hasta los 50 cm de profundidad. A estas muestras se les evaluó, en laboratorio, su contenido volumétrico de agua, permitiendo construir la curva de calibración con la que se corrigió los datos de contenido de agua del suelo registrado por el equipo en cada uno de los tratamientos durante la temporada.

Eventos de riego. Se registraron las fechas y duración de cada riego en cada uno de los tratamientos.

Evaluaciones complementarias

Evolución diaria de variables fisiológicas. Se seleccionó en poscosecha un grupo de 5 plantas independientes al ensayo, las que fueron equivalentes en manejo al tratamiento T3 (testigo de campo) y representativas de las condiciones generales del cuartel (plantas homogéneas en cuanto a su desarrollo y estado fitosanitario), a las cuales se les evaluó durante un día las siguientes propiedades:

La C_e y la temperatura foliar, entre las 8:00 y las 19:00 horas, cada una hora. Se realizaron cinco mediciones por planta, en hojas completamente expuestas al sol.

El Ψ_{h_x} , desde las 08:00 a 20:00 horas, a intervalos de dos horas. Se realizaron tres mediciones por planta, en hojas maduras bajo sombra.

Además se registró la humedad relativa (%) y la temperatura ambiente ($^{\circ}\text{C}$) y se calculó el DPV durante el día.

Tiempo de cobertura de hoja para medir el Ψ_{h_x} . Se evaluó en una planta, a mediodía, el tiempo mínimo (min) que debe permanecer la hoja cubierta con la bolsa de aluminio en la planta para realizar la medición del Ψ_{h_x} . Para ello se cubrieron hojas con bolsas de aluminio por distintos tiempos: 5; 10; 20; 30; 40; 50; 65; 80 y 90 min. Para cada tiempo se utilizaron cuatro hojas maduras de los cuatro extremos de la planta, siempre ubicadas a la sombra y cercanas al tronco.

También, en la misma planta, se evaluó el tiempo de espera entre que la hoja es retirada de la planta y la medición del Ψ_{h_x} . Para ello se cubrieron hojas con bolsa de aluminio, y después de ser cortadas, se midió luego de 0,5; 1; 2; 3; 5; 7 y 10 min. Se utilizaron cuatro hojas maduras de los cuatro extremos de la planta para cada tiempo, siempre ubicadas a la sombra y cercanas al tronco.

Análisis estadístico

Los resultados se describieron mediante promedios y desviación estándar.

Previo a someter los datos a un análisis de varianza (ANDEVA), se verificaron los supuestos del análisis de varianza sobre los términos de error. En los casos donde estos supuestos no se cumplieron, se probó la transformación de las variables originales. Si finalmente los supuestos no se cumplieron, se realizó la prueba no paramétrica para diseños en bloque completamente aleatorizados de Friedman. Se realizó análisis de varianza, usando un nivel de significación del 5%. Las comparaciones entre medias se realizaron con la prueba de comparación múltiple de Tukey.

Adicionalmente, se realizó análisis de correlación y regresión entre variables de interés.

Para los análisis estadísticos se utilizaron los programas computacionales MINITAB TM 15 y Sigma Plot 11.0.

RESULTADOS

A pesar que T1 y T2 recibieron un 22% y 54% menos agua que T3 entre baya de 6 mm y cosecha, respectivamente, la conductancia estomática (C_e) y la temperatura foliar no mostró diferencias significativas entre los tratamientos (Figura 1), sin embargo, la C_e de las plantas regadas en alta frecuencia (T3) tendió a valores mayores que las plantas regadas en baja frecuencia (T1 y T2) (Figura 1a), diferencia que se acentuó con el T2, con diferencias significativas en algunas fechas; los tratamientos T1 y T2 no presentaron diferencias entre sí.

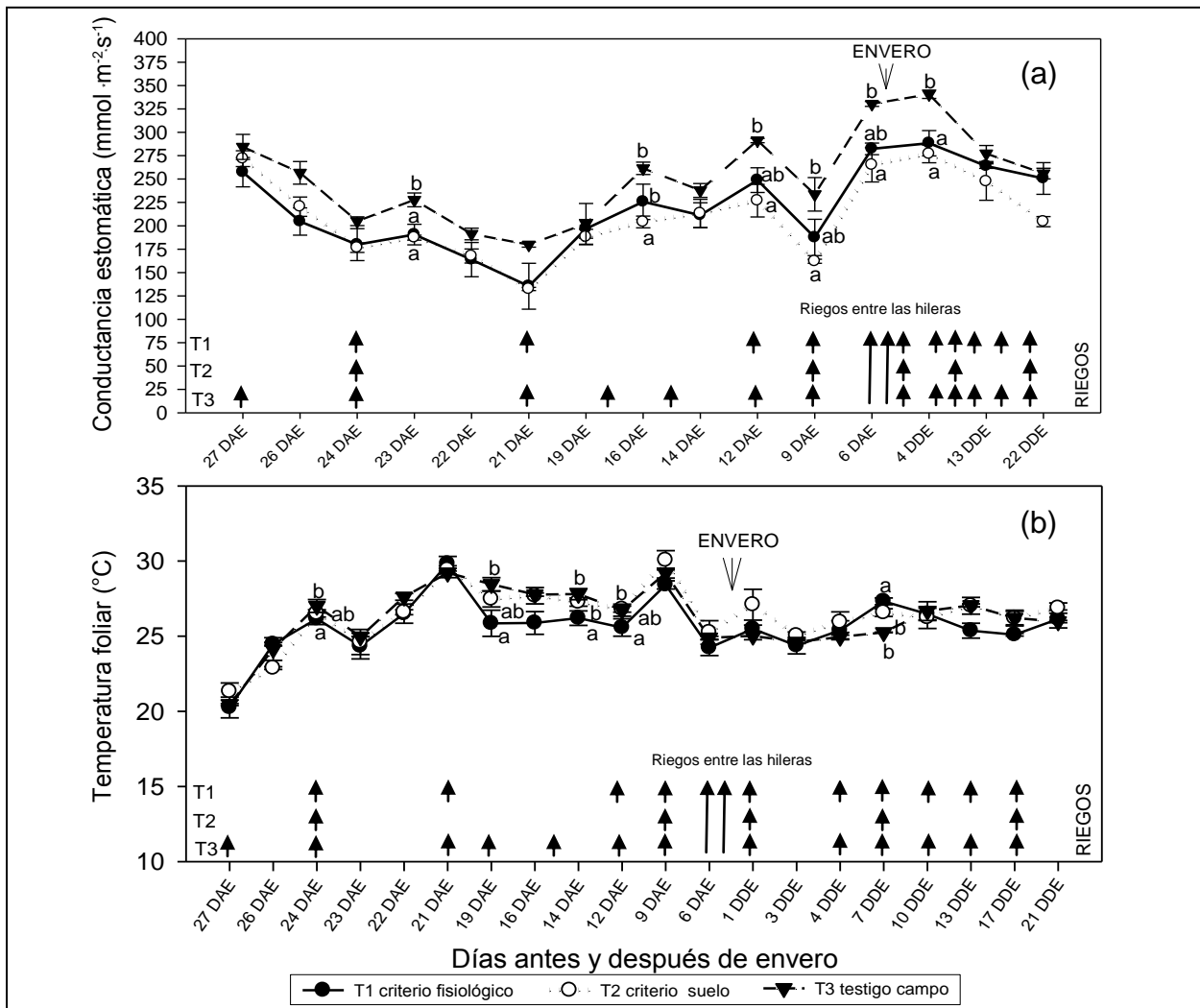


Figura 1. (a) Conductancia estomática y (b) temperatura foliar, para distintos tratamientos de riego. Letras distintas indican diferencias estadísticamente significativas entre tratamientos para la misma fecha ($p \leq 0,05$). Las barras corresponden al error estándar. Flecha corta indica riego sobre la hilera. Flecha larga indica riego entre las hileras.

Durante todo el tiempo de evaluación la temperatura foliar de los tratamientos estuvo por debajo de la temperatura ambiental (Figura 2), donde la menor diferencia diaria se presentó en el T1, con alrededor de 4 °C, siete días después de envero.

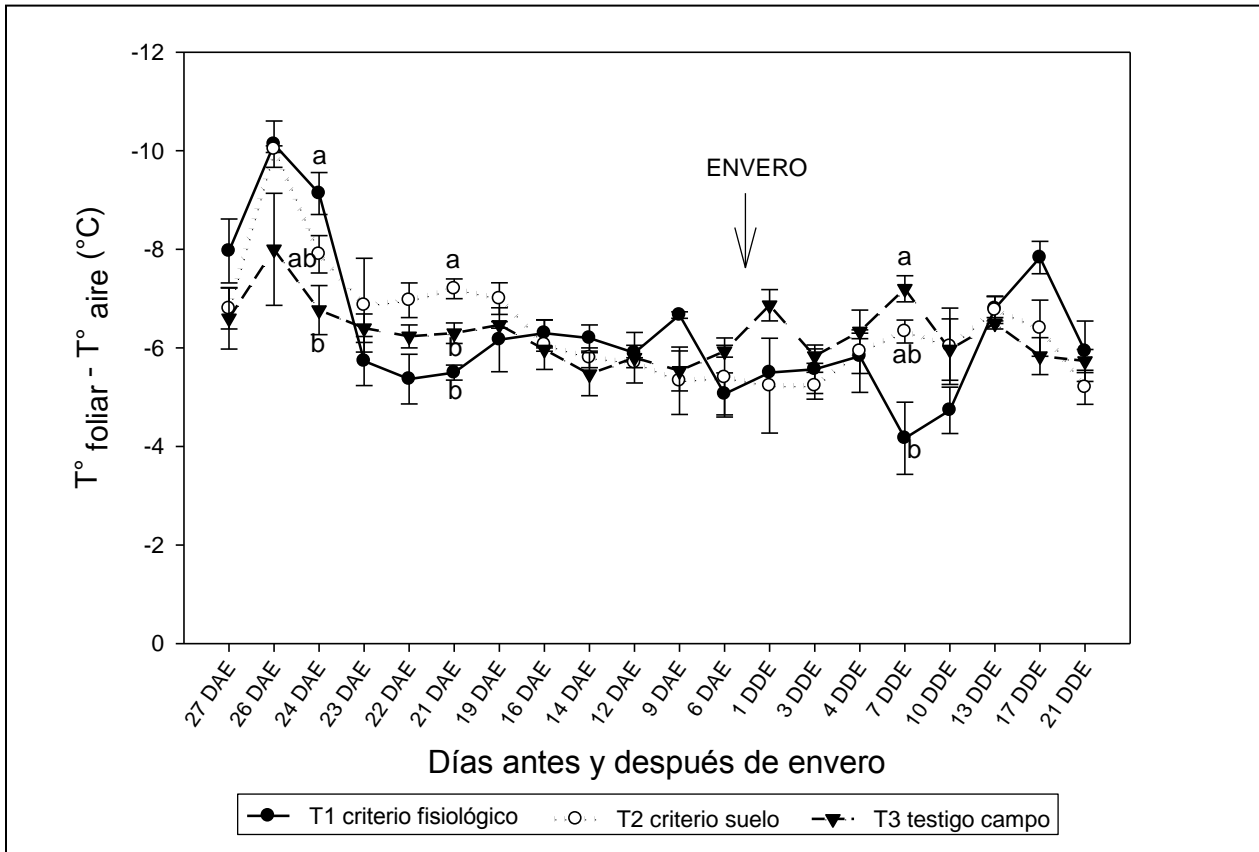


Figura 2. Diferencia entre la temperatura foliar y la temperatura del aire durante la temporada en cada uno de los tratamientos de riego. Letras distintas indican diferencias estadísticamente significativas entre tratamientos para la misma fecha ($p \leq 0,05$). Las barras corresponden al error estándar.

El potencial hídrico xilemático (Ψ_{hx}) de las plantas del T3 fue significativamente mayor a las del T1 y T2 (Figura 3), tratamientos que presentaron valores similares entre sí; sin embargo, a lo largo de la temporada su orden cambió. Al inicio de las mediciones, T1 presentó menor Ψ_{hx} , mientras que al final de la temporada T2 mostró menor Ψ_{hx} . Al contrastar los valores del ensayo con los umbrales de Ψ_{hx} utilizados como indicadores de estrés hídrico (Ferreyra *et al.*, 2006; Gálvez, 2011) (Figura 3), se aprecia que, según el umbral de riego propuesto por Ferreyra *et al.* (2006), las plantas de los tratamientos no sufrieron estrés hídrico en la mayor parte del tiempo de evaluación, sin embargo, si se usa el criterio de riego propuesto por Gálvez (2011), el tratamiento T1 estuvo estresado la mayor parte del tiempo y sólo al final del estudio estuvo cercano a un óptimo de hidratación; T2, por su parte, permaneció bien hidratado sólo al inicio de las

mediciones, para luego incrementar gradualmente su grado de estrés hídrico; el tratamiento T3 no experimentó estrés hídrico.

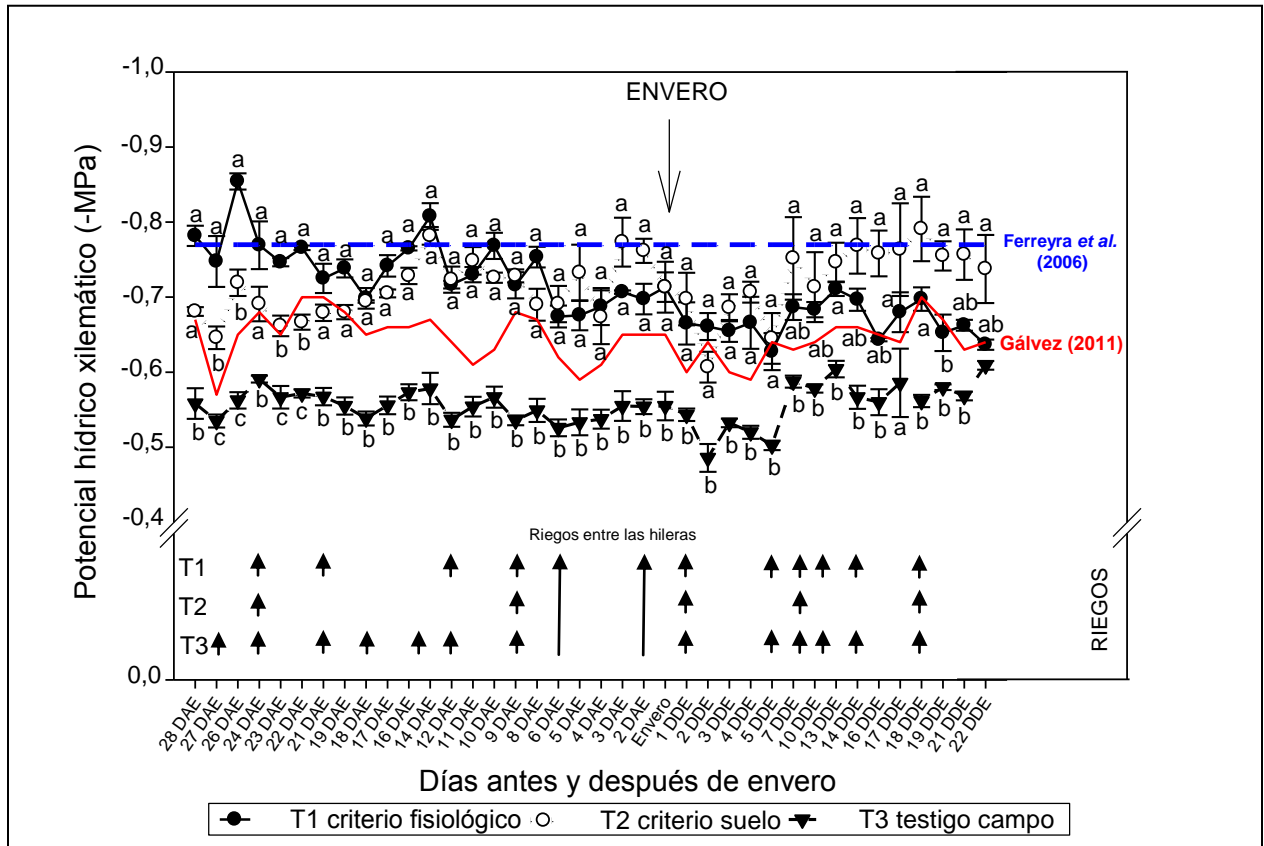


Figura 3. Potencial hídrico xilemático (Ψ_x) durante la temporada en cada uno de los tratamientos de riego y su comparación con los umbrales de riego propuestos por Ferreyra *et al.* (2006) y Gálvez (2011). Letras distintas indican diferencias estadísticamente significativas entre tratamientos para la misma fecha ($p \leq 0,05$). Las barras corresponden al error estándar. Flecha corta indica riego sobre la hilera. Flecha larga indica riego entre las hileras.

La relación entre el Ψ_x y el contenido de agua del suelo sólo fue significativa en T1 (Cuadro 1), mientras que, en general, esta variable fisiológica no se correlacionó bien con los otros parámetros evaluados, aunque fue un buen discriminador de los tratamientos (Figura 3). El DPV presentó una fuerte relación con las tres variables fisiológicas medidas, excepto con el Ψ_x de las plantas de T2. La temperatura foliar y la Ce presentaron una relación significativa en todos los tratamientos (Cuadro 1), lo que denota la fuerte dependencia de la Ce con las condiciones ambientales diarias de temperatura.

Cuadro 1. Grado de asociación entre las variables fisiológicas medidas durante el ensayo en cada uno de los tratamientos de riego.

Coeficiente de Correlación				
T1	Ce	T° f	Contenido de agua del suelo	DPV
Ψ_{h_x} (MPa)	0,48 ^{ns}	0,02 ^{ns}	0,66**	-0,49**
Ce (mmol m ⁻² s ⁻¹)	---	-0,61*	0,22 ^{ns}	-0,85**
T° f (°C)	---	---	0,43 ^{ns}	0,59**
T2				
Ψ_{h_x} (MPa)	-0,09 ^{ns}	-0,37 ^{ns}	-0,05 ^{ns}	-0,25 ^{ns}
Ce (mmol m ⁻² s ⁻¹)	---	-0,62*	-0,02 ^{ns}	-0,84**
T° f (°C)	---	---	0,37 ^{ns}	0,64**
T3				
Ψ_{h_x} (MPa)	0,48 ^{ns}	-0,34 ^{ns}	-0,03 ^{ns}	-0,62**
Ce (mmol m ⁻² s ⁻¹)	---	-0,55*	0,54*	-0,82**
T° f (°C)	---	---	-0,03 ^{ns}	0,78**

ns, *, **: correlación no significativa ($p \geq 0,05$), significativa ($p \leq 0,05$) o muy significativa ($p \leq 0,01$), respectivamente.
 Ce: Conductancia estomática; T°f: Temperatura foliar; Ψ_{h_x} : Potencial hídrico xilemático; DPV: déficit de presión de vapor.
 T1=criterio fisiológico; T2= criterio suelo; T3= testigo campo.

Respecto de la evolución diaria que tuvieron las variables fisiológicas en un día asoleado, con alta temperatura y baja humedad relativa, y su relación con algunos parámetros ambientales (Apéndice I), se observa que el déficit de presión de vapor (DPV) ejerce una gran influencia sobre el Ψ_{h_x} y, en menor medida, sobre la Ce y la temperatura foliar. El mayor DPV de la atmósfera se alcanzó a las 14:00 horas, momento en el que el Ψ_{h_x} y la Ce alcanzaron su menor valor, mientras que la temperatura foliar alcanzó su mayor nivel.

Al evaluar la metodología de medición del Ψ_{h_x} , se apreció que el equilibrio de las cuatro hojas maduras ubicadas en cuatro extremos de una misma planta se alcanzó a los 90 min, con un valor de coeficiente de variación de un 1% (datos no mostrados). Una vez cortada la hoja, los valores se vuelven variables al aumentar el tiempo de espera, aumentando hasta un 8% de variación (datos no mostrados). Por otra parte, los valores de Ψ_{h_x} de un grupo de cinco plantas fueron más estables que la Ce y la temperatura foliar, alcanzado entre un 1-5 % de dispersión (datos no mostrados), indicando que el Ψ_{h_x} de una planta es representativo de un conjunto de plantas bajo un mismo manejo.

La producción total de fruta en las plantas bajo riego frecuente (T3) fue estadísticamente mayor a la de las plantas con menor frecuencia de riego (T1 y T2), las que no presentaron diferencias entre sí (Figura 4a). Sin embargo, una parte importante de la fruta del T3 fue de descarte, principalmente por falta de desarrollo de color en los racimos, y en menor grado por la deformación de éstos, lo que implicó una reducción significativa de la producción comercial de este tratamiento, respecto de T1 y T2. Adicionalmente, la cosecha de fruta del tratamiento bajo riego frecuente (T3) se vio retrasada en una semana; así, el porcentaje de fruta cosechada en la primera fecha en T1 y T2 fue de 95 y 77%, respectivamente, mientras que para el tratamiento T3 sólo fue de 14%. En la segunda fecha se terminó de cosechar la totalidad de la fruta para todos los tratamientos (Figura 4b).

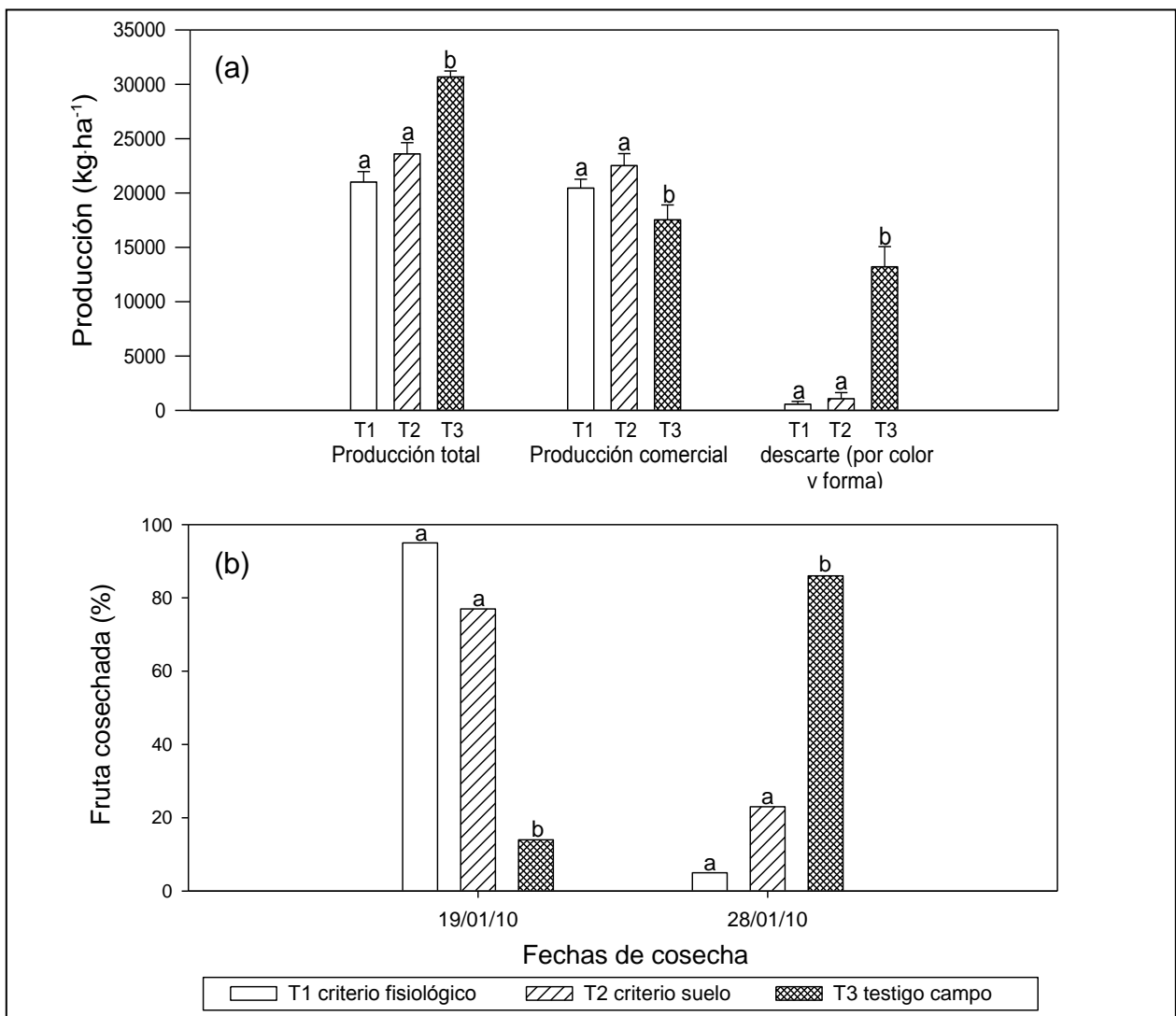


Figura 4. (a) Producción total, comercial y descarte de fruta (kg·ha⁻¹) y (b) porcentaje de fruta cosechada en dos floreos realizados, en distintos tratamientos de riego. Letras distintas indican diferencias estadísticamente significativas entre tratamientos ($p \leq 0,05$).

En relación al peso de poda, éste no fue estadísticamente distinto entre los tratamientos, aunque T3 tendió a presentar mayor crecimiento en la temporada (Cuadro 2). Respecto de la calidad de la fruta, el calibre de baya fue menor para T1 y mayor para T3, mientras que los sólidos solubles no presentaron diferencias significativas entre los tratamientos (Cuadro 2). Ambos parámetros de calidad estuvieron dentro de niveles comerciales adecuados en todos los tratamientos.

Cuadro 2. Cantidad de agua utilizada en el ensayo, peso de poda, calibre de baya y sólidos solubles al momento de la cosecha, para cada uno de los criterios de riego. Cada valor corresponde al promedio \pm el error estándar.

Tratamiento	Agua utilizada ($\text{m}^3 \cdot \text{ha}^{-1}$)	Peso de poda (kg/planta)	Calibre de baya (mm)	Sólidos solubles (°Brix)
T1	4.552	1,2 \pm 0,1 a	23,2 \pm 0,10 a	19,2 \pm 0,36 a
T2	2.703	1,3 \pm 0,2 a	23,7 \pm 0,13 b	18,5 \pm 0,18 a
T3	5.833	2,0 \pm 0,7 a	24,2 \pm 0,19 c	19,1 \pm 0,55 a

* Letras distintas en sentido vertical indican diferencias estadísticamente significativas entre tratamientos ($p \leq 0,05$) según el test de Tukey. T1=criterio fisiológico; T2= criterio suelo; T3= testigo campo.

La eficiencia del uso del agua de riego fue superior en T2 y similar entre los otros dos tratamientos (Cuadro 3). A pesar de esto último, cabe recordar que la producción de fruta exportable del tratamiento T1 fue superior a la de T3 (Figura 4a), por lo que la EUAr de este último tratamiento cae fuertemente si se considera sólo la producción exportable (Cuadro 3).

Cuadro 3. Eficiencia del uso del agua de riego (EUAr) para distintos tratamientos de riego, expresado en $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ de producción total y exportable.

Tratamiento	Producción total ($\text{kg} \cdot \text{ha}^{-1}$)	Agua utilizada ($\text{m}^3 \cdot \text{ha}^{-1}$)	EUAr prod. total ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	EUAr prod. exportable ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)
T1	20.997	4.552	4,6	4,5
T2	23.589	2.703	8,7	8,3
T3	30.663	5.833	5,3	3,0

T1=criterio fisiológico; T2= criterio suelo; T3= testigo campo.

DISCUSIÓN

Diversos estudios indican que el déficit de aplicación de agua impacta los parámetros vegetativos y variables fisiológicas de la vid; principalmente sobre el rendimiento y el grado de estrés, evaluado a través del Ψ_{hx} , la C_e y la temperatura foliar. Sin embargo, pocos han evaluado, a nivel de campo, métodos prácticos para aumentar la EUAr, manteniendo la calidad de la producción de uva de mesa.

Los distintos criterios de riego no generaron diferencias en la C_e de los distintos tratamientos (Figura 1a), por lo que la cantidad de agua aplicada a las plantas de vid con el control del riego según el Ψ_{hx} (T1) y un consumo del 30% de la humedad aprovechable del suelo (T2) fue suficiente para mantener una apertura estomática similar a la de plantas regadas en alta frecuencia (T3). Sin embargo, durante todo el tiempo de medición, T3 tendió a una mayor apertura estomática (Figura 1). Así, la disponibilidad de agua en el suelo fue un factor que afectó el funcionamiento estomático de las plantas del T1 y T2, lo que concuerda con lo señalado por Cifré *et al.* (2005) y Intrigliolo y Castel (2009) y coincide con los resultados de De Souza *et al.* (2005), El-Ansary y Okamoto (2008) y Intrigliolo y Castel (2009), en vides, al aplicar una menor cantidad de agua al suelo. A pesar de esto, la C_e fue similar a la de plantas de vid regadas bajo un criterio de reposición de agua al suelo que satisfacía el 100% de la ET_c (El-Ansary y Okamoto, 2008; Gálvez, 2011; Gómez del Campo *et al.*, 2007; Intrigliolo y Castel, 2009; Navarrete, 2006). De acuerdo a lo señalado por Cifré *et al.* (2005), los valores de C_e registrados en esta investigación indicaron que los tratamientos no sufrieron estrés hídrico que afectara la actividad fisiológica de la planta.

Aunque el mecanismo de regulación de la apertura estomática está relacionado con la disponibilidad de agua en el suelo (Davies *et al.*, 2002; Patakas *et al.*, 2005; Stoll *et al.*, 2000), no es el único factor que influye sobre la C_e . De acuerdo a lo observado en este estudio (Cuadro 1), la C_e presentó relaciones significativas con la temperatura foliar y el DPV, por lo que la planta ajustó la apertura de los estomas según las condiciones climáticas y el contenido de agua del suelo en un día particular, lo que se corrobora al observar el comportamiento estomático a través del tiempo de medición y su respuesta frente al riego (Figura 1a).

La temperatura foliar se comportó de igual forma en todos los tratamientos (Figura 1b) y su valor no superó la temperatura ambiental (Figura 2), fenómeno que ha sido observado en plantas con buen suministro hídrico (Taiz y Zeiger, 2007) e indica, de acuerdo a Jackson *et al.* (1977), que las plantas del estudio no sufrieron estrés hídrico, ya que la diferencia entre la temperatura foliar y la ambiental nunca fue positiva. Esto concuerda con lo observado por Gálvez (2011) en vid de mesa 'Red Globe' y López (2005) en vid de mesa 'Crimson Seedless' donde, al utilizar la metodología de Jackson *et al.* (1977), determinaron que no se generó estrés hídrico al reducir la cantidad de agua aplicada al suelo.

Los criterios de riego aplicados causaron diferencias en el Ψ_{hx} (Figura 3), donde el tratamiento con régimen de riego en alta frecuencia y mayor disponibilidad de agua en

el suelo (T3) mostró valores de Ψ_{hx} significativamente mayores (entre -0,48 a -0,60 MPa) a los de los tratamientos con menor frecuencia de riego (T1 y T2), los que tuvieron valores de Ψ_{hx} similares entre sí (entre -0,60 a -0,85 MPa). Los Ψ_{hx} en T1 y T2 fueron más negativos que los encontrados en la literatura para vides bajo una condición hídrica óptima (Gálvez, 2011; Patakas *et al.*, 2005; Williams y Trout, 2005; Williams y Baeza, 2007), coincidiendo con los obtenidos por Ferreyra *et al.* (2006) en plantas de vid 'Crimson Seedless' regadas con un criterio de riego que satisfacía el 100% de la ET_c .

La capacidad de detectar cambios progresivos en el estado hídrico, anticipando cualquier respuesta de estrés, como el cierre estomático, es una característica útil para cualquier indicador de estrés hídrico basado en la planta (McCutchan y Schackel, 1992). Al respecto, el Ψ_{hx} reflejó, significativamente, el efecto de las distintas cantidades de agua suministradas a los tratamientos durante el ensayo (Figura 3), situación que no fue advertida con la C_e y la temperatura foliar (Figura 1). Esto indica que el Ψ_{hx} es una variable sensible a la disponibilidad de agua para la planta y, por lo tanto, es una buena herramienta para el control del riego en vid, lo que concuerda con lo observado por Acevedo-Opazo *et al.* (2010), Choné *et al.* (2001), Ferreyra *et al.* (2006), Patakas *et al.* (2005) y Williams y Trout (2005).

Adicionalmente, la metodología de medición del Ψ_{hx} es fácil de implementar en campo y la muestra utilizada es representativa del resto de la planta, en contraste con lo observado para la C_e y temperatura foliar (datos no mostrados). Estos factores han sido señalados en la literatura como excluyentes para la selección de una variable indicadora del estado hídrico de la planta y su posible uso para fines de control del riego (Jones, 2004; López, 2005).

Aunque, de acuerdo a Gálvez (2011), las vides de los tratamientos con menor aporte hídrico (T1 y T2) sufrieron estrés la mayor parte del tiempo (Figura 3) y redujeron su producción total (Figura 4a), éstas fueron capaces de producir una mayor cantidad de fruta comercial, con una calidad de fruta y un desarrollo vegetativo similar a la de plantas regadas en alta frecuencia (T3) (Cuadro 2), indicando que las plantas de estos tratamientos no experimentaron un déficit hídrico severo (Lovisolo y Schubert, 1998). Es decir, el valor de Ψ_{hx} umbral propuesto por Ferreyra *et al.* (2006), podría ser un buen indicador del estado hídrico de las plantas de vid con fines de control del riego, situación que debe ser validada en otras condiciones edafoclimáticas. También es posible que las plantas de vid de este estudio puedan alcanzar menores valores de Ψ_{hx} sin sufrir estrés hídrico, lo que indicaría que esta variedad posee mecanismos que le permiten adaptarse a una menor disponibilidad de agua en el suelo (Tyree y Sperry, 1989). El umbral de riego basado en el consumo del 30% de la humedad aprovechable aseguró una cantidad de agua en el suelo suficiente para mantener a la planta con su metabolismo en normal funcionamiento, reflejado en el comportamiento fisiológico (figuras 1; 2 y 3), y asegurando su producción (Figura 4a). La principal razón de la merma en la calidad de la producción de los tratamientos T1 y T2 se podría deber a la reducción del calibre de baya producto del menor aporte hídrico en estos tratamientos, coincidiendo con lo observado por El-Ansary y Okamoto (2008) en vid de mesa

'Moscatel de Alejandría'. Sin embargo, el calibre de baya estuvo dentro de rangos comerciales.

La cosecha de fruta en los tratamientos con menor aporte hídrico (T1 y T2) se realizó nueve días antes que el tratamiento regado en alta frecuencia (T3) (Figura 4b), debido a que las bayas de estos tratamientos alcanzaron antes el color mínimo para su cosecha, por lo que el menor suministro hídrico de T1 y T2 aceleró la maduración (Castellarin *et al.*, 2007), concordando con los resultados de Gálvez (2011). El adelantamiento de la cosecha impacta de manera importante sobre el precio, ya que la fruta cosechada una semana antes tiene US\$ 3 - 4 más por caja embalada (datos del productor).

La cantidad de agua aplicada a T1 y T2 durante la temporada y los resultados de producción de fruta comercial (Cuadro 3) se tradujeron en un aumento en la eficiencia de uso del agua del riego (EUAr) en estos tratamientos, en comparación con T3. Los resultados productivos obtenidos con el criterio de riego basado en Ψ_{h_x} (T1) y el consumo del 30% de la humedad aprovechable del suelo (T2) indican que éstos son posibles herramientas para enfrentar la escasez hídrica que sufre la Región de Atacama, donde los sistemas de producción de vid de mesa son altamente ineficientes respecto del uso del agua de riego (Gálvez, 2011), y ratifican el planteamiento que una buena producción de vid de mesa se puede lograr con el uso de alrededor de $5.500 \text{ m}^3 \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{año}^{-1}$ (Ferreira *et al.*, 2006; Gálvez, 2011; Winkler, 1965).

Los resultados de esta investigación indican que es posible aumentar la eficiencia de uso del agua utilizando nuevas tecnologías para el control del riego, basadas en el estado hídrico de la planta y el estado hídrico del suelo, sin mermar la producción comercial de fruta. Los resultados confirman que el Ψ_{h_x} guarda estrecha relación con el DPV (Cuadro 1 y Apéndice I), tal como lo han observado otros autores (Gálvez, 2011; López, 2005; McCutchan y Schackel, 1992; Williams y Baeza, 2007) y, por lo tanto, es importante considerar esta relación para un uso correcto del Ψ_{h_x} como indicador del estado hídrico de la planta de vid, y el correcto manejo del agua de riego. Al igual que el Ψ_{h_x} evaluado con la cámara de presión, el uso de sondas capacitivas permite integrar factores como la absorción de agua por parte de las raíces (Mounzer *et al.*, 2008), las condiciones climáticas y las características del suelo, permitiendo ambas evaluar la demanda de agua de la vid. Aunque, en esta investigación, se logró aumentar la eficiencia de uso del agua de riego a través de la determinación de la frecuencia de riego, existe la posibilidad de alcanzar aún mayor eficiencia definiendo el tiempo de riego con la ayuda de sondas capacitivas, identificando el momento exacto en que el suelo alcanza su mayor capacidad de almacenar agua.

Finalmente, queda por evaluar el comportamiento de las vides, rendimiento y calidad, usando el criterio de Gálvez (2011) durante toda la etapa de desarrollo de las plantas y verificar el nivel de eficiencia para el manejo del riego de parronales.

CONCLUSIONES

Los resultados de aplicar distintos criterios de riego aplicados en vides 'Red Globe', en un clima árido con alta evapotranspiración, permiten concluir que:

- Los criterios de riego basados en el Ψ_{h_x} y el consumo del 30% de la humedad aprovechable del suelo permitieron un ahorro de agua de riego, aumentando así la eficiencia de uso de este elemento, sin afectar la cantidad y calidad de fruta para exportación.
- El déficit hídrico aceleró la maduración, incrementando el color de cubrimiento de la baya.
- El potencial hídrico xilemático fue la variable fisiológica que reflejó de mejor forma la disponibilidad de agua del suelo.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Acevedo-Opazo, C., S. Ortega-Farías and S. Fuentes. 2010. Effects of grapevine (*Vitis vinifera* L.) water status on water consumption, vegetative growth and grape quality: an irrigation scheduling application to achieve regulated deficit irrigation. *Agricultural Water Management* 97 (7): 956-964.
- Castellarin, S., M. Matthews, G. Di Gaspero and G. Gambetta. 2007. Water deficits accelerate ripening and induce changes in gene expression regulating flavonoid biosynthesis in grape berries. *Planta* 227 (1): 101-112.
- Cifré, J., J. Bota, J.M. Escalona, H. Medrano and J. Flexas. 2005. Physiological tools for irrigation scheduling in grapevine (*Vitis vinifera* L.): An open gate to improve water-use efficiency? *Agriculture, Ecosystems and Environment* 106 (2-3): 159-170.
- Centro de Información Recursos Naturales (CIREN). 2007. Estudio agrológico Valle de Copiapó y Valle del Huasco III Región. Publicación CIREN N° 135. 145 p.
- Choné, X., C. Van Leeuwen, D. Dubourdieu and J.P. Gaudillere. 2001. Stem water potential is a sensitive indicator of Grapevine water status. *Annals of Botany* 87 (4): 477-483.
- Davies, W.J., S. Wilkinson and B. Loveys. 2002. Stomatal control by chemical signaling and the exploitation of this mechanism to increase water use efficiency in agriculture. *New Phytologist* 153 (3): 449-460.
- De Souza, C.R., J.P. Maroco, T.P. Dos Santos, M.L. Rodrigues, C. Lopes, J.S. Pereira and M.M. Chaves. 2005. Control of stomatal aperture and carbon uptake by deficit irrigation in two grapevine cultivars. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 106 (2-3): 261-274.
- De Oliveira, A.S., R. Trezza, I.A. Holzapfel, I. Lorite and V.P. Paz. 2009. Irrigation water management in Latin America. *Chilean Journal of Agricultural Research* 69 (1): 7-16.
- Doltra, J., J.A. Oncins, J. Bonany and M. Cohen. 2007. Evaluation of plant-based water status indicators in mature apple trees under field conditions. *Irrigation Science* 25 (4): 351-359.
- El-Ansary, D.O. and G. Okamoto. 2008. Improving table grape quality with less irrigation water in Japan: partial root-zone drying versus regulated deficit. *Acta Horticulturae* 792: 265-271.
- Fereres, E., D. Goldhamer, M. Cohen, J. Girona and M. Mata. 1999. Continuous trunk diameter recording can reveal water stress in peach trees. *California Agriculture* 53 (4): 21-25.

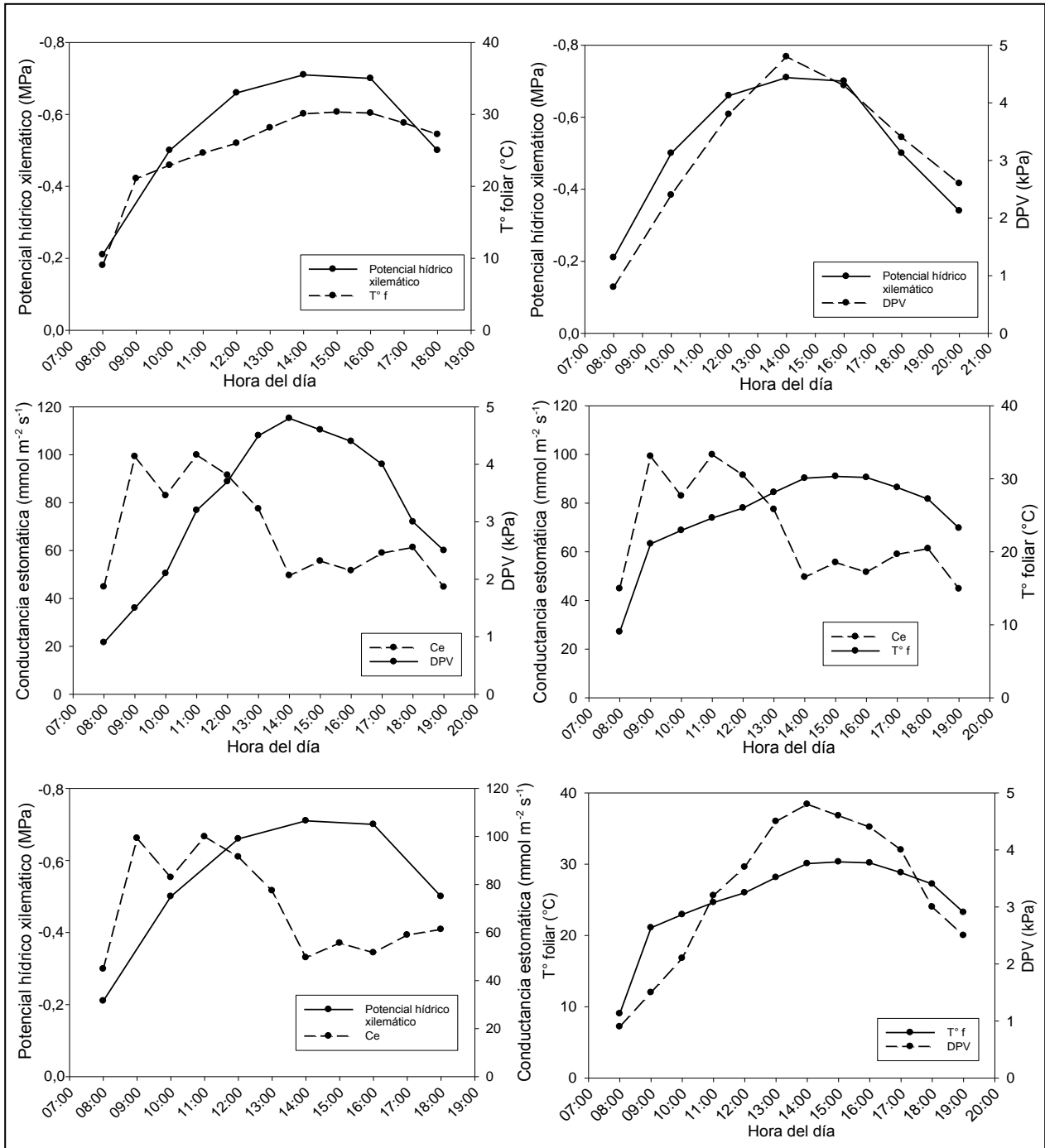
- Ferreyra, R., G. Sellés, H. Silva, R. Ahumada, I. Muñoz and V. Muñoz. 2006. Efecto del agua aplicada en las relaciones hídricas y productividad de la vid 'Crimson Seedless'. *Pesquisa Agropecuária Brasileira* 41 (7): 1109-1118.
- Flexas, J., J. Galmés, A. Gallé, J. Gulías, A. Pou, M. Ribas-Carbo, M. Tomás and H. Medrano. 2010. Improving water use efficiency in grapevines: potential physiological targets for biotechnological improvement. *Australian Journal of Grape and Wine Research* 16 (1): 106-121.
- Gálvez, R. 2011. Evaluación del uso conjunto del potencial hídrico xilemático y el déficit de presión de vapor en el manejo del riego en vides de mesa. Tesis de Magíster. Universidad de Chile. Facultad de Ciencias Agronómicas. Santiago, Chile, 59 p.
- Girona, J., M. Mata, J. del Campo, A. Arbonés, E. Bartra and J. Marsal. 2006. The use of midday leaf water potential for scheduling deficit irrigation in vineyards. *Irrigation Science* 24 (2): 115-127.
- Goldhamer, D.A., M. Salinas, M.S. Anaya and A.M. Elvira. 2001. Peach trees perform similarly despite different irrigation scheduling methods. *California Agriculture* 55 (1): 25-29.
- Gómez del Campo, M., P. Baeza, C. Ruiz, V. Sotés and J.R. Lisarrague. 2007. Effect of previous water conditions on vine response to rewatering. *Vitis* 46 (2): 51-55.
- González-Altozano, P., E.W. Pavel, J.A. Oncins, J. Doltra, M. Cohen, T. Paço, R. Massai and J.R. Castel. 2008. Comparative assessment of five methods of determining sap flow in peach trees. *Agricultural Water Management* 95 (5): 503-515.
- Grimes, D.W. and L.E. Williams. 1990. Irrigation effects on plant water relations and productivity of Thompson Seedless grapevines. *Crop Science* 30 (2): 255-260.
- Intrigliolo, D.S. and J.R. Castel. 2004. Continuous measurement of plant and soil water status for irrigation scheduling in plum. *Irrigation Science* 23 (2): 93-102.
- Intrigliolo, D.S. and J.R. Castel. 2006. Performance of various water stress indicators for prediction of fruit size response to deficit irrigation in Plum. *Agricultural Water Management* 83 (1-2): 173-180.
- Intrigliolo, D.S. and J.R. Castel. 2009. Response of *Vitis vinifera* cv. 'Tempranillo' to partial rootzone drying in the field: water relations, growth, yield and fruit and wine quality. *Agricultural Water Management* 96 (2): 282-292.
- Jackson, R., R. Reginato and B. Idso. 1977. Wheat canopy temperature: A practical tool for evaluating water requirements. *Water Resources* 13 (3): 651-656.
- Jones, H.G. 1999. Use of infrared thermometry for estimation of stomatal conductance as a possible aid to irrigation scheduling. *Agricultural and Forest Meteorology* 95 (3): 139-149.

- Jones, H.G. 2004. Irrigation scheduling: advantages and pitfalls of plant-based methods. *Journal of Experimental Botany* 55 (407): 2427-2436.
- Jones, H.G. 2008. Irrigation scheduling – comparison of soil, plant and atmosphere monitoring approaches. *Acta Horticulturae* 792: 391-403.
- López, V. 2005. Respuestas fisiológicas en uva de mesa cultivar Crimson Seedless sometidas a déficit hídrico. Memoria Ingeniero Agrónomo. Universidad de Chile. Facultad de Ciencias Agronómicas. Santiago, Chile. 64 p.
- Loveys, B.R., J.C. Theobald, H.G. Jones and M.G. McCarthy. 2008. An assessment of plant-based measures of grapevine performance as irrigation scheduling tools. *Acta Horticulturae* 792: 421-427.
- Lovisoló, C. and A. Schubert. 1998. Effects of water stress on vessel size and xylem hydraulic conductivity in *Vitis vinifera* L. *Journal of Experimental Botany* 321 (49): 693-700.
- McCutchan, H. and K.A. Schackel. 1992. Stem-water potential as a sensitive indicator of water stress in prune trees (*Prunus domestica* L. cv. French). *Journal of the American Society for Horticultural Science* 117 (4): 607-611.
- Mounzer, O.H., J. Vera, L.M. Tapia, Y. García-Orellana, W. Conejero, I. Abrisqueta, M.C. Ruiz-Sánchez and J.M. Abrisqueta-García. 2008. Irrigation scheduling of peach trees (*Prunus persica* L.) by continuous measurement of soil water status. *Agrociencia* 42 (8): 857-868.
- Murray, F. 1967. On the computation of saturation vapor pressure. *Journal of Applied Meteorology* 6 (1): 203-204.
- Naor, A., I. Klein, H. Hupert, Y. Grinblat, M. Peres and A. Kaufman. 1999. Water stress and crop level interactions in relation to nectarine yield, fruit size distribution, and water potentials. *Journal of American Society of Horticultural Science* 124 (2): 189-193.
- Naor, A. 2001. Irrigation and crop load influence fruit size and water relations in field-grown 'Spadona' Pear. *Journal of American Society of Horticultural Science* 126 (2): 252-255.
- Naor, A. 2008. Water stress assessment for irrigation scheduling of deciduous trees. *Acta Horticulturae* 792: 467-481.
- Navarrete, P. 2006. Efecto de la disponibilidad de agua del suelo en el comportamiento estomático, fotosíntesis y transpiración en vid de mesa variedad Crimson Seedless. Memoria Ingeniero Agrónomo. Universidad de Chile. Facultad de Ciencias Agronómicas. Santiago, Chile. 29 p.
- Ortuño, M.F., J.J. Alarcón, E. Nicolás and A. Torrecillas. 2004. Comparison of continuously recorded plant-based water stress indicators for young lemon trees. *Plant and Soil* 267 (1-2): 263-270.

- Patakas, A., B. Noitsakis and A. Chouzouri. 2005. Optimization of irrigation water use in grapevines using the relationship between transpiration and plant water status. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 106 (2-3): 253-259.
- Remorini, D. and R. Massai. 2003. Comparison of water status indicators for young peach trees. *Irrigation Science* 22 (1): 39-46.
- Serrano, L., C. González-Flor and G. Gorchs. 2010. Assessing vineyard water status using the reflectance based water index. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 139 (4): 490-499.
- Shackel, K.A., B. Lampinen, S. Southwick, W. Olson, S. Sibbett, W. Krueger, J. Yeager and D. Goldhamer. 2000. Deficit irrigation in *Prunus*: Maintaining productivity with less water. *HortScience* 35 (6): 1063-1066.
- Sousa, T.A., M.T. Oliveira and J.M. Pereira. 2006. Physiological indicators of plant water status of irrigated and non-irrigated grapevines grown in a low rainfall area of Portugal. *Plant and Soil* 282 (1-2): 127-134.
- Stewart, W., A. Fulton, W. Krueger, B. Lampinen and K.A. Shackel. 2011. Regulated deficit irrigation reduces water use of almonds without affecting yield. *California Agriculture* 65 (2): 90-95.
- Stoll, M., B. Loveys, and P. Dry. 2000. Hormonal changes induced by partial root zone drying of irrigated grapevine. *Journal of Experimental Botany* 51 (350): 1627-1634.
- Taiz, L. and E. Zeiger. 2007. *Plant Physiology*. 3^a edición. Ed. Sinauer Associates, Inc. 580 p.
- Tyree, M.T. and S. Sperry. 1989. Vulnerability of xylem to cavitation and embolism. *Annual Review of Plant Physiology and Plant Molecular Biology* 40: 19-38.
- Williams, L.E. and P. Baeza. 2007. Relationships among ambient temperature and vapor pressure deficit and leaf and stem water potentials of fully irrigated, field-grown grapevines. *American Journal of Enology and Viticulture* 58 (2): 173-181.
- Williams, L.E. and T.J. Trout. 2005. Relationship among vine- and soil-based measures of water status in a Thompson seedless vineyard in response to high-frequency drip irrigation. *American Journal of Enology and Viticulture* 56 (4): 357-366.
- Winkler, A. 1965. La poda. pp: 301-361. In: Winkler. *Viticultura*. Compañía Editorial Continental, México D.F., México, 792 p.

APÉNDICE I

Evolución de conductancia estomática, potencial hídrico xilemático, temperatura foliar y déficit de presión de vapor a través del día y la relación entre ellos. Los valores corresponden al promedio de cinco plantas.



CAPÍTULO III. DINÁMICA DEL AGUA Y DETERMINACIÓN DE LA CONDUCTIVIDAD HIDRÁULICA NO SATURADA EN UN SUELO FRANCO SOMETIDO A DIFERENTES FRECUENCIAS DE RIEGO

RESUMEN

Los avances tecnológicos de los últimos años han permitido incrementar los conocimientos acerca de la dinámica del agua en el tiempo y el espacio; sin embargo, existe poca información de cómo distintas frecuencias de riego aplicadas en un mismo suelo pueden afectar el movimiento y la retención de agua, y el efecto que esto pueda tener sobre el uso eficiente del agua que se almacena en el sistema poroso del suelo. De este modo, el objetivo de este estudio fue evaluar el movimiento del agua en el suelo y el desarrollo del sistema radical de plantas de uva de mesa (*Vitis vinifera* L.) regadas según distintos criterios de riego. La determinación del momento de riego en las vides se basó en la utilización del potencial hídrico xilemático (Ψ_{hx}) (T1), consumo del 30% de la humedad aprovechable del suelo (T2) y testigo de campo, con alto volumen de riego cada tres días, equivalente a $1.281 \text{ m}^3 \cdot \text{ha}^{-1}$ semanales (T3). En todos los tratamientos se registró: contenido de agua del suelo, movimiento de ésta en profundidad y en el tiempo, conductividad hidráulica no saturada (K_{ns}) y densidad de raíces. La alta frecuencia de riego aplicada en el ensayo (T3) generó un contenido de agua por sobre la capacidad de campo del suelo, mayor K_{ns} , menor tiempo en alcanzar la saturación del espacio poroso en un evento de riego y menor energía de retención del agua. El tratamiento T2 presentó la situación contraria, debido a su menor frecuencia de riego, mientras que T1 tuvo valores intermedios entre T2 y T3, aunque similares a T2 en algunos casos. Las raíces finas y delgadas no mostraron diferencias significativas entre tratamientos. Se concluye que riegos de alta frecuencia mantienen saturado una mayor proporción del sistema poroso del suelo, aumentando la velocidad de movimiento del agua (K_{ns}), disminuyendo la eficiencia de uso del recurso y aumentando las pérdidas por percolación profunda, mientras que el uso de herramientas de monitoreo para el control de riego permiten usar de forma más eficiente el agua almacenada en el suelo.

Palabras clave: movimiento de agua, raíces, programación de riego.

CHAPTER III. WATER DYNAMICS AND DETERMINATION OF THE UNSATURATED HYDRAULIC CONDUCTIVITY IN A LOAM SOIL SUBMITTED TO DIFFERENT IRRIGATION FREQUENCIES

ABSTRACT

Technological advances have allowed greater knowledge about the water movement in soil, however, there is little information concerning how different irrigation frequencies applied on the same soil can affect the movement and retention of water, besides water use efficiency that is stored in the soil porous system. Thus, the aim of this study was to evaluate the soil water movement and the root system development of table grapes (*Vitis vinifera* L.) irrigated according to different irrigation criteria. Determination of the irrigation frequency in the vines was based on the use of stem water potential (Ψ_{hx}) (T1), 30% consumption of available soil moisture (T2), and field control based on a high volume irrigation each three days, equivalent to $1,281 \text{ m}^3 \cdot \text{ha}^{-1}$ per week (T3). On every treatment, soil water content, water movement in depth and time, unsaturated hydraulic conductivity of soil (K_{ns}) and root density were registered. The high-frequency irrigation applied to table grapes (T3) generated water content above field capacity, higher K_{ns} , less time to reach the saturation of the porous space in an event of irrigation and lower energy of water retention. T2 showed the opposite situation due to its lower irrigation frequency, while T1 had intermediate values between T2 and T3, although similar to T2 in some cases. Fine and thin roots showed no significant differences between treatments. It is concluded that high-frequency irrigation kept saturated a greater proportion of the porous space, increased the speed of water movement (K_{ns}), decreased the efficiency of water use and increased losses by deep percolation, while the use of monitoring tools for irrigation scheduling allowed to increase the efficiency of water use stored in the soil.

Keywords: water movement, roots, irrigation scheduling.

INTRODUCCIÓN

El transporte de agua hacia las raíces de la planta ocurre en la zona no saturada, definida normalmente como zona vadosa, la cual se ubica entre el nivel freático y la superficie del suelo (Dexter, 2004). En esta zona, la fase líquida se encuentra confinada entre las superficies sólidas del suelo y el aire presente en él (Jury *et al.*, 1991), donde la relación entre el contenido de agua y aire determina en gran medida el crecimiento radical (Hillel, 1998; Richards, 1983).

En la zona vadosa, las propiedades conductivas del suelo dependen en gran medida de su textura y estructura (Abrisqueta *et al.*, 2006; Hillel, 1998). La cantidad de agua retenida a valores bajos de succión mátrica depende principalmente del efecto capilar y de la distribución del tamaño de poros, mientras que a valores más altos, la retención de agua se ve influenciada por la adsorción, la cual depende de la textura y la superficie específica del material del suelo (Brady y Weil, 1996; Hillel, 1982). Una de las propiedades hidráulicas del suelo importantes para comprender el movimiento del agua en la zona vadosa es la conductividad hidráulica no saturada (K_{ns}), la que ha sido evaluada en distintos tipos de suelos y con diversos enfoques y metodologías (Abrisqueta *et al.*, 2006; Dirksen, 1999; Jacobsen y Jensen, 1990; Miller *et al.*, 2002).

La dinámica del agua en suelos no saturados es de interés para el estudio de las relaciones suelo-planta, recuperación de suelos y calidad del medioambiente (Gavande, 1972; Hillel, 1982), la que se ve afectada por la prácticas culturales que se implementan a nivel de campo, provocando cambios localizados y patrones de flujo de agua preferencial (Paltineanu y Starr, 2000).

En sistemas de riego por goteo, el movimiento del agua en el suelo y la apertura del bulbo de mojamiento se ve influenciado, entre otros, por la tasa de descarga de los emisores, la distancia entre ellos, el tipo de suelo y la cantidad de agua aplicada en cada evento de riego (Elmaloglou y Diamantopoulos, 2010). Al respecto, uno de los enfoques más utilizados para la determinación de la K_{ns} es el uso de perfiles instantáneos, donde a través de la dinámica del agua en el tiempo y en el espacio y la aplicación del principio de continuidad, se puede llegar a buenas estimaciones de la K_{ns} (Dirksen, 1999). Una herramienta más precisa y de fácil aplicación fue desarrollada por Becher (1970) que conjuga la ley de flujo de Darcy con la de continuidad.

Más allá del impacto del movimiento del agua en el suelo sobre las condiciones ambientales del medio, el riego busca cubrir en forma oportuna y en cantidades adecuadas la necesidad de agua de las plantas, por lo que diversos criterios de frecuencia de reposición de agua al suelo afectarán la K_{ns} y con ello las condiciones de desarrollo del cultivo.

HIPÓTESIS

El criterio de riego genera diferencias en el movimiento del agua del suelo y en el desarrollo del sistema radical de las plantas.

OBJETIVO

Evaluar el movimiento del agua del suelo y el desarrollo del sistema radical de vides de mesa (*Vitis vinífera L.*) Red Globe, bajo distintos criterios de riego.

MATERIALES Y MÉTODO

Materiales

Lugar del estudio

El estudio se realizó en el Fundo San Ignacio (28°55'18.23" S, 70°16'29.04" O, elevación 1.178 msnm), localidad de La Arena, Comuna de Alto del Carmen, Región de Atacama, durante la temporada agrícola 2009-2010.

Los análisis de laboratorio se realizaron en las dependencias del Departamento de Ingeniería y Suelos de la Facultad de Ciencias Agronómicas de la Universidad de Chile.

Material vegetal

Se utilizaron plantas de vid de mesa (*Vitis vinifera* L.) 'Red Globe' en plena producción, de 20 años de edad, conducidas en sistema de parrón español, con una distancia de plantación de 3 x 1,5 m, regadas con doble línea de goteros y una distancia entre goteros de 0,75 m (4 goteros por planta de 4 L·h⁻¹ cada uno).

Suelo

El suelo pertenece a la Serie Chancoquín (CIREN, 2007); de textura franco arcillosa y origen aluvio-coluvial, de pendiente 3%, pedregosidad superficial menor al 2% y clase de capacidad de uso IIs.

Clima

Se caracteriza por ser del tipo árido, donde la evapotranspiración supera las precipitaciones. La vegetación nativa es escasa y dispersa, concentrándose mayormente en quebradas y otros cursos de agua. La temperatura media anual supera los 18° C y las temperaturas diarias presentan fuertes oscilaciones entre el día y la noche (20°C o más). La evapotranspiración potencial es máxima en los meses de diciembre y enero, oscilando entre 7 a 8 mm·día⁻¹, mientras que las precipitaciones son

casi inexistentes, concentrándose en los meses de invierno y alcanzando un valor anual de 30 mm. Las horas de frío anuales corresponden a 360 horas².

Metodología

Diseño experimental

Se seleccionaron plantas homogéneas en cuanto a su desarrollo (diámetro del tronco a 1 m de altura) y estado fitosanitario, además de ser representativas de las condiciones generales del cuartel.

El diseño experimental fue de bloques completamente al azar, con tres tratamientos y tres repeticiones por tratamiento. La unidad experimental correspondió a un grupo de cuatro plantas ubicadas en la misma hilera. El bloque lo constituyó la hilera.

Los tratamientos consistieron en distintos criterios de riego: tratamiento 1 (T1), criterio fisiológico, control del riego desde baya de 6 mm hasta envero con un Ψ_{h_x} umbral de -0,77 MPa (Ferreyra *et al.*, 2006) y desde envero a cosecha según la relación DPV- Ψ_{h_x} postulada por Gálvez (2011); tratamiento 2 (T2), criterio de suelo, consumo del 30% de la humedad aprovechable del suelo y, tratamiento 3 (T3), testigo de campo, donde el riego se aplicó según observación subjetiva de la humedad del suelo (frecuencia de riego de 3 días). En el período evaluado, los tratamientos totalizaron un monto equivalente de agua de 4.552; 2.703 y 5.833 m³·ha⁻¹ para T1, T2 y T3, respectivamente.

El umbral de riego para T2 se definió cuando se consumió el 30% de la humedad aprovechable del suelo, con la ayuda del programa Soil Water Characteristics 6.02.74 (USDA Agricultural Research Service). Se determinó la curva característica de retención de agua del suelo por cada horizonte genético y se midió el contenido de agua en campo con la sonda FDR Diviner 2000; al final del ensayo se realizó la calibración de la sonda, con lo que se corrigieron los valores de contenido de agua del suelo, determinando los valores reales utilizados en el ensayo.

El volumen de agua aplicado en todos los tratamientos correspondió al utilizado normalmente en el lugar del ensayo (427 m³·ha⁻¹, 12 h), disminuyendo en los últimos cuatro eventos (284 m³·ha⁻¹, 8 h).

² PROYECTO SITOP HUASCO, estación meteorológica La Arena.

Caracterización física del suelo

Densidad aparente, densidad real, porosidad total y textura del suelo. Se determinaron para cada uno de los horizontes de suelo, en triplicado, a través de las metodologías descritas por Dane y Topp (2002). La extracción de muestras de suelo se realizó al inicio del ensayo para cada uno de los horizontes genéticos, muestreando sobre la hilera y entre las hileras, en áreas contiguas al ensayo.

Curva característica de retención de agua del suelo. Al inicio del ensayo, se extrajeron sobre la hilera tres muestras de suelo en cilindros por cada uno de los horizontes genéticos, hasta una profundidad de 90 cm. Las muestras de cada uno de los horizontes de suelo fueron selladas dentro de bolsas y llevadas a laboratorio para la determinación de su contenido de agua a distintas tensiones. Se utilizó la cama de arena para las tensiones entre -2 y -60 hPa y ollas y platos de presión para las tensiones entre -330 y -15.000 hPa. Con el promedio de contenido de agua de las tres repeticiones de cada uno de los horizontes y las tensiones aplicadas en laboratorio, se procedió a generar la curva característica de retención de agua del suelo (Dane y Topp, 2002).

Evaluación del contenido de agua del suelo

Para la implementación del estudio, el 1° de diciembre del 2009 se instalaron, con ayuda de un barreno holandés, cinco tubos de acceso de PVC para la sonda FDR Diviner 2000, de 2 pulgadas de diámetro y 1 m de largo, en cada uno de los tratamientos de riego. Se registró el contenido de agua en el tiempo y en profundidad sobre la hilera, en el borde de la hilera y entre las hileras. El tubo ubicado sobre la hilera se ubicó a 40 cm del tronco de la planta y el del borde de la hilera a 52 cm del tubo sobre la hilera. Los tubos de las tres posiciones estuvieron alineados entre sí.

En cada uno de los tratamientos se evaluó:

Contenido diario de agua del suelo. Al inicio del ensayo y en todos los tratamientos, se evaluó el perfil de suelo y se identificó la profundidad en la cual se encontraba la mayor densidad de raíces, determinándose que la mayor actividad de raíces y dinámica del agua fue entre 10 y 60 cm. Se descartó entre 0 y 10 cm, debido al posible efecto de la evaporación sobre el contenido de agua del suelo, y bajo los 60 cm, debido a la escasa variación del contenido de agua en el tiempo.

La medición se realizó a las 16:00 PM y en forma regular durante el ensayo, considerando que a esa hora las plantas ya han estado expuestas al estrés de mediodía y, por lo tanto, han extraído la mayor parte del agua del suelo que absorben durante el día.

Evolución del contenido de agua del suelo con el riego. En el momento de realizar un riego, se registró la evolución del contenido de agua en el tiempo y en profundidad. Estas mediciones se realizaron en todos los tubos desde antes de iniciar el riego (0 h) y después de 2; 4; 8; 16; 24 y 48 h de iniciado el riego.

Curva de calibración sonda FDR

Al final del período de evaluación, se realizó la calibración de los datos entregados por el DIVINER. Para ello, en sitios previamente seleccionados, e inmediatamente después de registrar los datos con el equipo, se emuló la forma de medición de la sonda mediante la extracción de muestras de suelo en distintas condiciones de humedad, hasta los 50 cm de profundidad. A estas muestras se les evaluó, en laboratorio, su contenido volumétrico de agua, permitiendo construir la curva de calibración (Apéndice I), con la que se corrigieron los datos de contenido de agua del suelo de cada uno de los tratamientos.

Conductividad hidráulica no saturada (K_{ns})

Se determinó mediante la metodología propuesta por Becher (1970), la que considera el diferencial de contenido de agua y el gradiente de potencial hidráulico que se generan en el tiempo entre dos puntos dentro del perfil de suelo. El tiempo correspondió a los distintos tiempos desde el inicio del riego, mientras que la distancia entre puntos correspondió a las profundidades de medición de la sonda Diviner 2000. El potencial mátrico se obtuvo a través de la curva de retención de agua de cada uno de los horizontes mediante la interpolación de un ajuste lineal, mientras que el potencial gravitacional correspondió a la posición en profundidad respecto a la superficie del suelo.

Abundancia de raíces

En forma complementaria, a mediados del mes de febrero del año 2010, se evaluó la densidad de raíces mediante la confección de calicatas transversales y centradas en la hilera de plantación, de 2,8 m de largo por 1,6 m de profundidad, una por cada unidad experimental. El conteo de raíces se realizó en cuadrículas de 20 x 20 cm² según la clasificación de raíces propuesta por Van Zyl (1988).

Análisis estadístico

Los resultados se describieron mediante promedios y desviación estándar.

Previo a someter los datos a un análisis de varianza (ANDEVA), se verificaron los supuestos del análisis de varianza sobre los términos de error. En los casos donde estos supuestos no se cumplieron, se probó la transformación de las variables originales. Si finalmente los supuestos no se cumplieron, se realizó la prueba no paramétrica para diseños en bloque completamente aleatorizados de Friedman. Se realizó análisis de varianza, usando un nivel de significación del 5%. Las comparaciones entre medias se realizaron con la prueba de comparación múltiple de Tukey.

Para los análisis estadísticos se utilizaron los programas computacionales MINITAB TM 15 y Sigma Plot 11.0.

RESULTADOS

La descripción de rasgos morfológicos y físicos del suelo del ensayo coincidió con la Serie Chancoquín (CIREN, 2007) (Apéndice II).

Se determinó un mayor número de horizontes sobre la hilera, ya que el horizonte de 48 a 65 cm no fue diferenciado claramente entre las hileras (Cuadro 1). La densidad aparente fue más homogénea entre las hileras; sobre la hilera presentó un incremento entre los 33 y 65 cm. La densidad aparente y densidad real determinaron porosidades más bien bajas, pero acordes con la clase textural y la abundancia de gravas observadas en las calicatas. La porosidad total del suelo sobre la hilera fue baja, en el rango de 30 a 43% (Cuadro 1), pero esperable para suelos francos con arreglos de partículas en alta densidad.

Cuadro 1. Propiedades físicas del suelo del estudio sobre la hilera y entre las hileras.

Horizonte (cm)	Clase textural	Densidad aparente (g·cm ⁻³)	Densidad real (g·cm ⁻³)	Porosidad total (%)
Sobre la hilera				
0-33	*F	1,57	2,73	42,5
33-48	F	1,78	2,64	32,6
48-65	Fa	1,85	2,65	30,2
65-90	F	1,60	2,70	40,7
90-120	Fa	1,58	2,70	41,5
Entre las hileras				
0-33	F	1,66	2,70	38,5
33-65	F	1,69	2,72	37,9
65-90	FAa	1,64	2,67	38,6
90-120	Fa	1,65	2,62	37,0

* F: Franco; Fa: Franco arenoso; FAa: Franco arcillo arenoso.

La retención de agua fue similar entre los horizontes, siendo las profundidades de 0 a 33 cm y 33 a 48 cm las que mostraron los valores extremos (Figura 1). El valor promedio de CDC y PMP fue de 22,7% y 8,7%, respectivamente, para la profundidad donde se concentró la mayor cantidad de raíces; esto resulta en un 14% de agua aprovechable entre los 10 y 60 cm de profundidad.

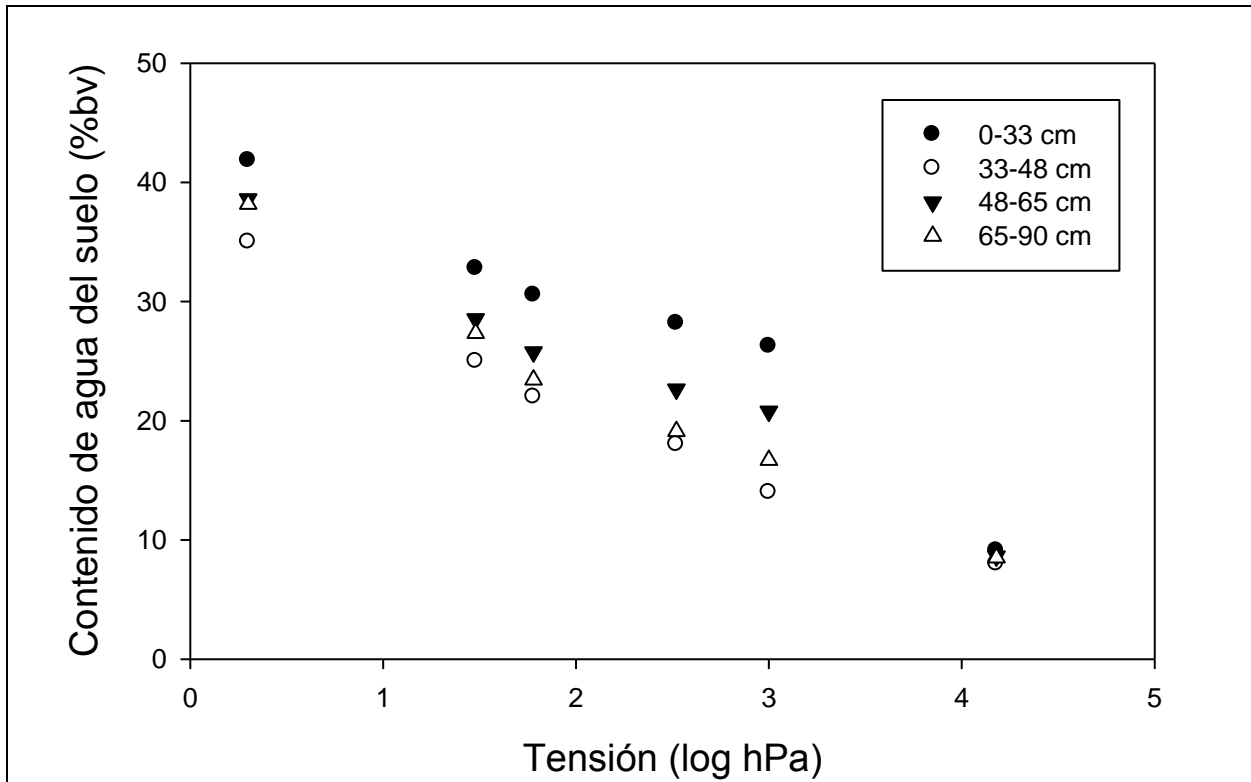


Figura 1. Contenido de agua en función de la tensión para distintos horizontes de suelo.

Durante todo el tiempo de medición, el suelo del testigo de campo (T3) tuvo un contenido de agua sobre la hilera más alto que T1 y T2 (Figura 2). Estos últimos presentaron un contenido de agua similar sólo al inicio, pero desde 24 días antes de envero y hasta el final del ensayo, fue mayor en T1. Después de envero, producto del aumento de la frecuencia de riego, el tratamiento T1 mostró un contenido de agua similar al T3, manteniéndose ambos ligeramente por sobre la capacidad de campo del suelo. Bajo 60 cm de profundidad, el contenido de agua del suelo de todos los tratamientos se mantuvo cercano a la CDC y presentó escasa variación a través del tiempo (datos no mostrados).

Respecto del uso del agua aprovechable sobre la hilera, sólo T2 consumió una fracción de ésta durante el tiempo de medición, mientras que T1 aprovechó una fracción de la humedad aprovechable del suelo sólo en tres ocasiones (Apéndice III).

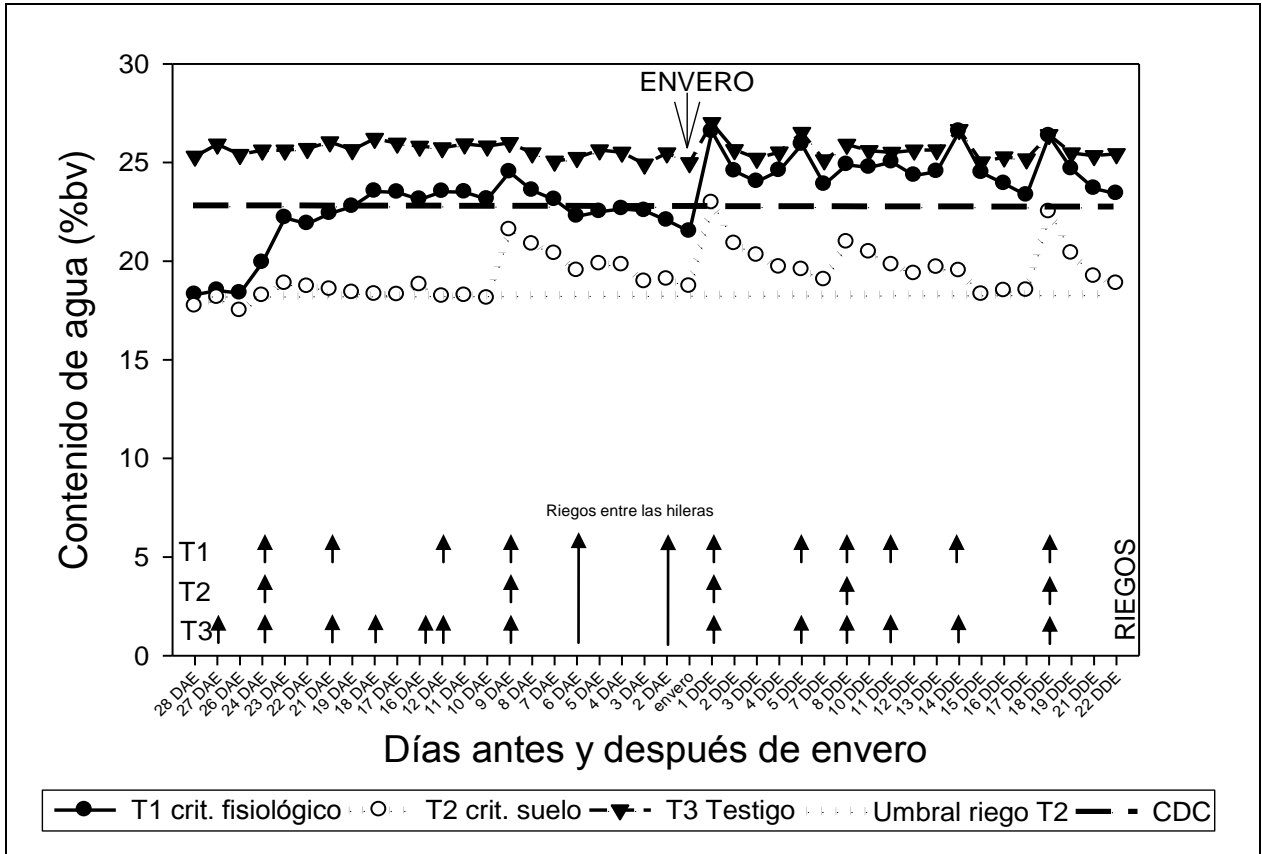


Figura 2. Contenido de agua del suelo sobre la hilera en cada uno de los tratamientos de riego. Flecha corta indica riego sobre la hilera. Flecha larga indica riego entre las hileras. CDC: capacidad de campo (-330 hPa).

En el borde de la hilera (Figura 3a), el riego según el criterio de campo (T3) mostró un contenido de agua en el suelo por sobre CDC, y mayor a los otros tratamientos, los cuales se mantuvieron cercanos a CDC.

Entre las hileras (Figura 3b), el T3 presentó el mayor contenido de agua en el suelo, no obstante, al contrario de lo registrado en el borde de la hilera, el T1 registró el menor contenido de agua a través de todo el tiempo de medición. Hasta antes de los riegos entre las hileras (6 y 2 días antes de envero), todos los tratamientos estuvieron bajo el umbral de riego utilizado para el tratamiento T2, donde el T1 presentó la situación más extrema, estando por debajo o muy cercano al punto de marchitez permanente del suelo (PMP=8,7%). Luego de estos riegos, el suelo de todos los tratamientos incrementó el contenido de agua; T3 alcanzó la CDC, entretanto T1 no alcanzó el umbral de riego del T2. Por su parte, T2 aumentó el contenido de agua hasta CDC, para luego disminuir, rápidamente, a un valor cercano al umbral de riego definido para este tratamiento y mantenerse cercano a éste hasta el final de las mediciones.

Al igual que sobre la hilera, el contenido de agua en el borde de la hilera y entre las hileras se mantuvo cercano o sobre CDC bajo los 60 cm de profundidad, en todos los

tratamientos (datos no mostrados), y el efecto del riego sobre el contenido de agua del suelo fue casi imperceptible.

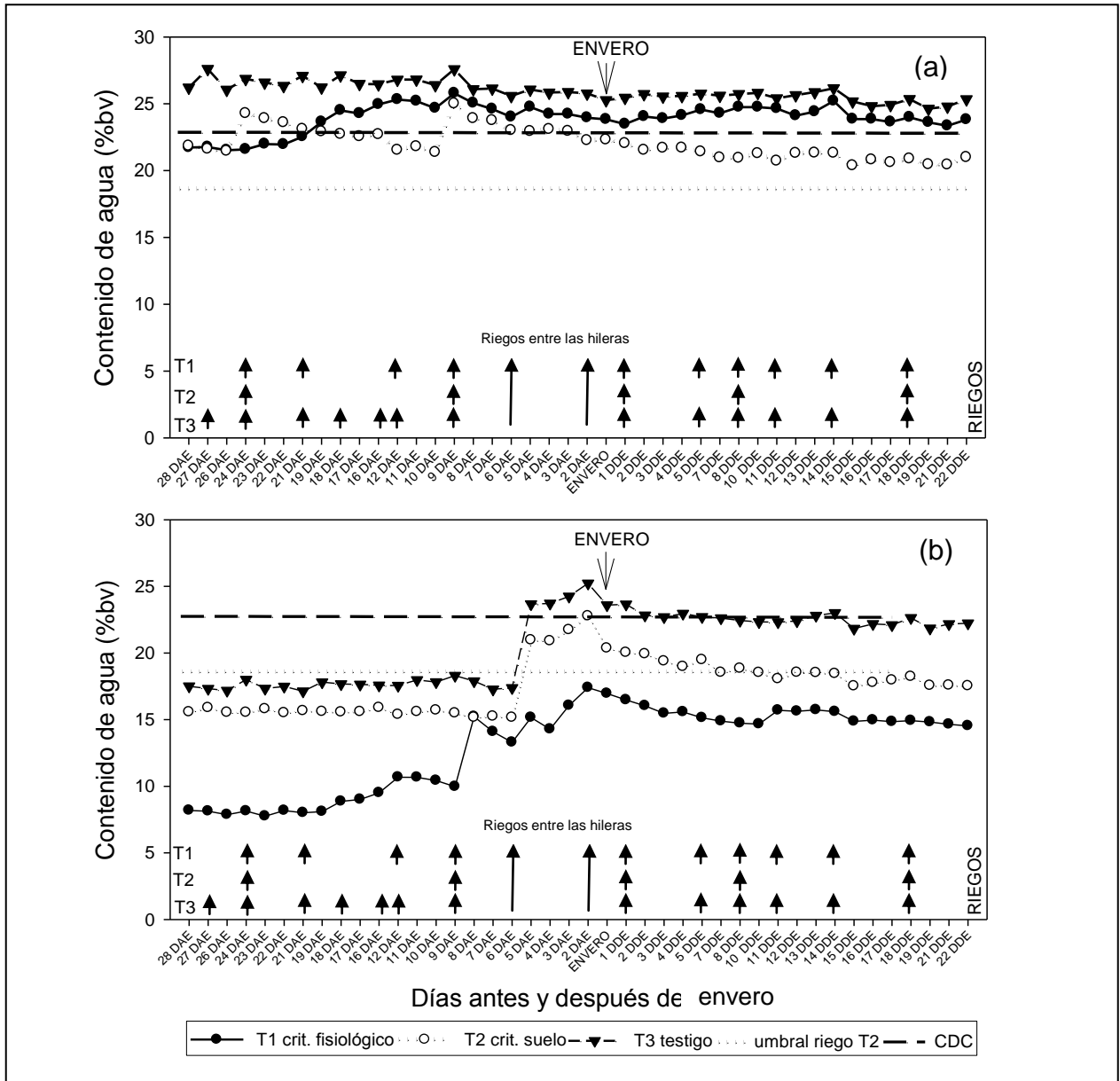


Figura 3. Contenido de agua del suelo en (a) el borde de la hilera y (b) entre las hileras en cada uno de los tratamientos de riego. Flecha corta indica riego sobre la hilera. Flecha larga indica riego entre las hileras.

Al expresar el porcentaje de déficit o exceso de aplicación de agua, según la evapotranspiración diaria acumulada del cultivo, para cada uno de los tratamientos del

ensayo (Cuadro 2), se aprecia que la mayor parte del tiempo la aplicación de agua en T1 y T3 superó a la evapotranspiración acumulada por el cultivo; por el contrario T2, al cual se le aplicó un menor número de riegos, el agua aplicada fue menor a la evapotranspiración acumulada estimada para la planta, a excepción del primer riego. El mayor déficit de aplicación de agua en este tratamiento correspondió a un 66% de la ETc acumulada, mientras que T1 y T3 llegaron a un 75% de exceso de agua para un riego particular.

Cuadro 2. Porcentaje de déficit (-) o exceso (+) de aplicación de agua según la evapotranspiración acumulada de la vid de mesa 'Red Globe'.

Tratamiento*	Nº riego	Duración riego (h)	Agua aplicada (mm)	Etc acumulada** (mm)	Déficit (-) o exceso (+) de la Etc (%)
T1	1	12	42,7	40,1	7
	2	12	42,7	24,4	75
	3	12	42,7	74,8	-43
	4	12	42,7	25,4	68
	5	12	42,7	81,8	-48
	6	12	42,7	29,4	45
	7	8	28,4	22,1	29
	8	8	28,4	22,1	29
	9	8	28,4	22,1	29
	10	8	28,4	29,5	-4
T2	1	12	42,7	40,1	7
	2	12	42,7	124,6	-66
	3	12	42,7	81,8	-48
	4	8	28,4	51,5	-45
	5	8	28,4	73,8	-62
T3	1	12	42,7	24,1	77
	2	12	42,7	24,4	75
	3	12	42,7	24,7	73
	4	12	42,7	24,9	72
	5	12	42,7	25,2	69
	6	12	42,7	25,4	68
	7	12	42,7	81,8	-48
	8	12	42,7	29,4	45
	9	8	28,4	22,1	29
	10	8	28,4	22,1	29
	11	8	28,4	22,1	29
	12	8	28,4	29,5	-4

* T1=criterio de riego según Ψ_h ; T2= criterio de riego según suelo; T3= testigo campo.

** Datos facilitados por el nodo de difusión y transferencia tecnológica para el uso eficiente del agua de riego en la Región de Atacama.

La evolución del contenido de agua del suelo sobre la hilera, en profundidad y a distintos tiempos desde el inicio de un riego dado a mitad de temporada, mostró que al iniciar los riegos, T2 partió con un contenido de agua del suelo más bajo que los otros tratamientos, debido al criterio de riego aplicado (Figura 4). El movimiento del agua en el suelo en 48 h no presentó diferencias importantes al modificar la cantidad de agua aplicada; con 28,4 mm (figuras 4a, c y e), todos los tratamientos alcanzaron su máximo de contenido de agua 6 h después del inicio del riego, para luego desaturarse lentamente hasta llegar a la última medición (48 h después del inicio del riego), alcanzando valores similares a los registrados previo al riego. El riego de 42,7 mm (figuras 4b, d y f) no fue muy distinto, aunque se observó que T3 alcanzó su máximo de almacenamiento a las 4,5 h de iniciado el riego (Figura 4f) y su contenido volumétrico de agua promedio en los primeros 60 cm sólo aumentó entre 1 y 2,5% entre antes del riego y el momento en que el perfil del suelo alcanzó su máxima capacidad de almacenamiento de agua (figuras 4e y f). Para el resto de los tratamientos, este valor varió entre 4 y 6%.

El borde de la hilera no presentó cambios importantes respecto de sobre la hilera, con la excepción que todos los tratamientos presentaron bajos contenidos de agua hasta los 30 cm de profundidad (datos no mostrados).

El movimiento del agua entre las hileras en el tiempo y en profundidad mostró escasa variación en todos los tratamientos (Apéndice IV), donde T3 tuvo un contenido de agua del suelo más homogéneo a lo largo de todo el perfil, casi siempre sobre CDC, y sobre los 60 cm posee un contenido de agua más alto que T1 y T2, producto de la alta frecuencia de aplicación de agua. El contenido de agua bajo los 60 cm de profundidad fue similar entre los tratamientos y estuvo sobre CDC.

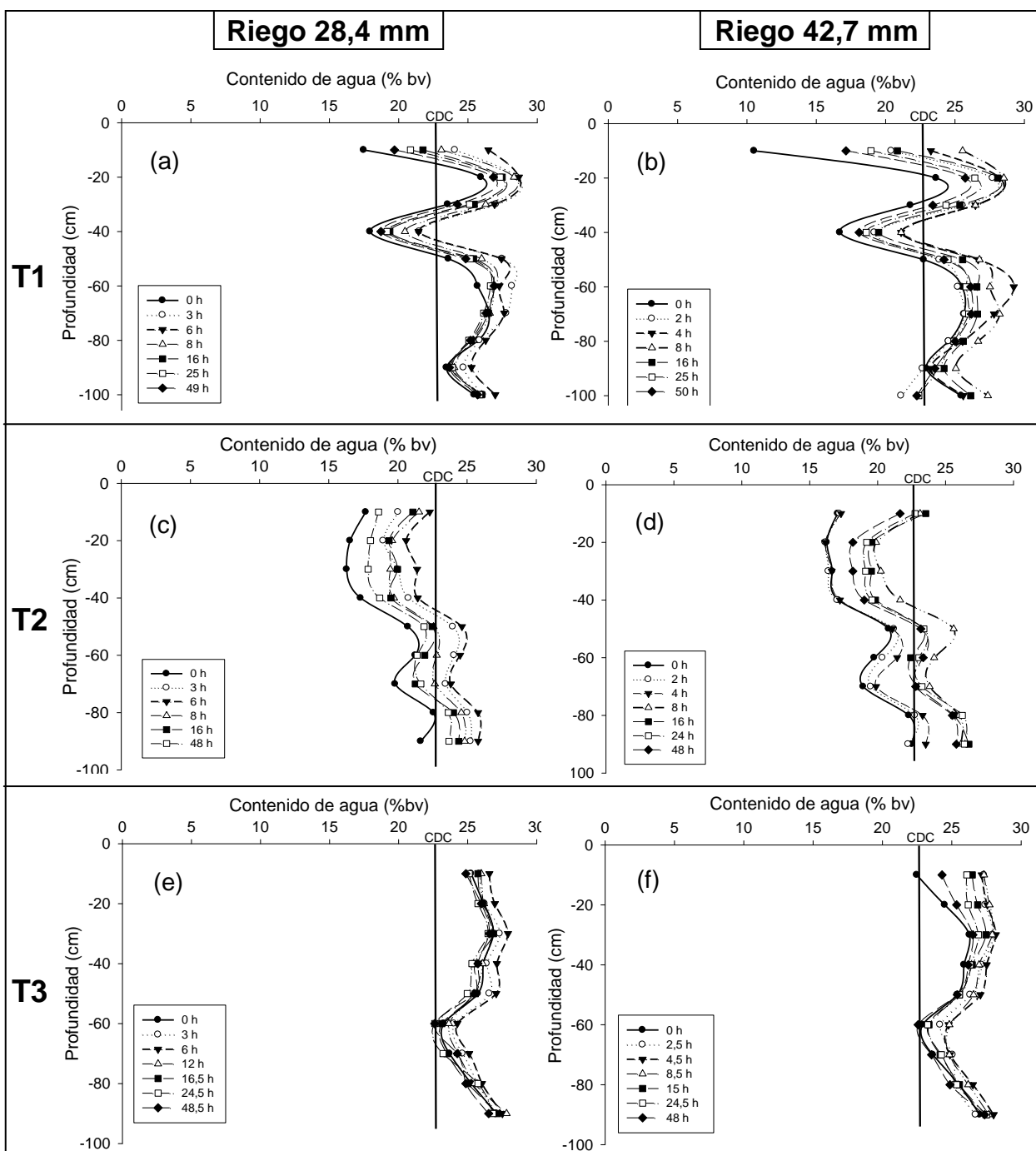


Figura 4. Contenido de agua del suelo sobre la hilera, en profundidad y a través del tiempo, al aplicar 28,4 mm (a, c y e; T1, T2 y T3, respectivamente) o 42,7 mm de agua en un riego (b, d y f; T1, T2 y T3, respectivamente), para distintos tratamientos. 0 h indica instante justo antes del inicio del riego. Línea vertical indica el contenido de agua a capacidad de campo del suelo (CDC) ponderado para el perfil del suelo.

La velocidad de movimiento del agua en el suelo sobre la hilera, evaluada a través de la K_{ns} (Figura 5), fue mayor en el tratamiento regado en alta frecuencia (T3) y el regado por el potencial xilemático (T1) y, además, presentaron menores tensiones de agua en el suelo. La K_{ns} del T2 no sólo fue más baja, sino que se acentuó a medida que se secó el suelo. Los datos experimentales de K_{ns} y tensión de agua en el suelo sobre la hilera fueron ajustados a un modelo exponencial significativo ($p < 0,05$), pero de bajo coeficiente de determinación (Figura 5).

Con el transcurso del tiempo desde que inició el riego, y sobre los 60 cm, T2 tendió a alcanzar valores más bajos de K_{ns} antes que T1 y T3, lo que podría indicar algún efecto del contenido inicial de agua al momento de aplicar el riego, mientras que bajo los 60 cm de profundidad fue similar entre los tratamientos y se mantuvo casi constante en el tiempo (datos no mostrados).

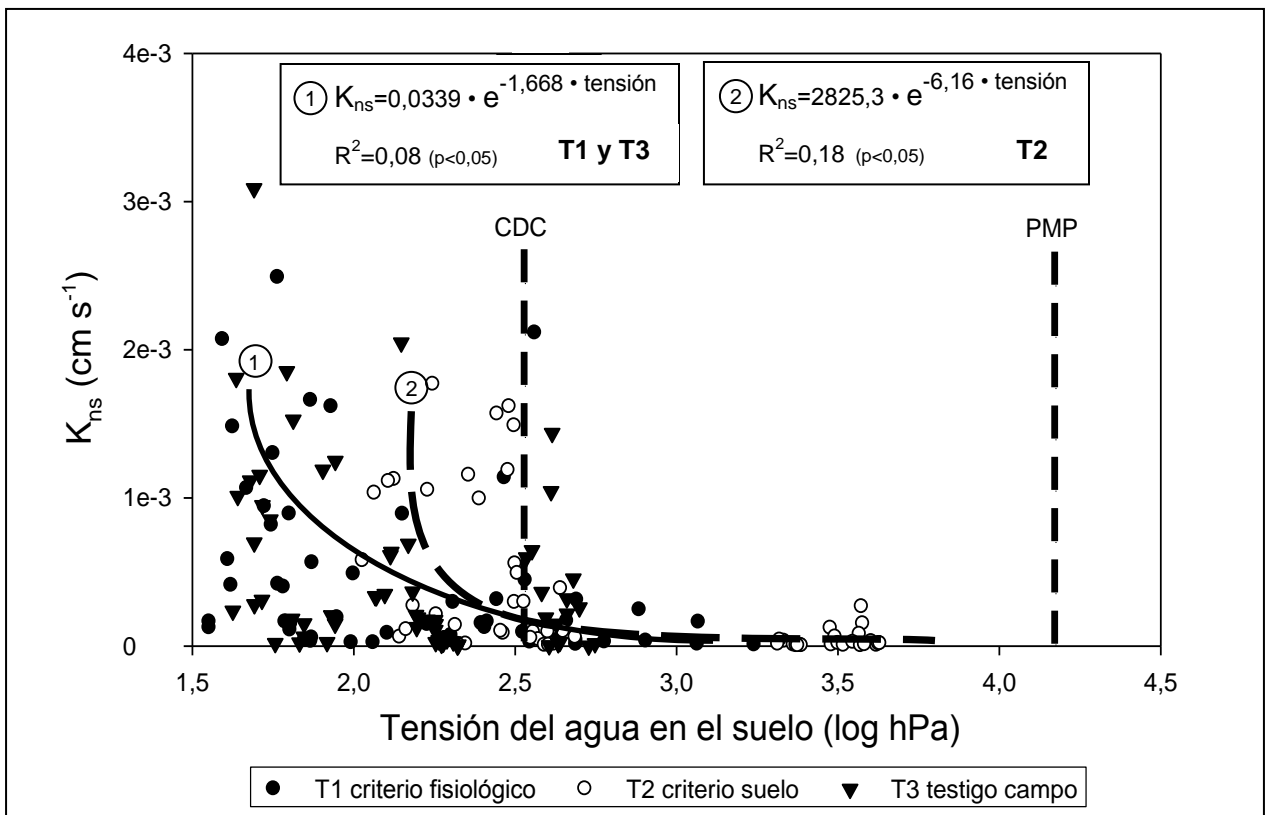


Figura 5. Conductividad hidráulica no saturada (K_{ns}) del suelo sobre la hilera, como función de la tensión del agua, para distintos tratamientos de riego.

En el borde de la hilera (Figura 6a), la relación y los valores de K_{ns} y de tensión de agua en el suelo en cada tratamiento fue semejante a lo observado sobre la hilera (Figura 5); T1 y T3 presentaron mayor K_{ns} y menor tensión de agua en rangos, mientras que T2 mostró menor K_{ns} y mayor tensión de agua en el suelo. Con el transcurso del riego, la K_{ns} se volvió bastante homogénea entre tratamientos (datos no mostrados), indicando

que en todos ellos el borde de la hilera se encuentra influenciado por factores que provocan un comportamiento físico e hidráulico del suelo similar, lo cual no ocurre sobre la hilera.

Entre las hileras de todos los tratamientos se apreció la mayor tensión de agua en el suelo y los menores valores de K_{ns} (Figura 6b). Así, T1 presentó los valores más extremos, sin embargo, la relación entre estas variables fue similar entre los tratamientos, ajustándose a un único modelo exponencial (Figura 6b).

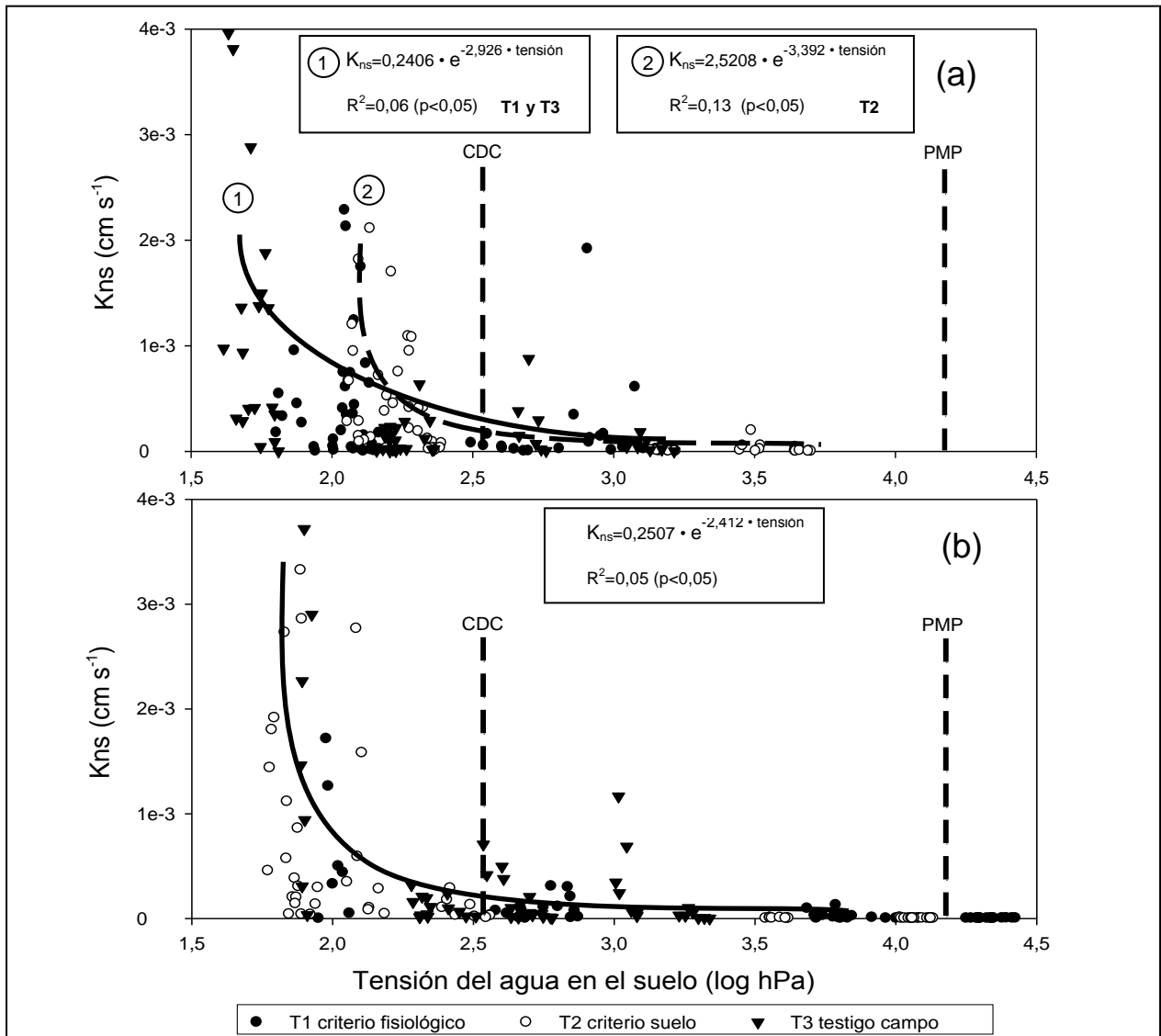


Figura 6. Conductividad hidráulica no saturada del suelo (K_{ns}) en (a) el borde de la hilera y (b) entre las hileras del suelo, como función de la tensión del agua, para distintos tratamientos de riego.

La distribución de raíces finas en el perfil de suelo fue mayor en los tratamientos con menor aplicación de agua al suelo (T1 y T2) (Figura 7). En todos los tratamientos, las raíces finas fueron mayores que las raíces delgadas, concentrándose en el lugar de descarga de los emisores.

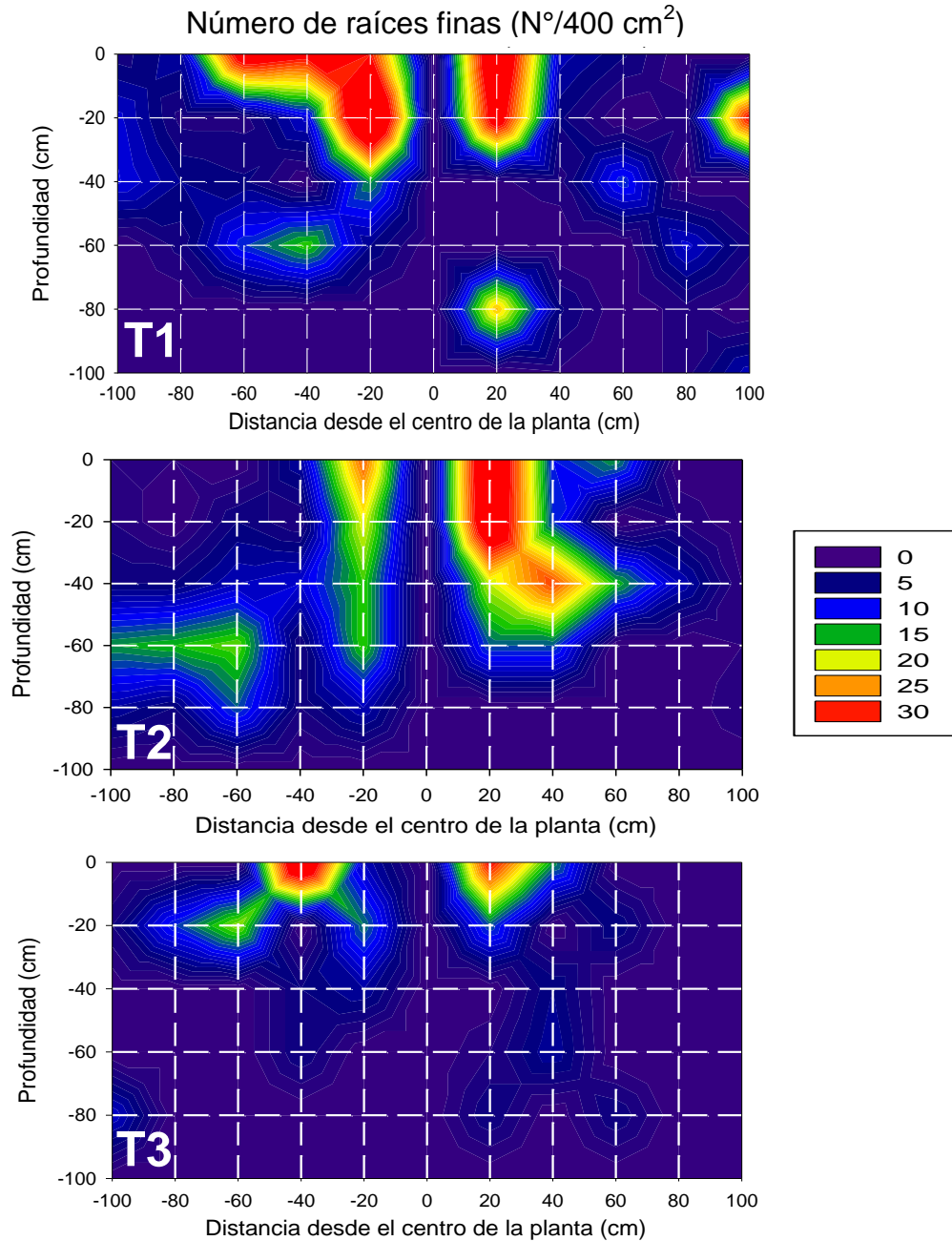


Figura 7. Densidad de raíces finas (< 0,5 mm de diámetro) en profundidad respecto del centro de la planta, para distintos tratamientos de riego. T1= criterio de riego según Ψ_{h_x} ; T2= criterio de riego según suelo; T3= testigo campo.

Las raíces delgadas de los tratamientos T2 y T3 se distribuyeron de manera más amplia en el perfil de suelo que las del T1, en tanto que el T2 mostró la mayor exploración del perfil de suelo (Figura 8).

La distribución de raíces medias y gruesas fue similar entre los tratamientos, aunque T3 tendió a una mayor exploración del perfil de suelo (datos no mostrados).

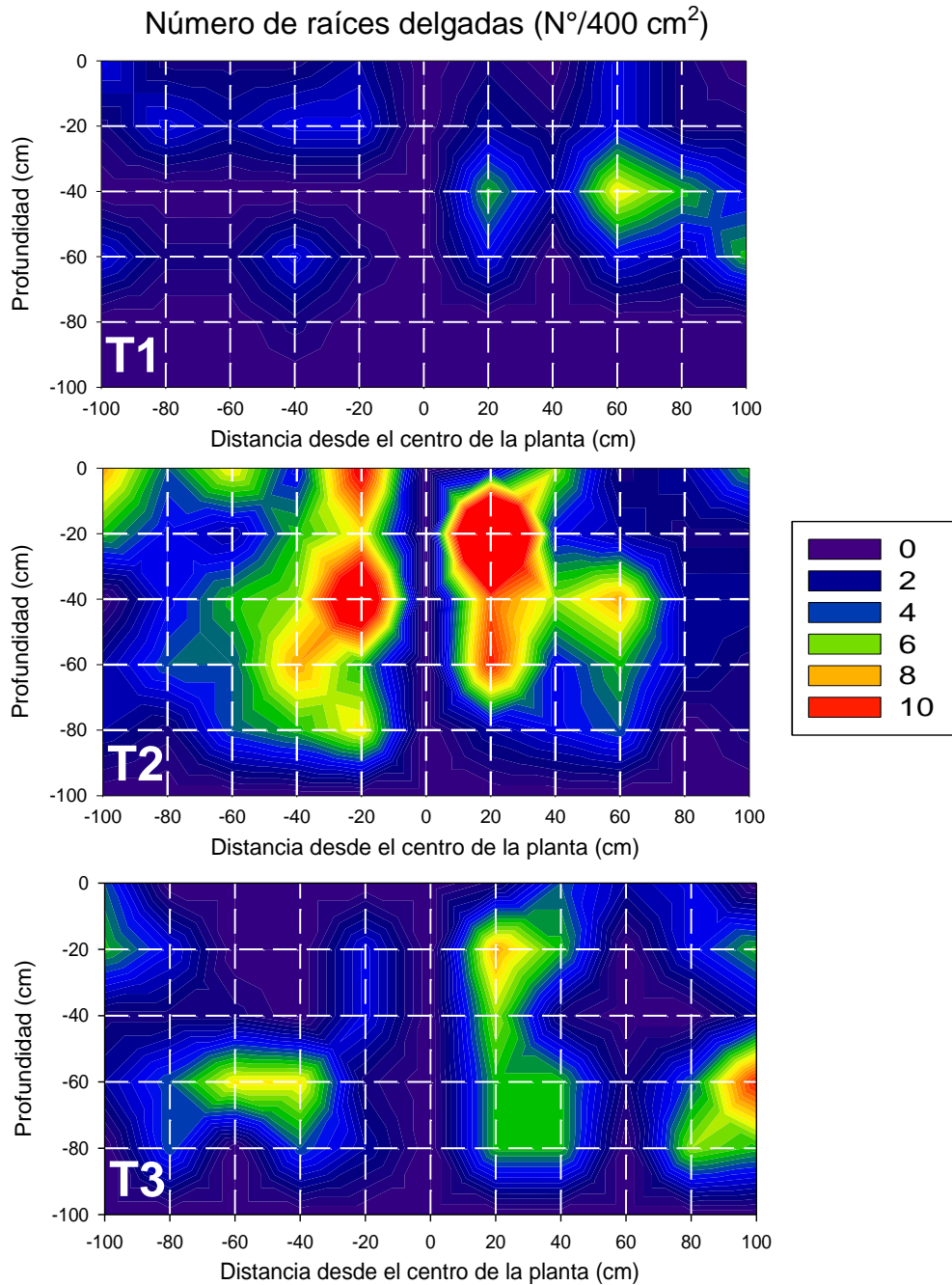


Figura 8. Densidad de raíces delgadas (0,5 - 2 mm de diámetro) en profundidad respecto del centro de la planta, para distintos tratamientos de riego. T1= criterio de riego según Ψ_{h_x} ; T2= criterio de riego según suelo; T3= testigo campo.

Respecto del número total de raíces por categoría de diámetro, se observó que el número total de raíces medias y gruesas de T3 presentó diferencias significativas con el resto de los tratamientos (Cuadro 3), lo que indica que el sistema radical de las plantas con mayor aplicación de agua incrementó el desarrollo de raíces de exploración, con el objeto de alcanzar ambientes más propicios en términos del contenido de agua y oxígeno del suelo.

Cuadro 3. Densidad de raíces por categoría de diámetro (mm) para distintos tratamientos de riego. Valores corresponden al promedio \pm el error estándar.

Densidad de raíces (N° de raíces/2m ²)				
Tratamiento	Finas (< 0,5 mm)	Delgadas (0,5-2 mm)	Medias (2-5 mm)	Gruesas (> 5 mm)
T1	848 \pm 383 a	177 \pm 30 a	83 \pm 19 a	26 \pm 10 a
T2	1.716 \pm 227 a	292 \pm 108 a	105 \pm 27 a	39 \pm 29 a
T3	1.274 \pm 486 a	288 \pm 103 a	196 \pm 18 b	80 \pm 28 b

Letras distintas indican diferencias significativas entre tratamientos ($p \leq 0,05$) según el test de Tukey. **T1=criterio de riego según Ψ_h ; T2= criterio de riego según suelo; T3= testigo campo.**

DISCUSIÓN

Los tratamientos produjeron diferencias en el contenido de agua del suelo. La alta frecuencia de riego de T3 generó el mayor contenido de agua de todos los tratamientos sobre la hilera (Figura 2), el borde de la hilera y entre las hileras (Figura 3), manteniéndose siempre por sobre la capacidad de campo del suelo, excepto entre las hileras hasta 6 días antes de envero, donde se presentó un menor contenido de agua debido a que el manejo del riego estuvo enfocado sobre la hilera. La diferencia en el contenido de agua del suelo de T1 y T2 fue reflejo de la distinta frecuencia de riego aplicada a cada tratamiento (figuras 2 y 3); el contenido de agua sobre la hilera y en el borde de la hilera de T1 se mantuvo sobre la capacidad de campo la mayor parte del tiempo, mientras que para T2, éste estuvo entre el umbral de riego de este tratamiento y la capacidad de campo del suelo.

A pesar de la constante aplicación de riego en T3, en ningún momento el sistema poroso de este tratamiento estuvo completamente saturado de agua, hecho que se explica por la dominancia de partículas gruesas, que permitió una buena permeabilidad (Hillel, 1982). De este modo, la diferencia entre la porosidad total del suelo (Cuadro 1) y el contenido de agua sobre la hilera (Figura 2) aseguraron siempre una cantidad de poros con aire.

En los primeros 60 cm de profundidad de la sobrehilera se presentó un activo movimiento y absorción de agua por parte de las raíces, mostrando mayor variación del contenido de agua entre días consecutivos, lo que se acentuó en T1 y T2, coincidiendo con los resultados obtenidos por Ferreyra *et al.* (2006) y Navarrete (2006). Esto se ratifica con la mayor abundancia de raíces finas y delgadas (figuras 7 y 8) bajo el tronco de la planta y cercano a éste, lo que también ha sido observado en otras investigaciones (Giulivo y Pitacco, 1996; Laboski *et al.*, 1998; Mmolawa y Or, 2000; Sellés *et al.*, 2003). Por lo tanto, es importante que los emisores, o el bulbo de mojado producido por ellos, se encuentren cercanos al tronco de la planta, para generar las condiciones hídricas adecuadas para el desarrollo de raíces absorbentes.

Sin embargo, no sólo es importante abastecer de agua de riego la zona donde se concentra la mayor cantidad de raíces absorbentes, sino que también es importante usar de manera eficiente el agua almacenada en los poros de agua útil del suelo. Al respecto, sólo T2 presentó un consumo del agua aprovechable del suelo, T1 lo hizo en escasas ocasiones, mientras que T3 absorbió una fracción de agua por sobre la capacidad de campo del suelo (Figura 2 y Apéndice III). El agua almacenada en el sistema poroso de T1 y T3 estuvo retenida con menor energía por las partículas del suelo, a diferencia del tratamiento T2, donde se retuvo con mayor energía (figuras 5 y 6), lo que sugiere que a las plantas les fue más fácil absorber agua en los tratamientos T1 y T3, en comparación al T2. A pesar de esto, T2 tuvo condiciones edáficas equilibradas en términos de la disponibilidad de agua y aire para las raíces (Richards, 1983), ambiente que no tuvo el T3, debido a su alta frecuencia de riego.

En los tratamientos T1 y T3 se excedió la necesidad hídrica diaria de la planta, representada por la evapotranspiración del cultivo (ET_c) (Cuadro 2). Respecto a T2, fue

regado con menos agua de lo que indicaba la ET_c . Estos resultados y la mayor variación del contenido de agua en T2, sugieren que la ET_c , la que ha sido utilizada en diversos estudios en vid como herramienta para la programación del riego (Ferreyra *et al.*, 2006; Patakas *et al.*, 2005; Sellés *et al.*, 2003), podría ser complementada con otras variables, como la textura del suelo, su capacidad de retención de agua y el tiempo y frecuencia de riego, con miras a aumentar la eficiencia de uso del agua de riego.

Respecto del movimiento del agua en el suelo, la variación entre el inicio del riego y el momento de máximo almacenamiento fue mayor sobre la hilera de T1 y T2 (Figura 4), demostrando que el sistema poroso de T3 mantuvo más agua que el de los otros dos tratamientos, y que la aplicación de 42,7 mm, e incluso 28,4 mm, fue excesiva. En alta frecuencia de riego, una mayor proporción de poros se mantuvo con un alto contenido de agua, lo que generó un mojamiento más rápido del suelo, alcanzando un máximo humedecimiento del perfil sólo 4,5 h luego del inicio del riego (Figura 4f), por lo que el riego de 12 h (42,7 mm) significó una aplicación en exceso de 27 mm que pudo lixiviar nutrientes, como el nitrato (Paramasivam *et al.*, 2002) y el fósforo (Djodjic *et al.*, 2004); este efecto pudo acentuarse en T3 debido a que presentó una mayor conductividad hidráulica (K_{ns}) (Figura 5). Aunque T1 y T2 también recibieron una fracción de agua en exceso, el dejar transcurrir más días entre eventos de riego permite aumentar la eficiencia de uso del agua almacenada en el suelo (Figura 2).

En el borde de la hilera (datos no mostrados) y entre las hileras (Apéndice IV) de todos los tratamientos, se registró una escasa variación del contenido de agua en el transcurso de un riego, por lo que el movimiento vertical del agua predominó sobre el movimiento lateral, lo que sucede a menudo en suelos de texturas gruesas, como el de la presente investigación, debido a que la fuerza de gravedad supera a la fuerza capilar (Badr *et al.*, 2010). Eventualmente, la compactación puede alterar el movimiento lateral del agua, afectando la apertura del bulbo de mojamiento (Fuentes *et al.*, 2004). En este estudio, la alta densidad aparente sobre la hilera (Cuadro 1), que probablemente se extiende al borde de la hilera, pudo generar un confinamiento del flujo de agua, impidiendo el movimiento lateral.

El movimiento del agua en profundidad indica que el suelo tenía una buena permeabilidad, lo que pudo ser consecuencia de la abundante cantidad de gravas finas y medias presentes entre los 33 y 65 cm de profundidad (Apéndice II). Diversos autores señalan que el contenido de fragmentos de roca del suelo afecta la infiltración (Sauer y Logsdon, 2002; Seguel, 1997; Zhou *et al.*, 2009), la sortividad (Zhou *et al.*, 2009) y la capacidad de almacenamiento de agua del suelo (Hillel, 1982). Otro factor que influye sobre el movimiento del agua es la histéresis (Hillel, 1982; Jury *et al.*, 1991), fenómeno físico que afecta la redistribución y percolación profunda del agua en el suelo (Elmaloglou y Diamantopoulos, 2009). Además de los factores mencionados anteriormente, la absorción diaria de agua de la vid (Williams y Trout, 2005) contribuye a la generación de gradientes dentro del suelo (Mmolawa y Or, 2000), lo que también afecta el movimiento del agua.

Los valores de K_{ns} obtenidos en esta investigación fueron similares a los indicados en la literatura para suelos de clases texturales francas (Abrisqueta *et al.*, 2006; Miller *et al.*, 2002; Ndiaye *et al.*, 2007; Nissen *et al.*, 2006) y varió del orden de 10^{-2} a 10^{-7} $\text{cm}\cdot\text{s}^{-1}$

sobre la hilera de todos los tratamientos (Figura 5), y algo similar ocurrió en el borde de la hilera (Figura 6). Entre las hileras alcanzó el orden de 10^{-8} cm·s⁻¹ en todos los tratamientos (Figura 6), como consecuencia de su menor contenido de agua en el suelo, incluso, a inicios de temporada, se presentaron contenidos de agua cercanos al punto de marchitez permanente del suelo (PMP) (Figura 3b), desarrollando un ambiente edáfico poco favorable para el crecimiento y desarrollo radical, explicando la casi nula presencia de raíces en esa zona (figuras 7 y 8).

En el transcurso del riego, se observó una reducción de los valores de K_{ns} en todos los tratamientos, al mismo tiempo que disminuyó el contenido de agua y aumentó la fuerza con la que ésta estuvo retenida por las partículas sólidas del suelo (datos no mostrados). En esta situación, los poros de mayor diámetro (> 50 µm) comienzan a desaturarse y sólo los poros de diámetro menor (< 50 µm) son los que siguen conduciendo el agua a través del perfil. De acuerdo a los valores de tensión de agua en el suelo de los tratamientos T1 y T2 (figuras 5 y 6), los poros involucrados en el flujo de agua fueron, en mayor medida, mesoporos (10 a < 60 µm) y microporos (0,2 a < 10 µm) (Luzio y Casanova, 2006), éstos últimos responsables del almacenamiento de agua aprovechable en el suelo. El tratamiento T2 tuvo un mayor número de días entre eventos de riego, por lo que el agua contenida en los distintos tipos de poros fue aprovechada con mayor intensidad, lo que quedó demostrado con los valores de tensión de agua en el suelo de este tratamiento (figuras 5 y 6). En el caso de T3, su alta frecuencia de riego y las bajas tensiones de agua observadas (figuras 5 y 6) hacen presumir que los poros de agua útil se encontrarían constantemente saturados, por lo que el flujo de agua se produciría principalmente a través de macroporos, espacios entre agregados y grietas, siendo un flujo más constante y rápido en el tiempo, tal como lo observaron Miller *et al.* (2002), al evaluar el flujo de agua a bajas tensiones. Los resultados del estudio discriminan claramente la importancia de la macroporosidad y su alta participación en el flujo de agua.

Según Hillel (1998), la fisiología de la planta se ve afectada por la relación entre la tasa de transpiración requerida por la planta, la extracción de agua por parte de las raíces y la conductividad hidráulica del suelo. Al respecto, y de acuerdo a la K_{ns} y tensión de agua, T3 presentó condiciones que no limitaron la absorción de agua por parte de las raíces, T1 estaría en una condición intermedia, mientras que T2 presentó las condiciones más desfavorables, con valores más extremos de K_{ns} y de tensión del agua sobre la hilera. Este tratamiento mostró valores de succión de agua 2,5 veces más alta que la de T1 y casi 8 veces más alta que la de T3. Al respecto, la absorción de agua a bajos potenciales (-1.500 a -100 kPa) requiere un mayor gasto energético por parte de la planta (Hillel, 1982), por lo que es probable que las vides regadas con menor frecuencia (T2) hayan realizado cambios metabólicos que les permitiera seguir funcionando bajo condiciones de menor disponibilidad de agua en el suelo, como el ajuste osmótico, el cual ha sido observado en especies como olivo (Dichio *et al.*, 2005) y vid (Patakas *et al.*, 2002).

La menor frecuencia de riego (T1 y T2) permitió una mayor distribución de las raíces finas (< 0,5 mm) (Figura 7) y delgadas (0,5 - 2 mm) (Figura 8) en el perfil de suelo, mientras que la alta frecuencia (T3) concentró las raíces encargadas de la absorción de

agua (finas) en la superficie del suelo (Figura 7) y promovió un significativo crecimiento de las raíces medias (2 - 5 mm) y gruesas (> 5 mm) (Cuadro 3). Así, las condiciones físicas y la cantidad de oxígeno en el sistema poroso de T1 y T2 favorecieron la distribución de raíces absorbentes, con lo que se aumentó la eficiencia de uso del agua almacenada en el suelo. Según Richards (1983), una adecuada elongación de las raíces se obtiene con un 12 a 15% del espacio poroso del suelo lleno con aire, lo que podría explicar la concentración de las raíces finas del T3 en superficie, tratamiento que presentó el menor contenido de aire en el suelo (8,1 a 10,2%) y la mayor cantidad de raíces medias y gruesas.

La sonda de capacitancia Diviner 2000 sobreestimó el contenido volumétrico de agua en todas las profundidades (Apéndice I), diferencia que se acentuó a medida que aumentó el contenido de agua del suelo, alcanzando diferencias de hasta 8,7% respecto del contenido de agua real del suelo. Esta inexactitud en la medición también fue observada por Al-Ain *et al.* (2009), quien indica que estas discrepancias se deben al aire presente entre los terrones ubicados alrededor de los tubos de acceso, los cuales afectarían las lecturas de la sonda, debido al pequeño volumen de medición del instrumento. Por lo tanto, para obtener mejores resultados en cualquier investigación, sería fundamental definir la curva de calibración para el suelo en estudio, con el objeto de conocer el valor real de contenido de agua.

CONCLUSIONES

De acuerdo a la respuesta del suelo a las distintas frecuencias de riego aplicadas a un suelo franco cultivado con vides 'Red Globe', se concluye que:

- La alta frecuencia de riego mantuvo saturado una mayor proporción del sistema poroso del suelo, involucrando principalmente a los poros de agua útil, generando una mayor velocidad de movimiento del agua (K_{ns}) y un menor tiempo en alcanzar el máximo mojado del perfil de suelo en un evento de riego, lo que pudo causar pérdidas de agua de riego por percolación profunda.
- La disminución de la frecuencia de riego mejoró la distribución de las raíces encargadas de la absorción de agua, aumentando la eficiencia de uso del agua almacenada en los poros de agua útil del suelo.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

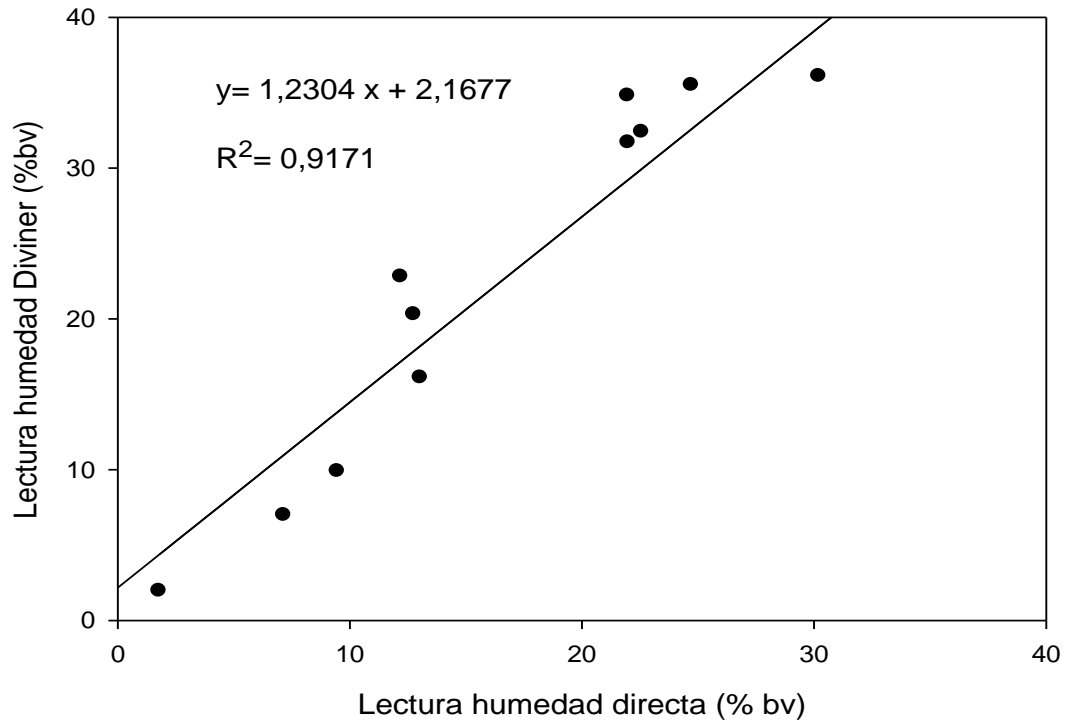
- Abrisqueta, J.M., V. Plana, A. Ruiz-Canales and M.C. Ruiz-Sánchez. 2006. Unsaturated hydraulic conductivity of disturbed and undisturbed loam soil. *Spanish Journal of Agricultural Research* 4 (1): 91-96.
- Al-Ain, F., J. Attar, F. Hussein and L.K. Heng. 2009. Comparison of nuclear and capacitance-based soil water measuring techniques in salt-affected soils. *Soil Use and Management* 25 (4): 362-367.
- Badr, M.A., S.D. Abou Hussein, W.A. El-Tohamy and N. Gruda. 2010. Efficiency of subsurface drip irrigation for potato production under different dry stress conditions. *Gesunde Pflanzen* 62 (2): 63-70.
- Becher, H. 1970. Eine methode zur Messung der Wasserleitfähigkeit von Böden im ungesättigten Zustand. Diss. Techn. Univ. Hannover. 125 p.
- Brady, N.C. and R.R. Weil. 1996. *The nature and properties of soils*. 11^a Edición. Prentice Hall International Editions. New Jersey, USA. 740 p.
- Centro de Información Recursos Naturales (CIREN). 2007. Estudio agrológico Valle de Copiapó y Valle del Huasco III Región. Publicación CIREN N° 135. 145 p.
- Dane, J.H. and G.C. Topp. 2002. *Methods of soil analysis: Part 4 Physical Methods*. Soil Science Society of America, Inc. Madison, Wisconsin, USA. 1692 p.
- Dexter, A.R. 2004. Soil physical quality part III: Unsaturated hydraulic conductivity and general conclusions about S-theory. *Geoderma* 120 (3-4): 227-239.
- Dichio, B., C. Xiloyannis, A. Sofo and G. Montanaro. 2005. Osmotic regulation in leaves and roots of olive trees during a water deficit and rewatering. *Tree Physiology* 26 (2): 179-185.
- Dirksen, Ch. 1999. *Soil physics measurements*. Catena Verlag. Reiskirchen, Germany. 154 p.
- Djodjic, F., K. Börling, and L. Bergström. 2004. Phosphorus leaching in relation to soil type and soil phosphorus content. *Journal of Environmental Quality* 33 (2): 678-684.
- Elmaloglou, S. and E. Diamantopoulos. 2009. Effects of hysteresis on redistribution of soil moisture and deep percolation at continuous and pulse drip irrigation. *Agricultural Water Management* 96 (3): 533-538.
- Elmaloglou, S. and E. Diamantopoulos. 2010. Soil water dynamics under surface trickle irrigation as affected by soil hydraulic properties, discharge rate, dripper spacing and irrigation duration. *Irrigation and Drainage* 59 (3): 254-263.

- 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'. *Pesquisa Agropecuária Brasileira* 41 (7): 1109-1118.
- Fuentes, S., G. Rogers, J. Conroy, S. Ortega-Farias and C. Acevedo. 2004. Soil wetting pattern monitoring is a key factor in precision irrigation of grapevine. *Acta Horticulturae* 664: 245-252.
- Gálvez, R. 2011. Evaluación del uso conjunto del potencial hídrico xilemático y el déficit de presión de vapor en el manejo del riego en vides de mesa. Tesis de Magíster. Universidad de Chile. Facultad de Ciencias Agronómicas. Santiago, Chile, 59 p.
- Gavande, K. H. 1972. Física de Suelos. Principios y aplicaciones. Ed. Limusa. Wiley, México. 351 p.
- Giulivo, C. and A. Pitacco. 1996. Studying the root system of grapevine. *Acta Horticulturae* 427: 63-66.
- Hillel, D. 1982. *Introductions to soil physics*. Academic Press. Orlando, EE.UU. 364 p.
- Hillel, D. 1998. *Environmental soil physics*. Academic Press. San Diego, EE.UU. 771 p.
- Jacobsen, O.H. and H.E. Jensen. 1990. Unsaturated hydraulic conductivity determined by the hot air method for some Danish till soils. *Nordic Hydrology* 21 (2): 133-140.
- Jury, W.A., W.R. Gardner, and W.H. Gardner. 1991. *Soil physics*. John Wiley and Sons. 5^a ed. New York. 250 p.
- Laboski, C.A.M., R.H. Dowdy, R.R. Allmaras and J.A. Lamb. 1998. Soil strength and water content influences on corn root distribution in a sandy soil. *Plant and Soil* 203 (2): 239-247.
- Luzio, W y M. Casanova. 2006. *Avances en el conocimiento de los suelos de Chile*. Universidad de Chile. Santiago, Chile. 394 p.
- Miller, J.J., N.J. Sweetland and C. Chang. 2002. Hydrological properties of a clay loam soil after long-term cattle manure application. *Journal of Environmental Quality* 31 (3): 989-996.
- Mmolawa, K. and D. Or. 2000. Root zone solute dynamics under drip irrigation: a review. *Plant and Soil* 222 (1-2): 163-190.
- Navarrete, P. 2006. Efecto de la disponibilidad de agua del suelo en el comportamiento estomático, fotosíntesis y transpiración en vid de mesa variedad Crimson Seedless. Memoria Ingeniero Agrónomo. Universidad de Chile. Facultad de Ciencias Agronómicas. Santiago, Chile. 29 p.
- Ndiaye, B., J. Molénat, V. Hallaire, CH. Gascuel and Y. Hamon. 2007. Effects of agricultural practices on hydraulic properties and water movement in soils of Brittany (France). *Soil & Tillage Research* 93 (2): 251-263.

- Nissen, J., C. Quiroz, O. Seguel, R. Mac Donald y A. Ellies. 2006. Flujo hídrico no saturado en Andisoles. *Revista de la Ciencia del Suelo y Nutrición Vegetal* 6 (1): 9-19.
- Paltineanu, I.C. and J.L. Starr. 2000. Preferential water flow through corn canopy and soil water dynamics across rows. *Soil Science Society of America Journal* 64 (1): 44-54.
- Paramasivam, S., A.K. Alva, A. Fares and K.S. Sajwan. 2002. Fate of nitrate and bromide in an unsaturated zone of a sandy soil under citrus production. *Journal of Environmental Quality* 31 (2): 671-681.
- Patakas, A., N. Nikolaou, E. Zioziou, K. Radoglou and B. Noitsakis. 2002. The role of organic solute and ion accumulation in osmotic adjustment in drought – stressed grapevines. *Plant Science* 163 (2): 361-367.
- Patakas, A., B. Noitsakis and A. Chouzouri. 2005. Optimization of irrigation water use in grapevines using the relationship between transpiration and plant water status. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 106 (2-3): 253-259.
- Richards, D. 1983. The grape root system. *Horticultural Reviews* 5: 127-168.
- Sauer, T.J. and S.D. Logsdon. 2002. Hydraulic and physical properties of stony soils in a small watershed. *Soil Science Society of American Journal* 66 (6): 1947-1956.
- Seguel, O. 1997. Efectos del bioabono sobre las propiedades físicas de un suelo con cultivo de tuna. Memoria Ingeniero Agrónomo. Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Agronómicas. Santiago, Chile. 63 p.
- Sellés, G., R. Ferreyra, G. Contreras, R. Ahumada, J. Valenzuela y R. Bravo. 2003. Manejo del riego por goteo en uva de mesa cv. Thompson Seedless cultivada en suelos de textura fina. *Agricultura Técnica* 63 (2):180-192.
- Van Zyl, J.L. 1988. Response of grapevine to soil water regimes and irrigation systems. pp: 30-43. In: Van Zyl, J.L. (Ed.). *The grapevine root and its environment*. Department of Agriculture and Water Supply, Pretoria, South Africa. 146 p.
- Williams, L.E. and T.J. Trout. 2005. Relationship among vine- and soil-based measures of water status in a Thompson seedless vineyard in response to high-frequency drip irrigation. *American Journal of Enology and Viticulture* 56 (4): 357-366.
- Zhou, B., M. Shao and H. Shao. 2009. Effects of rock fragments on water movement and solute transport in a loess plateau soil. *Comptes Rendus Geoscience* 341 (6): 462-472.

APÉNDICE I

Curva de calibración para la sonda FDR Diviner 2000.



APÉNDICE II

Descripción morfológica del suelo del estudio.

Profundidad (cm)	Descripción
<p style="text-align: center;">A_p 0 – 33</p>	<p>Franco arcillosa, plástico y muy adhesivo, friable en húmedo; estructura de bloques subangulares, medios, fuertes, que rompen a microagregados. Poros finos, medios y gruesos abundantes. Presencia de macroporos. Actividad biológica abundante y presencia de coprolitos. Raíces finas, medias y gruesas escasas. Gravas finas y medias angulares, escasas. Límite lineal claro.</p>
<p style="text-align: center;">B₁ 33 – 48</p>	<p>Franco arcillo arenosa, plástico y muy adhesivo; friable en húmedo; estructura de bloques subangulares, medios, débiles. Poros finos comunes, medios y gruesos abundantes. Raíces medias escasas. Gravas finas y medias angulares abundantes. Límite lineal claro.</p>
<p style="text-align: center;">B₂ 48 – 65</p>	<p>Franco arenosa, no plástico y adhesivo; friable en húmedo; estructura de bloques subangulares, medios tendientes a finos, débiles. Poros finos abundantes, medios comunes. Raíces medias escasas. Gravas finas abundantes, medias comunes. Límite lineal gradual.</p>
<p style="text-align: center;">B₃ 65 – 90</p>	<p>Franco arcillo arenosa, Plástico y adhesivo; estructura de bloques subangulares, medios y gruesos, fuertes. Poros finos y medios abundantes, gruesos escasos. Raíces medias escasas. Límite lineal claro.</p>
<p style="text-align: center;">B₄ 90 – 120</p>	<p>Franco arenosa, plástico y adhesivo; estructura de bloques subangulares, medios y gruesos, moderados. Poros finos abundantes, medios comunes. Raíces medias escasas. Gravas finas y medias, escasas.</p>

APÉNDICE III

Consumo de la humedad aprovechable del suelo (H.A.) en los distintos tratamientos.

Tratamiento	Nº riego	Contenido de agua al momento del riego (% bv)	Consumo de la H.A. (%)
T1	1	18,4	31
	2	21,9	6
	3	23,1	sin consumo H.A.
	4	23,1	sin consumo H.A.
	5	21,5	9
	6	24,6	sin consumo H.A.
	7	23,9	sin consumo H.A.
	8	24,7	sin consumo H.A.
	9	24,5	sin consumo H.A.
	10	23,3	sin consumo H.A.
T2	1	17,5	37
	2	18,1	33
	3	18,7	29
	4	19,0	26
	5	18,5	30
T3	1	25,3	sin consumo H.A.
	2	25,4	sin consumo H.A.
	3	25,7	sin consumo H.A.
	4	25,6	sin consumo H.A.
	5	25,8	sin consumo H.A.
	6	25,8	sin consumo H.A.
	7	25,1	sin consumo H.A.
	8	25,5	sin consumo H.A.
	9	24,9	sin consumo H.A.
	10	25,0	sin consumo H.A.
	11	25,5	sin consumo H.A.
	12	25,1	sin consumo H.A.
	13	25,6	sin consumo H.A.
	14	25,6	sin consumo H.A.
	15	25,2	sin consumo H.A.

APÉNDICE IV

Contenido de agua del suelo entre las hileras, en profundidad y a través del tiempo, al aplicar 28,4 mm (a, c, e; T1, T2 y T3, respectivamente) o 42,7 mm de agua en un riego (b, d, f; T1, T2 y T3, respectivamente), para distintos tratamientos. 0 h indica instante justo antes del inicio del riego. Línea vertical indica el contenido de agua a capacidad de campo del suelo (CDC) ponderado para el perfil del suelo.

