GOBIERNO DE CHILE
MINISTERIO DE AGRICULTURA
INSTITUTO DE INVESTIGACIONES AGROPECUARIAS
INIA

GOBIERNO DE CHILE
CORFO
INNOVA CHILE

INSTITUTO DE INVESTIGACIONES AGROPECUARIAS

MANEJO DEL RIEGO Y SUELO EN PALTO

Editores:
R. Ferreyra E.
G. Sellés van Sch.

ISSN 0717 - 4829

BOLETÍN INIA N° 160

GOBIERNO DE CHILE
MINISTERIO DE AGRICULTURA
INSTITUTO DE INVESTIGACIONES AGROPECUARIAS
INIA

GOBIERNO DE CHILE
CORFO
INNOVA CHILE

INSTITUTO DE INVESTIGACIONES AGROPECUARIAS

MANEJO DEL RIEGO Y SUELO EN PALTO

Editores:
R. Ferreyra E.
G. Sellés van Sch.

La Cruz, Chile, 2007

ISSN 0717 - 4829

BOLETÍN INIA - Nº 160

Manejo del Riego y Suelo en Palto

La presente publicación entrega los principales resultados obtenidos en el marco del proyecto "**Aumento de la Productividad del Palto a través del Mejoramiento de las Prácticas de Riego y Aireación del Suelo en la Zona Central del País**" desarrollado entre los años 2004 y 2007, con el apoyo financiero de INNOVA - CORFO.

Autores:
R. Ferreyra E.
G. Sellés van Sch.
P. Gil M.
R. Ruiz Sch.
C. Barrera M.
P. Maldonado B.
J. Celedón A.

Director responsable:
Robinson Vargas M.,
Director Regional INIA - V Región.

Corrector Técnico:
Fernando Rodríguez A.,
Subdirector de Investigación y Desarrollo, INIA - V Región.

Boletín INIA Nº 160

Cita bibliografica correcta:
Ferreyra, E., R.; Sellés, van Sch. (ed.) 2007. Manejo del Riego y Suelo en Palto. La Cruz, Chile. Instituto de Investigaciones Agropecuarias. Boletín INIA Nº 160. 120 p.

© 2007, Instituto de Investigaciones Agropecuarias, INIA,
Centro Regional de Investigación V Región, Chorrillos 86, La Cruz,
Telefonofax (56-33) 312366, Casilla 3, Correo La Cruz, Chile.

ISSN 0717 – 4829

Todos los derechos reservados. Este boletín no podrá ser reproducido parcial o totalmente, para cualquier uso, sin permiso expreso por escrito del autor.

Diseño y Diagramación : Jorge Berríos Villablanca
Impresión : Salesianos Impresores S.A.

Cantidad de ejemplares: 1.000

La Cruz, Chile, 2007.

Índice de Contenidos

Capítulo 1.
Introducción _____ 7

Capítulo 2.
Caracterización de los Suelos
de la V Región Cultivados con Palto _____ 9

Capítulo 3.
Efecto del Contenido de Aire
del Suelo en el Estado Hídrico
y Desarrollo del Palto _____ 13

Capítulo 4.
Asfixia Radicular: Su Manifestación
y Mitigación _____ 19
4.1 Baja producción del palto _____ 19
4.2 Síntomas de plantas con
asfixia radicular _____ 20
4.3 Causas de una baja aireación
en el suelo _____ 25
4.4 Cómo evitar la asfixia radicular
en los huertos de paltos _____ 26
4.4.1. Adecuación de los equipos
de riego _____ 26
4.4.2 Estrategias de manejo
del agua de riego _____ 26

Capítulo 5.

Manejo del Riego en Palto ____ 27
5.1 Programación de riego ____ 29
5.1.1 El clima y los requerimientos de riego ____ 29
5.1.2 Las características del cultivo y los requerimientos hídricos ____ 33
5.1.2.1 Evapotranspiración máxima del cultivo ____ 33
5.1.2.2 Desarrollo radicular ____ 36
5.1.2.3 Períodos críticos y efectos de déficit hídricos ____ 38
5.1.3 Las propiedades físicas del suelo y el manejo del riego ____ 39
5.1.3.1 Umbrales de riego ____ 43
5.1.4 Cómo elaborar un programa de riego en palto ____ 48
5.1.4.1. Tiempo de riego (cantidad de agua a aplicar) ____ 50
5.1.4.2 Frecuencia de riego ____ 51
5.1.4.3 Ejemplo de programación de riego en palto ____ 51
5.2 Control de riego ____ 56
5.2.1 Control del estado hídrico del suelo ____ 56
5.2.1.1 Uso de barrenos y calicatas ____ 57
5.2.1.2 Humedad del suelo ____ 58
5.2.1.3 Control del estado hídrico en la planta ____ 62
5.2.1.3.1 Potencial hídrico xilemático ____ 62
5.2.1.3.2 Microvariación del diámetro de troncos ____ 75
5.2.2 Sensibilidad y variabilidad de los indicadores del estado hídrico de las plantas ____ 86

Capítulo 6.
Recuperación de un Huerto de Palto var. Hass con Problemas de Asfixia Radicular: Un Estudio de Caso ____ 91
6.1. Descripción del área ____ 91
6.2 Equipo de riego ____ 92
6.3 Condición inicial de los árboles ____ 93
6.4 Prácticas y manejos realizados para recuperar el huerto ____ 94

Capítulo 7.
Manejo del Suelo y Nutrición en Suelos con Problemas de Aireación ____ 101
7.1 Decaimiento del palto y su relación con problemas físicos del suelo ____ 101
7.2 Decaimiento y problemas nutricionales ____ 103
7.3 Aireación y problemas químicos del suelo ____ 106
7.3.1 Dinámica del hierro en el sistema suelo-planta ____ 107
7.4 Alternativas de manejo en la solución de los problemas ____ 110

Literatura Citada ____ 113

INTRODUCCIÓN

A nivel mundial, los rendimientos promedios de los huertos de palto o aguacate (*Persea americana* Mill.) son bajos en comparación con otras frutas de pulpa. Esto se debe principalmente a que para producir frutos de semilla grande y ricos en aceite se requiere de un alto costo en fotosintatos (Wolstenholme, 1986). En Chile hay huertos que mantienen producciones estables de alrededor de 25 ton/ha, sin embargo el rendimiento promedio de los huertos adultos está alrededor de las 9 ton/ha. Esta baja producción se debe principalmente a problemas de asfixia radicular, ya que el palto es muy sensible a la falta de aire en el suelo y la mayoría de las plantaciones en el país se han realizado en terrenos con baja capacidad de aire, entre 15 y 20%, y alta densidad aparente, entre 1,1 y 1,4 gr/cm^3 (Nagera *et al.*, 2006).

Los suelos de donde es originario el palto son andisoles, derivados de cenizas volcánicas (Anguiano-Contreras *et al.*, 2003), los cuales se caracterizan por presentar alta capacidad de aire, cercana al 46%, baja densidad aparente, entre 0,5 y 0,8 gr/cm^3, y un pH ácido, entre 5 y 6.

Salazar y Cortés (1986) encontraron que las raíces del palto var. Fuerte, se desarrollan mejor en suelos arenosos, con alta macroporosidad, que en suelos arcillosos. Una explicación para esto podría ser

el mayor nivel de oxígeno que presentan los suelos de alta macroporosidad, ya que estudios han demostrado que las raíces de ciertas variedades de palto como son Scott, Duque y Topa Topa no crecen cuando la tasa de difusión de oxígeno es inferior a 0,20 $\mu g/cm^2/min^{-1}$ (Valoras *et al.*, 1964). Por otra parte, Stolzy *et al.* (1967) informa que plantas de palto var. mexícola, que crecen en suelos con una tasa la difusión de oxígeno menor a 0,17 $\mu g/cm^2/min^{-1}$ tienen entre un 44 a un 100% de daño en su sistema radicular. Ferreyra *et al.* (2006) señala que el palto var. Hass, sobre portainjerto mexícola, se desarrolla mejor en suelos arenosos, de alta capacidad de aire, que en suelos francos, con tasas de difusión de oxígeno inferiores a 0,17 $\mu g/cm^2/min^{-1}$.

Por lo indicado anteriormente, uno de los principales factores que afecta la producción y calidad de la fruta, sobre todo en condiciones de suelo desfavorables para el desarrollo del palto, es una inadecuada relación entre el agua y el aire en la zona de la rizósfera. En este boletín se analizan diferentes factores que afectan la relación agua-aire en el suelo y se discuten prácticas de manejo que ayudan a mitigar estos problemas.

Los Editores.

CARACTERIZACIÓN DE LOS SUELOS DE LA V REGIÓN CULTIVADOS CON PALTO

R. Ferreyra E., G. Sellés van Sch., C. Barrera M.

Las plantaciones de palto en Chile se encuentran principalmente en dos grupos de tipos de suelos, el primero de ellos son los alfisoles de origen aluvial, textura franca, alcalinos y pobres en materia orgánica. El segundo grupo está representado por suelos de cerros de origen granítico y/o basáltico, de textura franco arcilloso, desuniformes y pobres en materia orgánica. Ambos grupos de suelos presentan características físicas y químicas distintas a los andisoles de donde es originario el palto (Anguiano-Contreras *et al.*, 2003).

De trabajos realizados por Nagera *et al.* (2006) en la V Región, donde se concentra más del 80% de las plantaciones de palto, se desprende que al año 2002, habían 2.176 huertos con este cultivo, abarcando una superficie de 11.422 ha.

El 66,5% de los paltos en la V Región se encuentran plantados en suelo con un pH (en agua) superior a 7,0 y un 48,2% superior a 7,5 (**Figura 1**). Según Razeto (1993), el palto limita su crecimiento en suelos con pH superior a 7,0. Respecto de esta propiedad química, en la V Región se observan dos situaciones contrastantes: suelos de bajo pH, posiblemente aso-

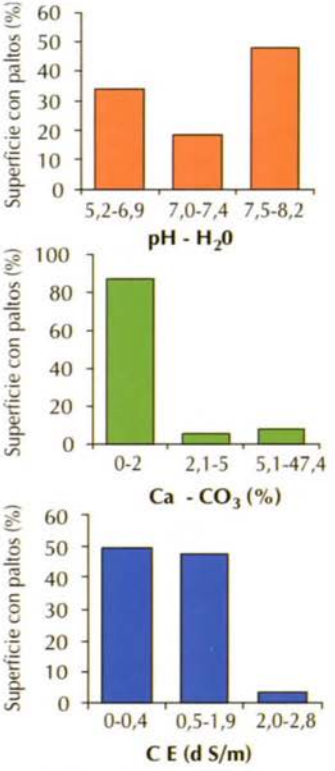


Figura 1. Superficie cultivada con palto de acuerdo a tres propiedades químicas de los suelos en la V Región de Chile.
(pH en el agua, carbonato de calcio ($CaCO_3$) y salinidad (CE en dS/m)

ciados a cerros y plantaciones más recientes; y suelos alcalinos, con problemas de pH, probablemente asociados a los suelos bajos en el valle. Un 10% de la superficie plantada con paltos se encuentra en suelos con más de un 5% de $CaCO_3$ totales y un 6% se ubica en el rango medio (de 5 a 2%) lo que origina síntomas visibles de clorosis férrica (Razeto, 1993; Gardiazábal, 2004).

En la V Región aproximadamente un 5% de los huertos está plantado en suelo con conductividad eléctrica (CE) superiores a 2 dS/m que según Ayers & Westcot (1985), provoca un 10% de pérdidas de rendimiento.

Respecto a las propiedades físicas del suelo, cerca de un 5% de los huertos plantados con paltos (**Figura 2**) presenta un contenido de arcilla igual o superior al 40% y solo un 4% presenta una densidad aparente (Da) menor a 1 g cm^{-3}.

Ninguno de los suelos supera el 40% de capacidad de aire (volumen de aire del suelo a 0,33 atmósfera) y más de la mitad se encuentra en un

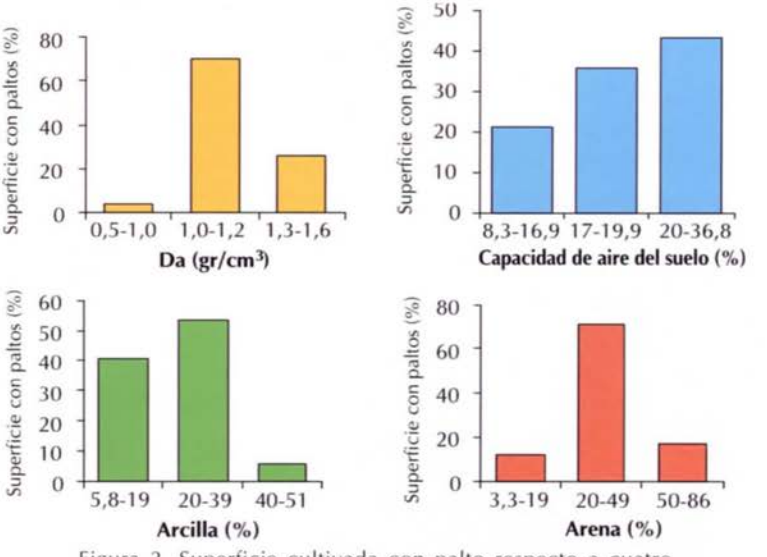


Figura 2. Superficie cultivada con palto respecto a cuatro propiedades físicas de los suelos en la V Región de Chile.
*Da: Densidad aparente

rango entre 8,3% y 20%. Ferreyra *et al.* (2005), indica que el palto para desarrollarse en forma adecuada requiere de un porcentaje de aire en el suelo del orden del 27%.

El **Cuadro 1** muestra las características físicas y químicas de las principales series de suelos plantadas con paltos en la V Región, las cuales representan el 70% de la superficie total de las plantaciones de palto en esta zona.

Cuadro 1. Características físicas y químicas de las principales series de suelos donde se cultiva el palto en la V Región.

Nombre	Superficie ha	pH H_2O	$CaCO_3$ %	Da g cm^{-3}	Capacidad de aire %	C E dS m^{-1}	Arcilla %	Arena %
As Challay	2.122	5,8	0,0	1,15	22,3	0,1	18,1	43,7
Ocoa	1.423	7,5	0,0	1,16	18,9	1,4	21,6	35,6
Chagres	728	7,2	0,0	1,10	20,2	0,1	30,7	25,2
Hijuelas	647	7,5	0,0	1,13	18,7	1,5	20,8	29,4
Lo Vázquez	610	6,7	0,0	1,40	16,2	0,3	14,8	55,8
Calera	431	8,2	2,8	1,21	17,8	0,7	20,4	31,3
Pullalli	407	7,2	0,0	1,00	23,4	0,5	30,8	13,6
Encón	385	7,6	0,0	1,60	13,5	0,3	5,8	74,8
Calle Larga	351	6,6	0,0	1,16	18,3	0,1	23,3	28,6
San Isidro	320	7,8	6,0	0,96	24,8	1,0	35,0	20,5
La Ligua	311	7,6	0,0	1,17	17,5	0,6	30,4	24,3
As La Parva	300	7,5	0,0	1,02	16,6	0,2	50,5	16,8
Hualcapo	285	7,6	0,0	1,45	15,0	1,6	8,4	67,3
Milagro	269	7,8	0,0	1,45	15,5	0,8	9,2	69,3
Putaendo	250	7,2	0,0	1,06	22,9	0,9	23,9	25,6
Catemu	241	7,3	0,0	1,30	16,6	2,0	17,1	43,1
Pataguas	199	8,0	3,5	1,10	21,4	1,4	22,0	20,4
Cristo Redentor	195	6,4	0,0	1,16	17,8	0,1	30,2	25,1
Pocuro	189	6,7	0,0	1,19	21,3	0,1	18,0	40,8
Lo Campo	168	8,0	47,4	1,07	18,8	1,3	33,8	19,5
Sta. Rosa de Casablanca	156	5,6	0,0	1,35	20,1	0,2	7,5	76,3
Colunquén	139	8,2	44,7	1,05	19,2	0,5	37,0	11,9
San Lorenzo	124	7,8	0,0	1,07	24,3	1,0	22,3	44,0
As la Manga	101	7,4	0,0	1,17	21,1	0,2	32,1	46,9

Adaptado de CNR (1979), SAG (2002).

Las nuevas plantaciones de palto en Chile se han realizado principalmente en laderas de cerro, donde generalmente se presentan condiciones heterogéneas de textura y profundidad efectiva de suelo (desde 30 cm a 1,5 m). El material parental de los cerros de la zona central es de origen granítico y basáltico, por lo tanto son suelos con texturas arcillosas en su mayoría. Además, se presentan pendientes que varían desde 15% a más de 100% (Ferreyra *et al.*, 2001).

El potencial productivo del cultivo del palto es cercano a las 30 ton/ha. En zonas donde se presentan suelos texturas de tipo franco arenoso, con capacidad de aire del 27%, como por ejemplo laderas de cerro en la localidad de Panquehue, es posible llegar a rendimientos promedios de 20 a 25 ton/ha de forma perdurable en el tiempo y con ausencia de plantas decaídas. Sin embargo, al realizar un recorrido por otras zonas de la V Región, es posible observar que muchos huertos presentan sectores con árboles decaídos, la mayoría ubicadas en las partes bajas de las laderas de cerro. En estas plantaciones se observan plantas de menor desarrollo foliar o amarillentas y en otros casos se observan plantas muertas o bien rebajadas.

Hace un tiempo el decaimiento de los paltos se atribuía a la enfermedad Tristeza del Palto, causada por el hongo *Phytophthora cinnamomi,* pero la localización de este problema en zonas bajas de los cerros o bien en depresiones causadas por la irregularidad de la topografía de las laderas, sumado a que el decaimiento ocurre en forma pausada y que los pH de los suelos son más bien neutros a básicos, hacen pensar que este problema corresponde más bien a un estrés de tipo abiótico debido a la acumulación excesiva de agua en el suelo, lo que provocaría el problema de asfixia o hipoxia radicular, el cual se manifiesta generalmente luego del 4º año de la plantación.

Las razones de la acumulación de agua en las zonas bajas de las plantaciones en ladera puede atribuirse a que los cerros presentan horizontes de suelo de textura franca a franca arcillosa, seguido de roca, lo que provoca un pobre drenaje en profundidad que se manifiesta principalmente en un movimiento descendente subsuperficial. Por otra parte, el drenaje del agua de los equipos de riego, ocurre principalmente en las zonas bajas.

EFECTO DEL CONTENIDO DE AIRE DEL SUELO EN EL ESTADO HÍDRICO Y DESARROLLO DEL PALTO

R. Ferreyra E., G. Sellés van Sch., P. Gil M., C. Barrera M., P. Maldonado B., J. Celedón A.

Los factores de estrés que más restringen el desarrollo de las plantas y afectan la productividad son el déficit hídrico, el estrés térmico, las heladas, la salinidad y el déficit de oxígeno en el suelo (Taiz y Zeiger, 1991). La falta de oxígeno en el suelo induce múltiples disfunciones en las plantas, se inhibe la fotosíntesis y el transporte de carbohidratos, se disminuye la absorción de macronutrientes debido a la muerte de raíces y pérdida de micorrizas. La falta de oxígeno también altera el balance hormonal en las plantas, debido al incremento del etileno en la atmósfera del suelo (Kozlowski, 1997).

Estudios realizados con paltos en macetas bajo diferentes regímenes de riego, indican que inundaciones parciales redujeron las concentraciones de nitrógeno, fósforo, potasio, magnesio, zinc, cobre y boro, aumentando manganeso, hierro, sodio y cloro en la parte vegetativa de la planta, en comparación con árboles creciendo bajo un régimen de riego normal (Stolzy *et al.*, 1967; Labanauskas *et al.*, 1978).

La falta de oxígeno en el suelo también afecta el metabolismo del sistema radicular y produce el cierre de estomas (Lafitte, 2001).

Según Ferreyra *et al.* (2006), paltos en terrenos arenosos con un contenido de aire en el suelo (Ea) de 29%, presentan conductancias estomáticas (gs), de 0,43 cm/s, en cambio en suelo franco con un Ea de 7,38%, la conductancia estomática (gs) disminuye a 0,19 cm/s (**Cuadro 2**). Sin embargo estas variaciones en el contenido de aire en el suelo (Ea) no afectan el estado hídrico de la planta ya que los paltos presentaron, en estas condiciones, un potencial hídrico xilemático (PHx) similar, los cuales varían entre -0,33 a -0,66 MPa (**Cuadro 3**). Ferreyra *et al.* (2005) señala que los valores de PHx en paltos con buen suministro hídrico, fluctúan entre -0,4 a -0,5 Mpa.

Cuadro 2. Efecto del contenido de aire del suelo (Ea) en la conductancia estomática (gs) medida a la 14 horas.

Períodos de crecimiento vegetativo	Tratamientos							
	T0		T1		T2		T3	
	gs cm s^{-1}	Ea %	gs cm s^{-1}	Ea %	gs cm s^{-1}	Ea %	gs cm s^{-1}	Ea %
Menor	0.12a	7.48	0.29b	28.02	0.19a	22.59	0.15 a	12.24
Mayor	0.26a	7.28	0.56b	29.98	0.30a	21.29	0.34a	16.23
Promedio	0.19	7.38	0.43	29.0	0.24	21.94	0.25	14.24

T0 = Franco;
T1 = Arenoso;
T2 = Franco arenoso;
T3 = Franco arcilloso.
Letras distintas indican que hubo diferencia significativa de acuerdo a la prueba de comparación múltiple de Tuckey ($\alpha = 0.05$).

Cuadro 3. Efecto del contenido de aire en el suelo (Ea) en el Potencial hídrico xilemático (PHx) medido a medio día.

Tratamiento	Fecha							
	6/12/2004		10/12/2004		26/01/2004		Promedio	
	Ea	PHx	Ea	PHx	Ea	PHx	Ea	PHx
T0	8.5 a	-0.34 a	7.8 a	-0.54 a	7.1 a	-0.51 a	7.5 a	-0.46 a
T1	27.7 b	-0.37 a	27.4 b	-0.57 a	28.9 b	-0.49 a	29.1 b	-0.47 a
T2	24.5 b	-0.36 a	19.9 c	-0.34 a	26.2 b	-0.55 a	20.4 c	-0.42 a
T3	11.2 a	-0.33 a	10.5 a	-0.48 a	17.7 ab	-0.66 a	14.4 d	-0.49 a

T0= Franco;
T1= Arenoso;
T2= Franco arenoso;
T3= Franco arcilloso.
Letras distintas indican que hubo diferencia significativa de acuerdo a la prueba de comparación múltiple de Tuckey ($\alpha = 0.05$).

El efecto del Ea sobre la gs y no sobre el PHx se puede deber a que los estomas responden tanto a variables ambientales como al estado hídrico de la planta, sin embargo, también responden a señales no hidráulicas, provenientes del sistema radicular, las que pueden estar asociadas a la generación de ácido abcísico (ABA) (Glenn, 2000).

Por otra parte, al disminuir el contenido de aire en el suelo, el palto reduce su crecimiento. En el **Cuadro 4** y en las **Fotos 1** y **2** se muestra que los paltos se ven afectados en su desarrollo (Índice de área foliar, IAF) y comienzan a presentar síntomas de asfixia radicular con niveles de aire en el suelo de 20%. Por otra parte, las plantas presentan un buen desarrollo con niveles cercanos al 30% de aire en el suelo.

Cuadro 4. Efecto del contenido de aire en el suelo (Ea) en el índice de área foliar (IAF) del palto var. Hass sobre portainjerto mexícola.

Ea	IAF (m^2)
T0 7,46%	1,58 a
T1 29,08%	4,40 b
T2 20,44 %	2,44 a
T3 14,36%	2,55 a

T0: suelo franco;
T1: suelo arenoso;
T2: suelo franco arenoso;
T3: suelo franco arcilloso.
Letras distintas indican que hubo diferencia significativa de acuerdo a la prueba de comparación múltiple de Tuckey ($\alpha = 0.05$).
Fecha medición 06-02-06.

En la mayoría de las especies vegetales, el contenido de aire en la zona de raíces debe ser superior al 10% del volumen total de suelo (Sellés *et al.*, 2003), sin embargo en palto se estima que el límite adecuado para el desarrollo de raíces se encuentra alrededor del 27% (Ferreyra *et al.*, 2006), por lo cual, plantaciones en suelos de textura fina o mal estructurado, con mal manejo del riego, pueden provocar restricciones en el desarrollo de raíces y serias consecuencias en la productividad de la planta (Ferreyra *et al.*, 2006).

Foto 1. (Izquierda) Palto creciendo con 29% de aire en el suelo.

Foto 2. (Derecha) Paltos creciendo con 7% de aire en el suelo.

El contenido de aire en la zona de raíces, depende de la capacidad de aire del suelo (contenido de aire del suelo a capacidad de campo) y del manejo del riego. La capacidad de aire está relacionada con la textura y estructura del suelo. En el **Cuadro 5,** se presentan valores de capacidad de aire para diferentes suelos y en la **Figura 3,** se puede apreciar el efecto del riego de alta frecuencia en el contenido de aire en la zona de raíces en suelos de textura arenoso y franco.

Cuadro 5. Capacidad de aire de diferentes suelos de la V Región medidas *in situ* y el contenido de aire en el suelo al regar las plantas en forma frecuente (pulsos).

Tipos de Suelo	Da (g/cm^{-3})	PT (%)	CC (%)	Micro poros (%)	Capacidad de aire (%)	Arcilla (%)	Limo (%)	Arena (%)
Franco (T0)	1,25	52,83	31	38,75	14,08	24,92	42,95	32,13
Arenoso (T1)	1,41	46,79	12	16,92	29,87	0,10	6,50	93,40
Franco arenoso (T2)	1,02	61,50	44	44,88	16,62	3,04	21,70	75,26
Franco arcilloso (T3)	1,24	53,21	29	35,96	17,25	34,95	43,47	21,57
Arcilloso (T4)	1,30	50,86	30	38,64	12,22	67,48	16,39	16,13

Da = Densidad Aparente; PT = Porosidad Total; CC = Capacidad de Campo

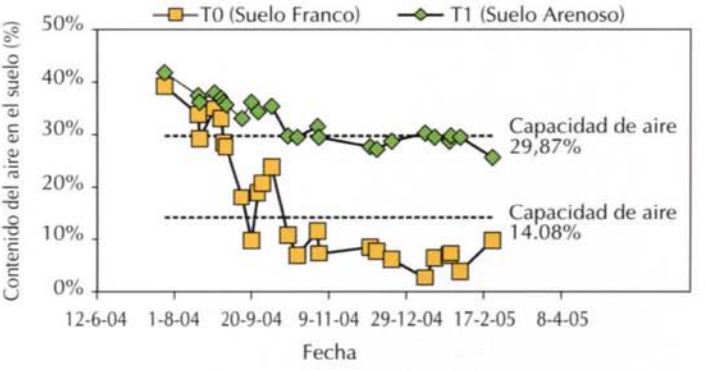


Figura 3. Variación del Contenido de aire (%), en dos suelos regados con alta frecuencia (cuatro pulsos diarios).

Las raíces pueden tomar el oxígeno desde el suelo, sin embargo esta cantidad sólo representa una pequeña fracción del total de las necesidades. Es por esto que la mayor parte del oxígeno necesario debe provenir de la atmósfera, a través del suelo y del espacio poroso, para luego entrar a la raíz donde es utilizado (Cook y Knight, 2003). Por lo cual el nivel de oxígeno en el suelo está relacionado con su velocidad de difusión.

La velocidad de difusión del oxígeno a través del agua es diez mil veces más lenta que en el aire (Letey y Stolzy, 1964; Ansorena, 1994). Por lo cual, uno de los grandes problemas que afectan la difusión del oxígeno en la zona de raíces, es un exceso de humedad o un mal drenaje (Kozlowski, 1997).

La tasa de difusión de oxígeno (ODR) es una medida de la movilidad de oxígeno en el suelo y está directamente relacionada con el contenido de aire del suelo. Ferreyra *et al.* (2006) señala que con contenidos de aire cercanos al 17% se registraron ODR de 0,17 $\mu g/cm^2/min^1$, valores inferiores al límite de difusión de oxígeno establecido como adecuado para el desarrollo del cultivo del palto (**Figura 4**).

Varios estudios han demostrado que las raíces de ciertas variedades de palto, como son: Scott, Duque y Topa Topa, no crecen cuando la tasa de difusión de oxígeno es menor a 0,20 $\mu g/cm^{-2}/min^1$ aproximadamente (Valoras *et al.*, 1964). Posteriormente, Stolzy *et al.* (1967) informó que

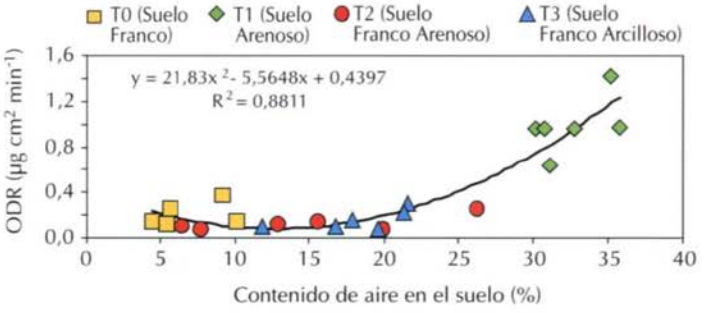


Figura 4. Relación entre la tasa de difusión de oxígeno (ODR, µg cm^{-2} min^{-1}) y el contenido de aire del suelo (%).
Letras distintas indican que hubo diferencia significativa de acuerdo a la prueba de comparación múltiple de Tuckey (α =0,05)

plantas de palto de variedad mexícola que crecen en suelos con una tasa la difusión de oxígeno menor a 0,17 $\mu g/cm^{-2}/min^{1}$ tienen entre un 44 a un 100% de sus sistemas radiculares en un estado de decaimiento. Ferreyra *et al.* (2006) indica que en el palto Hass sobre portainjerto mexícola, disminuye la gs cuando la ODR está cercana a los 0,17 $\mu g/cm^{-2}/min^{1}$.

La concentración de CO_2, O_2 y etileno en el suelo afecta directamente el crecimiento y funcionamiento de la raíz. La mayor parte de los cultivos sólo pueden desarrollarse en forma vigorosa si la concentración de CO_2 alrededor de sus raíces no es demasiada alta, la de O_2 demasiado baja y no exista la presencia de sustancias tóxicas.

Ensayos realizados por Ferreyra *et al.* (2006) indican que en suelos arenosos la concentración de O_2 es superior que en suelos francos, registrándose valores aproximados de 18% y 10%, respectivamente (**Figura 5**). Estudios realizados por Valoras (1964), señalan que plantas que crecen con niveles menores al 1% de oxígeno se marchitan y mueren, sin embargo, con un nivel del 5% de O_2 las plantas no mueren, pero presentan quemadura en la punta de sus hojas. Las plantas que crecen con sus raíces en una atmósfera de suelo con concentraciones de oxígeno entre 10 y 21% presentan un rápido crecimiento. Esto también fue comprobado por Stolzy *et al.* (1967), quien indica que niveles menores a un 5% de oxígeno en la atmósfera del suelo puede dañar y dar muerte a la raíz del palto.

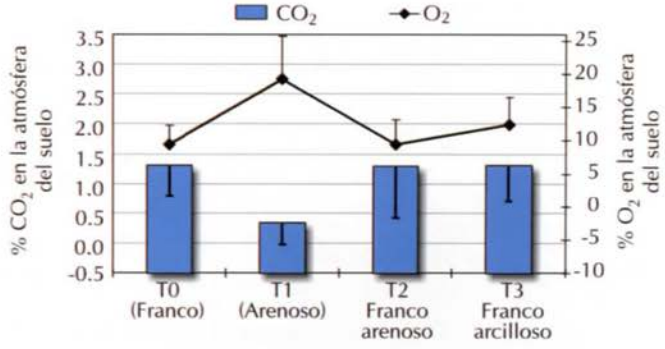


Figura 5. Concentración de O_2 y CO_2 (%) en suelos de diferente textura y tasa de difusión de oxigeno.
Letras distintas indican que hubo diferencia significativa de acuerdo a la prueba de comparación múltiple de Tuckey (α=0.05)

ASFIXIA RADICULAR: SU MANIFESTACIÓN Y MITIGACIÓN

R. Ferreyra E., G. Sellés van Sch., P. Gil M., C. Barrera M., P. Maldonado B., J. Celedón A.

4.1 Baja producción del palto

Una de las principales causas de los bajos rendimientos promedio en las plantaciones de palto en Chile es la asfixia radicular. Esto se debe a que los huertos están plantados en condiciones ambientales desfavorables de suelos. Estos suelos como se indicó anteriormente, presentan densidad aparente alta y baja capacidad de aire y, en muchos casos, se riegan en forma inadecuada para estas condiciones, lo cual agudiza este problema.

El palto comienza a presentar síntomas de asfixia radicular con niveles de aire en el suelo de 20% y presenta un buen desarrollo con niveles cercanos al 30% (Cuadro 4 del capítulo anterior).

Estos antecedentes han sido corroborados mediante observaciones de campo. En predios con capacidad de aire del suelo del 27% (**Foto 3**), no se presentan plantas con asfixia radicular, sin embargo, en huertos con 12% (**Foto 4**), es común encontrar plantas con este problema.

Foto 3. Palto creciendo en suelo con Capacidad de aire del suelo de 27% (suelo Franco Arenoso). Sin asfixia, rendimiento medio 25 ton/ha.

Nota: Capacidad de aire del suelo = Contenido de aire que tiene un suelo a capacidad de campo *in situ* o a 0,33 atmósfera en laboratorio. Macroporosidad = Contenido de aire que tiene un suelo a 0,06 atmósfera.

Foto 4. Paltos creciendo en suelos con capacidad de aire del suelo del 12% (suelo Franco arcilloso). Con Asfixia, rendimiento medio 8 ton/ha.

Otros factores de estrés que inciden en la baja productividad del palto son: salinidad, fertilidad y emboscamiento, entre otros. Sin embargo, el mal manejo del riego en suelos que presentan condiciones ambientales desfavorables es el factor que más afecta la producción de este cultivo.

4.2 Síntomas de plantas con asfixia radicular

Bajos contenidos de aire en el suelo deterioran el sistema radicular, para posteriormente, afectar la parte aérea. Cortos períodos deficientes en oxígeno, normalmente derivan en reducción en el crecimiento y/o muerte del sistema radicular. Esto incide en el crecimiento de los brotes, inhibición de la expansión de las hojas, moderada a severa abscisión de hojas (Stolzy *et al.*, 1967; Schaffer *et al.*, 1992) y en quemaduras en la punta de las hojas (Valoras, 1964).

Los síntomas varían dependiendo del contenido de aire del suelo. A continuación se muestran síntomas que presentan los árboles con asfixia radicular (**Fotos 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 18,** y **19**) al compararlos con árboles normales (**Fotos 5, 6, 16,** y **17**).

Árboles normales

Foto 5 y 6.
Árboles con
crecimiento normal.

Efecto de la asfixia en el sistema radicular.

Foto 7. Escasas raíces
en el camellón.

Foto 8. Escasas raíces bajo la hojarasca.

Efecto de la asfixia radicular en el desarrollo del palto

Foto 9.
Árboles con hojas angostas e inclinadas hacia al suelo.

Foto 10.
Caída de hoja abundante durante la floración.

Foto 11.
Caída de fruta abundante a fines de primavera y/o finales de verano.

Efecto de la asfixia radicular en el desarrollo del palto

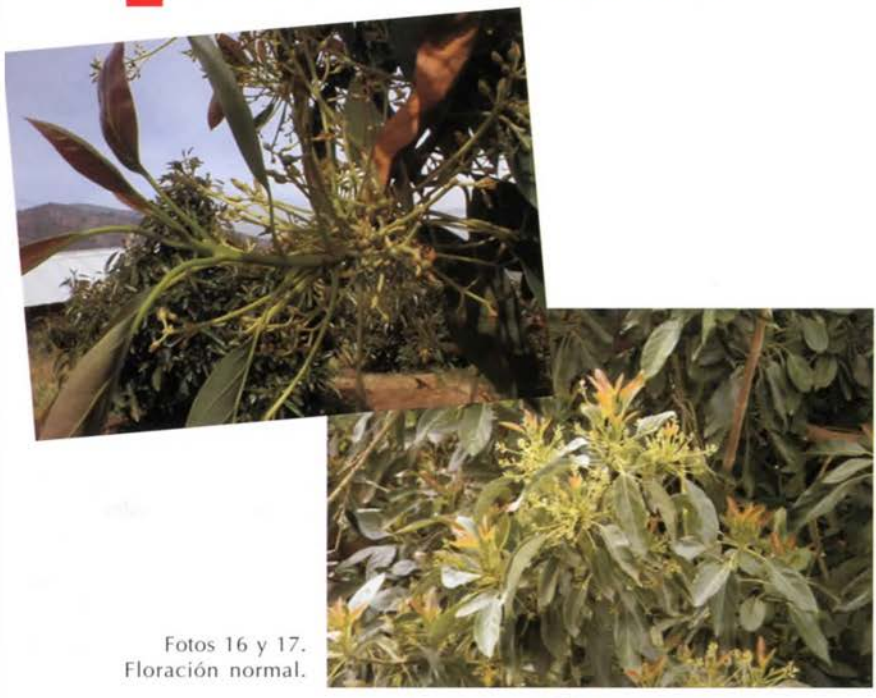
Foto 12. Desfoliación de brotes de la temporada; golpe de sol en la fruta; Hojas angostas.

Foto 13. Árbol desfoliados con exceso de floración. Árboles desfoliados en la zona de mayor acumulación de agua, porejemplo, en final de líneas de riego.

Foto 14. Árboles desfoliados, fruta bajo calibre. Color follaje verde amarillento, hojas angostas.

Foto 15. Árboles con puntas quemadas, en condiciones de baja salinidad

Efecto de la asfixia radicular en la floración



Fotos 16 y 17.
Floración normal.

Foto 18 y 19.
Floración en plantas con asfixia.
Floración muy abundante, pedúnculos cortos. Mucho aborto floral.

4.3 Causas de una baja aireación en el suelo

El contenido de aire en la zona de raíces depende del suelo en el cual se realizó la plantación. Sin embargo, el contenido de aire del suelo puede disminuir por las siguientes razones:

- No se respetaron los drenajes naturales de agua de lluvia en el predio, por lo cual el agua de invierno es evacuada lentamente desde el huerto, presentándose sectores con asfixia radicular.
- Manejo del riego con contenidos de humedad altos, en suelos con baja capacidad de aire.
- Aplicación de cargas de agua excesivas en suelos con restricciones de drenaje en profundidad.
- Baja uniformidad de descarga entre emisores, lo que genera una entrega de caudales variable entre plantas, encontrándose situaciones, donde las cantidades de agua aplicadas a una planta difiere en más de 2 a 3 veces a la de otra del mismo sector de riego. La baja uniformidad de los emisores es producto de la obturación de los emisores; sector de riego con diferentes emisores; pérdidas de la goma en microaspersores autocompensados que regulan el caudal y/o válvulas de compuerta descalibrada, entre otras.
- Exceso de riego de los sectores bajos, debido a la descarga del agua de la red de riego luego de detener el equipo.
- Distribución inadecuada del agua en el suelo debido al bajo porcentaje de suelo mojado por el emisor; utilización de un modelo de microaspersor muy desuniforme en cuando a su forma de mojamiento y/o a la interferencia del agua del microaspersor por las ramas del palto (faldas), entre otros.
- Sectores de riego con diferentes tipos de suelo en cuanto a textura y profundidad.

Generalmente, más de alguna de las causas mencionadas pueden estar presentes en los huertos que tienen plantas con algún grado de asfixia radicular.

4.4 Cómo evitar la asfixia radicular en los huertos de paltos

Para enfrentar los problemas de asfixia radicular es necesario determinar en los huertos las causas de la baja aireación en el suelo, para luego ver si es necesario y posible adecuar los equipos de riego y aplicar estrategias de manejo del agua que permitan optimizar la relación agua/aire en la zona de raíces. Otra forma de enfrentar la asfixia radicular es utilizando patrones tolerantes a la falta de aire en el suelo. Sin embargo no se dispone de información que indique cómo responden los diferentes patrones existentes ante este problema ya que en la mayoría de los casos han sido evaluados considerando otros aspectos como la resistencia a *Phytophthora* y salinidad.

4.4.1. Adecuación de los equipos de riego

La adecuación de los equipos de riego se refiere a mejorar la uniformidad de la descarga entre emisores. Si el coeficiente de uniformidad está bajo el 80%, se debe limpiar emisores o cambiar la boquilla de los microaspersores; si las descargas de la red de riego, cuando los equipos han dejado de funcionar están dañando las plantas de los sectores bajos, poner válvulas antidrenantes (TNL); si existe suelo muy diferente en cuanto a textura y profundidad en una unidad de riego, se debe re-sectorizar el equipo.

4.4.2 Estrategias de manejo del agua de riego

Para tener un adecuado desarrollo de la parte aérea y radicular del palto es necesario evitar que las plantas estén sometidas a falta de agua o de oxígeno. Esta idea que parece tan sencilla es compleja de implementar en suelos de textura fina, ya que cada vez que se riega, aumenta el contenido de agua y disminuye la aireación en forma importante. Esto obliga a ser muy precisos en la aplicación del agua de riego, para evitar déficit o exceso de humedad.

Por lo indicado anteriormente, se debe conocer en la forma más exacta posible, la cantidad y oportunidad con que se debe aplicar el agua al cultivo, ya que cantidades en exceso, en suelos de baja capacidad de aireación, es muy posible que afecten el crecimiento aéreo y radicular del palto. En el capitulo 5, se trata este punto en profundidad.

MANEJO DEL RIEGO EN PALTO

R. Ferreyra E., G. Sellés van Sch., P. Gil M., C. Barrera M., P. Maldonado B., J. Celedón A.

El suelo, la planta y la atmósfera constituyen un sistema continuo, en el cual el suelo proporciona un anclaje mecánico a las plantas, además del almacenaje de agua y oxígeno que absorben las raíces. La atmósfera constituye una fuente de demandas de agua ilimitada y la planta es la unidad conductora entre el suelo y la atmósfera, ya que absorbe el agua del suelo, luego esta circula por el xilema, y finalmente sale a través de los estomas de las hojas hacia la atmósfera en un proceso conocido como transpiración.

El flujo de agua se produce en respuesta a un gradiente de energía o de potenciales que existe entre el suelo y la atmósfera, de acuerdo a la siguiente ecuación y representado por la **Figura 6**.

$$T = (\Psi h - \Psi a) / Rest = (\Psi s - \Psi h) / Rsp$$

Donde T, es la transpiración; Ψa, Ψh y Ψs son lo potenciales totales del agua en la atmósfera, en la hoja y en el suelo respectivamente; Rest es la resistencia estomática y Rsp, es la resistencia a la circulación del agua entre el suelo y la planta (resistencia de raíces y de los sistemas conductores hasta llegar a las hojas).

La transpiración constituye la fuerza motriz del ascenso de agua en las plantas. A nivel de las hojas, y en respuesta al gradiente de potencial hídrico entre la atmósfera y la hoja, se produce salida de agua desde es-

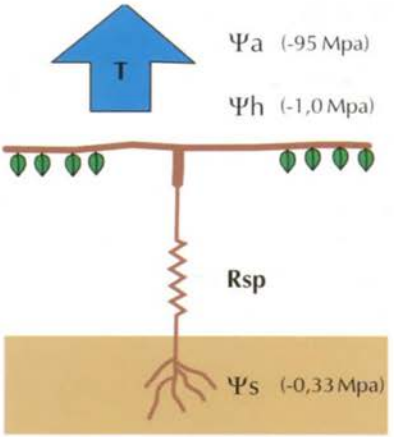


Figura 6. Flujo transpiratorio en respuesta a gradientes de potenciales hídricos en el sistema suelo-planta-atmósfera. Entre paréntesis se indican potenciales hídricos representativos en las diferentes partes del sistema.

tas en forma de vapor a través de los estomas, disminuyendo su potencial hídrico. Esta reducción de potencial hídrico foliar aumenta el gradiente entre la hoja y el suelo, lo que provoca un flujo de agua desde la zona de raíces. En la medida que la disponibilidad de agua del suelo disminuye (disminuye el potencial mátrico y la conductividad hidráulica del suelo), el flujo de agua hacia la planta es cada vez menor, llegando un momento en que la absorción no puede igualar a la transpiración, produciéndose un déficit hídrico en la planta, lo que induce un cierre estomático. Por otra parte los excesos de agua en el suelo provocan problemas de aireación, afectando el metabolismo radicular, lo que también afecta el desarrollo del cultivo en general. Por lo tanto es necesario mantener niveles de humedad adecuados en el suelo para satisfacer las necesidades de transpiración de las plantas y no provocar déficit o excesos hídricos, que afecten su crecimiento y desarrollo (**Figura 7**).

La aplicación de cantidades de agua concordantes con los requerimientos de las plantas y la eficiencia de la aplicación del sistema de riego que se utilice, permite ahorrar agua y energía, controlar las pérdidas de nutrientes por lixiviación y aumentar los rendimientos y calidad de la producción.

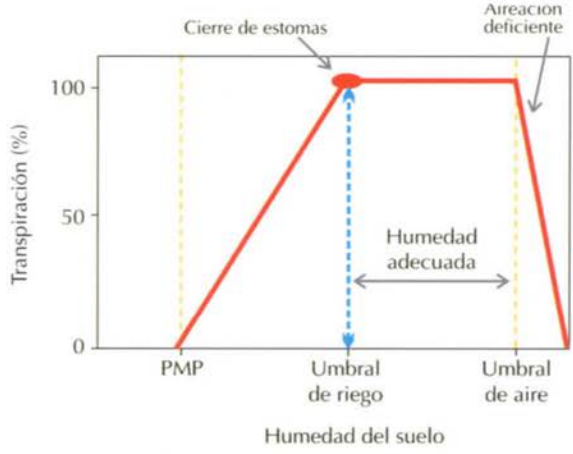


Figura 7. Relación entre el contenido de humedad del suelo y el desarrollo del cultivo. El rango de humedad adecuado es menor en cultivos de arraigamiento superficial y de mayor demanda evaporativa.

5.1 Programación de riego

La programación de riego consiste en estimar el agua requerida por el palto para su desarrollo, en la cantidad y momento adecuado, con el objetivo de maximizar su producción o bien obtener un producto de calidad definida.

La programación de riego hay que dividirla en dos etapas, una predicativa que corresponde a la programación propiamente tal y una etapa de control de ésta, a través de la cuantificación de la humedad del suelo y/o el estado hídrico de la planta.

La etapa predicativa de la programación de riego tiene por finalidad establecer *a priori* los tiempos y las frecuencias entre riegos que permitan obtener un adecuado desarrollo de los cultivos.

A objeto que la programación pueda funcionar adecuadamente es necesario considerar una serie de factores, entre los cuales intervienen:

- Condiciones del clima, que determinan la demanda evaporativa de la atmósfera o la evapotranspiración de referencia (potencial).
- Características propias del cultivo, como son su estado de desarrollo, el período fenológico, la distribución del sistema radicular.
- Características propias del suelo, tales como capacidad de retención de humedad, aireación, profundidad y su variabilidad espacial, entre otras.
- En el caso de utilizar equipos de riego localizados, se debe considerar las características propias de este, como es la intensidad de precipitación real del equipo o el caudal aplicado por planta.

5.1.1 El clima y los requerimientos de riego

El clima define la demanda evaporativa de la atmósfera, la que puede ser determinada a partir de la evapotranspiración de referencia (Eto).

La Eto se define como la cantidad de agua requerida para satisfacer la demanda de un cultivo bajo, denso, que cubre totalmente la superficie del terreno (pastos), en adecuadas condiciones fitosanitarias y con una

humedad del suelo óptima. La evapotranspiración de referencia refleja los efectos climáticos sobre la demanda de agua (anteriormente se hablaba de evapotranspiración potencial). En ella interviene por una parte la radicación solar, la cual depende de la latitud, la altitud, la época del año, la nubosidad y la hora del día. Por otra parte, también depende de las condiciones de viento, temperatura y humedad relativa del aire. En consecuencia, la Eto es independiente de las características de un cultivo particular.

La evapotranspiración de referencia se puede determinar por varios métodos. Uno de ellos es mediante la utilización de modelos físicos como es el caso de la ecuación de Penman-Monteith. Este método requiere de mediciones de radiación solar, viento, humedad relativa, temperatura y el uso de algunos coeficientes. La gran cantidad de información que requiere hizo que este método fuera poco utilizado con fines de programación de riego durante muchos años. Sin embargo, con el avance de la electrónica y la informática, se han desarrollado estaciones meteorológicas automáticas (**Foto 20**), de un costo razonable, que permiten medir estos parámetros en tiempo real y facilitar los cálculos de Eto mediante el uso de un computador. La ecuación de Penman-Monteith es la siguiente:

Penman-Monteith (base diaria o mensual)

$$ETo = \frac{0.408 \times (Rn - G) + \gamma \frac{900}{T + 273} \times U_2 \times (e_a - e_d)}{\Delta + \gamma \times (1 + 0.34 \times U_2)}$$

Donde:

ETo	:	Evapotranspiración del cultivo de referencia (mm d^{-1}).
Rn	:	Radiación neta en la superficie del cultivo (MJ m^{-2}).
G	:	Flujo de calor del suelo (MJ m^{-2}).
T	:	Temperatura diaria media (°C).
γ	:	Constante psicrométrica (KPa°C).
U_2	:	Velocidad del viento a 2 m del suelo (m s^{-1}).
$(e_a - e_d)$	:	Déficit de presión de vapor (KPa).
Δ	:	Pendiente de la curva de presión de vapor (KPa°C^{-1})

Otra forma de estimar la Eto, de uso corriente en Chile y en muchos otros países, es mediante un evaporímetro de bandeja clase A (**Foto 21**). Es necesario señalar que el uso e instalación de la bandeja de evaporación se encuentra normado internacionalmente, por lo cual es necesario respetar estas normas para obtener lecturas adecuadas y realizar una correcta interpretación de los valores que se miden.

Foto 20 (izquierda) estación meteorológica automática.
Foto 21 (arriba) Evaporímetro de bandeja clase A.

La bandeja proporciona una medida integrada de los efectos de radiación, viento, temperatura y humedad sobre la evaporación de una superficie de agua. Sin embargo, la estimación que se realiza no representa bien la Eto, por lo cual es necesario corregir sus lecturas por un coeficiente (kp), que toma en cuenta las características de ubicación de la bandeja y las condiciones particulares de viento y humedad relativa, de tal forma que:

$$\mathbf{Eto = kp \times Eb}$$

Donde kp es un coeficiente adimensional y Eb la evaporación de bandeja (mm/día).

En condiciones de campo, en general los valores de kp varían entre 0,6 a 0,8, pudiéndose considerar como promedio 0,7.

Es necesario tener presente que hay otros factores que inciden sobre las lecturas que se realizan en la bandeja, tales como la turbidez del

agua (algas), el grado de deterioro de la bandeja (falta de pintura) y no respetar las normas de instalación y manejo.

Existen discrepancias respecto de la metodología de medición de la Eto, entre el uso de la ecuación de Penman-Monteith y la bandeja de evaporación. Sin embargo, ambas determinaciones han mostrado estimar razonablemente la Eto, al compararlas con las mediciones de Eto realizadas en lisímetros de alta precisión (**Cuadro 6**).

Es recomendable contar con instrumentos para determinar la Eto en el predio, no obstante, es posible utilizar información local del área o predios vecinos. De no contar con información en tiempo real, se puede utilizar información histórica disponible, que permite tener una aproximación a la magnitud de la demanda evaporativa de la atmósfera a nivel mensual o diaria, según se requiera.

Para más detalles sobre determinación de evapotranspiración de referencia se puede recurrir al texto de la colección FAO de Riego y Drenaje Nº 24 (Requerimientos de agua de los cultivos) y texto de la colección FAO de Riego y Drenaje Nº 56 (Crop evapotranspiration, Guidelines for computing crop water requirements).

Cuadro 6. Relación entre estimaciones de Eto realizadas por la ecuación de Penman-Monteith y la bandeja de evaporación y la Eto medida en lisímetros de alta precisión (Allen *et al.*, 1994).

	Todos los meses			Mes de máxima		
Método	$\frac{ET\ eq}{ET\ lis}$	R	EE	$\frac{ET\ eq}{ET\ lis}$	R	EE
Penman - Monteith	101	99	36	97	99	47
Bandeja (FAO)	100	92	88	95	82	1,57

$\frac{ET\ eq}{ET\ lis}$: Relación entre ET calculada y ET medida en lisímetro

R : Coeficiente de correlación ET eq / ET lis.
EE : Error estándar de la regresión.

5.1.2 Las características del cultivo y los requerimientos hídricos

Cada cultivo tiene características propias que determinan sus pérdidas de agua así como también la absorción que realiza desde el suelo. Las pérdidas de agua de las plantas, además de la demanda evaporativa de la atmósfera, depende de su arquitectura (forma de la canopia, sistema de conducción), su estado desarrollo (área foliar) y de las características y comportamiento de los estomas, entre otros. La absorción de agua depende, además de la disponibilidad de agua en el suelo, de la distribución, densidad y sanidad del sistema radicular. En este sentido el área de suelo mojada por los emisores del sistema de riego localizado y las condiciones de aireación del suelo pasan a tener una significativa importancia en la programación del riego, tanto así que estos componentes se deben considerar ya en la etapa de diseño y selección del sistema de riego que se va a utilizar. Por otra parte, es necesario tener claro aspectos fisiológicos del cultivo, tales como los períodos críticos y el grado de respuesta que puedan presentar frente a algunas condiciones hídricas deficitarias.

5.1.2.1 Evapotranspiración máxima del cultivo

La evapotranspiración del cultivo que se produce sin restricciones hídricas se conoce como evapotranspiración máxima (Etm) y su magnitud depende de la Eto (condiciones climáticas), de las características del cultivo (estructura y resistencia estomática) y de su estado de desarrollo, principalmente del grado de cobertura o desarrollo foliar que esté presente, factores que se engloban en un coeficiente adimensional, denominado coeficiente de cultivo (kc). De esta forma, la Etm de un cultivo cualquiera puede ser estimada según la siguiente expresión.

$$\mathbf{Etm = Eto \times kc}$$

Donde Eto, representa la demanda evaporativa de la atmósfera o evapotranspiración de referencia y kc corresponde al coeficiente de cultivo.

El coeficiente de cultivo refleja la diferencia en el consumo de agua entre un cultivo particular (Etm) y la Eto de referencia (pasto corto).

El coeficiente de cultivo está estrechamente relacionado con el porcentaje de cubrimiento que tiene el palto, por lo cual la densidad de plantación es un punto importante a considerar. Por lo tanto, en la medida que aumenta la cobertura (el porcentaje de sombreamiento), aumenta el coeficiente de cultivo. En el **Cuadro 7,** se presentan coeficientes de cultivos (Kc) normalmente utilizados en palto.

Trabajos realizados por Faber *et al.* (1995) entre los años 1992 y 1995, en un suelo Molisol antiguo, de textura franca arenosa gruesa, indican que el cultivo del palto var. Hass sobre patrón Duke 7, presenta los máximos rendimientos cuando se aplican volúmenes de agua durante la temporada equivalente al 70% de la Eto (Kc = 0,7). Por el contrario, en los tratamientos donde se aplicaron cantidades de agua mayores, equivalentes al 110% de la Eto (Kc =1,1), los rendimientos disminuyen en un aproximadamente un 50%.

Por otra parte, en evaluaciones realizadas en tres huertos adultos de paltos var. Hass sobre patrón mexícola, en las zonas de Panquehue,

Cuadro 7. Valores de Kc para el cultivo del palto.

Meses	Kc (Chile) Gardiazaval 2000	Kc (California) www.avocado.org	Kc (California) R Snyder UC Davis	Kc (Israel) (Anónimo 2001)
Junio	0,65 -0,72	0,50	0,70	
Julio	0,65 -0,72	0,40	0,70	
Agosto	0,65 -0,72	0,50	0,70	
Septiembre	0,65 -0,72	0,55	0,70	
Octubre	0,65 -0,72	0,55	0,70	0,35-0,40
Noviembre	0,72 -0,75	0,55	0,70	0,45-0,50
Diciembre	0,72 -0,75	0,60	0,70	0,55-0,60
Enero	0,72 -0,75	0,65	0,70	0,60
Febrero	0,72 -0,75	0,65	0,70	0,60-0,65
Marzo	0,72 -0,75	0,65	0,70	0,60 -0,65
Abril	0,72 -0,75	0,60	0,70	0,60-0,65
Mayo	0,72 -0,75	0,55	0,70	0,50

Kc = Coeficiente de cultivo

Nogales e Hijuelas, se encontró que los agricultores utilizaban en otoño Kc mayores a los reportados en el Cuadro 7.

Por lo tanto, el coeficiente de cultivo (Kc) es un valor que hay que ajustarlo a las condiciones del predio mediante el control del estado hídrico del suelo y/o de la planta.

El palto consume agua durante todo el año y sigue la curva de demanda hídrica de la zona. En el Valle de Aconcagua el consumo de agua anual de paltos adultos regados por microaspersión es de aproximadamente 9.000 m^3/ha/año, si consideramos un Kc de 0,72 y una Efa del 85%. Los agricultores evaluados en el **Cuadro 8** están aplicando entre 12.952 y 11.800 m^3/ha/año, más el aporte de las precipitaciones invernales que alcanzan aproximadamente a 2000 m^3/ha.

Cuadro 8. Valores de Kc utilizados en tres huertos de paltos regados por microaspersión.

	Coeficiente de cultivo (Kc)					
	Panquehue [1]		Nogales [2]		Hijuelas [3]	
Meses	(2004-05)	(2005-06)	(2003-04)	(2004-2005)	(2004-05)	(2005-06)
Junio		**1,02**		0,40		0,26
Julio		**0,85**		0,60	0,15	
Agosto	**1,53**	0,43		0,67		0,43
Septiembre	**1,02**	**1,02**		0,51	0,34	0,27
Octubre	0,51	**1,28**		0,56	0,24	0,50
Noviembre	0,51	0,77		0,59	0,57	0,57
Diciembre	0,68	0,77	0,65	0,52	**1,09**	0,72
Enero	0,51	0,85	0,64	0,68	**1,05**	**1,14**
Febrero	0,68	1,53	0,66	0,71	0,67	**0,97**
Marzo	**1,02**	**1,02**	**0,80**	0,68	**0,83**	**1,02**
Abril	**0,94**	**1,62**	**0,79**	**0,84**	**1,59**	0,72
Mayo	**0,77**		0,35	0,44		

[1] Suelo franco arenoso; [2]Suelo Franco; [3]Suelo Franco Arcilloso.
Los valores de Kc, se estimaron a partir de los volúmenes de agua aplicados, determinados con un medidor volumétrico, y la evapotraspiración de referencia. (Eto) y suponiendo una eficiencia de aplicación del agua (Efa) de 85%.

En la **Figura 8,** se aprecia como se distribuye el consumo de agua a través del año en el cultivo del palto en el Valle de Aconcagua. En los meses de junio, julio y agosto, parte de este consumo es cubierto por las lluvias y entre octubre y marzo, el palto requiere aproximadamente el 80% del agua.

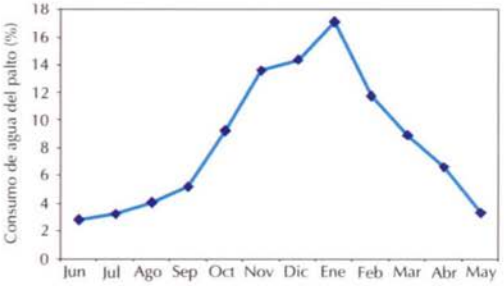


Figura 8. Distribución del consumo de agua del palto en porcentaje para los diferentes meses del año. Valle de Aconcagua.

5.1.2.2 Desarrollo radicular

El desarrollo radicular de las plantas está definido genéticamente, por lo cual varía de acuerdo a la especie y las características del portainjerto. Sin embargo, las condiciones del medio pueden limitar o estimular el desarrollo de las raíces (por ejemplo, las propiedades físicas del suelo). En términos generales, existe un equilibrio funcional entre el desarrollo del sistema radicular y el comportamiento de la parte área y productivo de las plantas: a mayor desarrollo radicular, mayor producción.

Normalmente las raíces de las plantas exploran y explotan un volumen de suelo mayor que el que humedece un emisor de riego localizado, en particular en zonas que se caracterizan por presentar precipitaciones invernales y tienen una alta capacidad de retención de humedad. Esto tiene como resultado que durante la temporada, una parte importante del sistema radicular se mantiene en un suelo seco. De hecho, muchas veces la cantidad total de agua que se aplica a cada planta es la adecuada, pero se entrega en forma muy puntual, provocando saturación de suelo y pérdidas de agua en profundidad. La distribución del agua en una área mayor, es la solución a este problema, sobre todo en suelo de textura fina (suelo arcilloso a franco arcilloso).

En el caso de riego por goteo, el tamaño del bulbo húmedo producido por los emisores está estrechamente ligado a las características físicas

del suelo. En suelos de textura fina, el movimiento lateral es mayor, por lo tanto más ancho es el bulbo de mojamiento. Por el contrario, en los suelos arenosos, el bulbo se alarga en profundidad. Una alternativa para aumentar el área de suelo mojada es usar más líneas de goteo con emisores de bajo caudal, o bien, cambiar el rotor del microaspersor de forma de aumentar el radio de mojamiento. Otra forma para mejorar la distribución de agua en el suelo, en particular en aquellos de textura fina (franco a franco-arcillosa), es mediante la aplicación de mayores volúmenes de agua en cada riego (golpes de agua), dejando luego períodos sin riego (2 a 4 días, riego en baja frecuencia) para permitir la aireación del bulbo de mojamiento.

Según estudios realizados en Quillota, el crecimiento radicular del palto ocurre entre noviembre a junio, lo que se correlaciona directamente con las fluctuaciones estacionales de temperaturas en el suelo y la presencia de otros "sink" de crecimiento en el árbol (Hernández, 2001). El palto presenta un sistema radicular relativamente poco profundo al compararlo con otros frutales. Es común encontrar que el 90% del sistema radicular se encuentra en los primeros 40 cm de suelo (**Figura 9**). Las raíces pueden ser más profundas en los suelos arenosos bien drenados o en suelo con restricción de suministro de agua. Con respecto a las características del sistema radicular del palto, éste es superficial, extensamente suberizado y relativamente ineficiente en la absorción de agua por su baja conductividad hidráulica y la poca presencia de pelos radicales. Con respecto a la distribución de raíces en el suelo, se puede señalar que en suelos arenosos éstas se encuentran mejor distribuidas que en suelos arcillosos. También se puede señalar que más del 80% de las raíces finas se encuentran entre 30 a 150 cm del tronco del árbol.

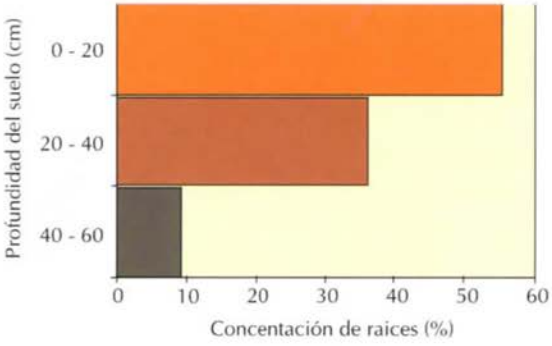


Figura 9. Distribución en profundidad del sistema radicular en palto en un suelo franco de la comuna de Nogales.

Un aspecto interesante de destacar es que dentro de las características anatómicas de la raíz del palto se encuentra un aerénquima (tejido parenquimático especializado en movimiento de aire), lo que explica todavía más la necesidad de mantener una buena aireación en la zona de raíces activas del palto.

Por lo indicado anteriormente, el agua de riego debe quedar entre 0 a 60 cm de profundidad, donde la mayoría de las raíces se encuentran en forma natural. Al reducir la cantidad de agua aplicada o aumentando el intervalo entre riego, generalmente se induce un sistema radicular más profundo.

5.1.2.3 Períodos críticos y efectos de déficit hídricos

En la programación de riego es necesario tomar en cuenta aspectos fisiológicos y fenológicos de las diferentes especies. No todos los procesos fisiológicos básicos de las plantas presentan el mismo grado de respuesta al déficit o exceso hídrico, existiendo algunos más sensibles que otros.

El periodo más sensible para el desarrollo del palto es durante la primavera e inicio de verano. Durante este periodo se desarrolla el sistema radicular (**Figura 10**), crece la parte vegetativa, se producen los mayores requerimientos de zinc, boro y calcio, se definen el número de células en el fruto, del cual depende el calibre potencial a obtener.

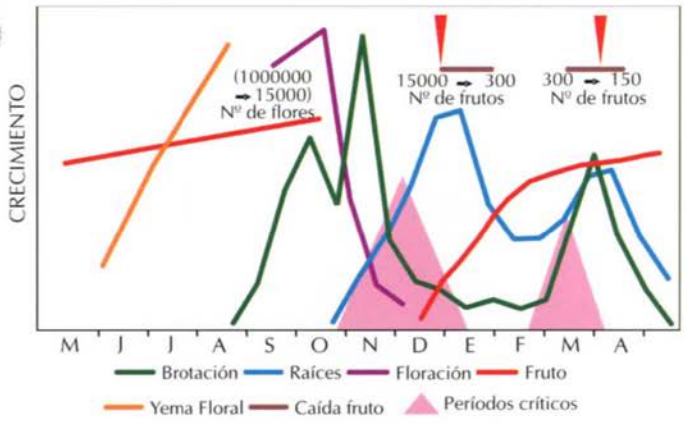


Figura 10. Períodos fenológicos del palto var. Hass en Quillota. Adaptado de Hernández (1991).

A fines de enero se alcanza prácticamente la totalidad del crecimiento ecuatorial del fruto (**Figura 11**). Un exceso de agua durante este periodo, en suelos de baja aireación, afectaría el desarrollo radicular, lo que produciría disminución del crecimiento y muerte de raíces por asfixia, limitando la absorción de agua y nutrientes, lo que afecta la cuaja, reduce el tamaño de los frutos y puede aumentar el número de frutos con desórdenes internos, como pardeamiento de la pulpa y bronceado vascular.

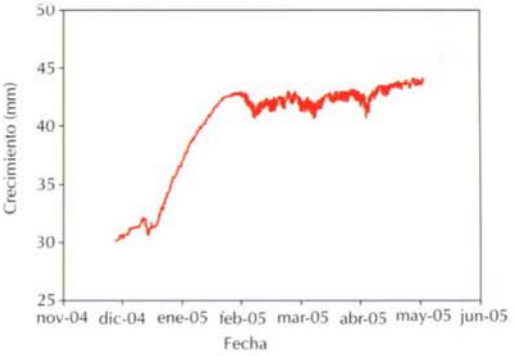


Figura 11. Crecimiento del diámetro ecuatorial del fruto medido con dendrómetro. Panquehue, temporada 2005.

Tener excesos de humedad en el suelo en primavera es fácil, ya que las demandas son bajas entre 1,0 a 3,0 mm/día. Por lo cual, un error de 1 mm/día en la determinación de la demanda en este periodo, puede producir serios problemas de aireación en suelos pesados o mal estructurados con baja capacidad de aire del suelo.

5.1.3 Las propiedades físicas del suelo y el manejo del riego

El desarrollo del sistema radicular de las plantas se ve directamente afectado por las condiciones de humedad, aireación, temperatura y de resistencia mecánica que presenta el suelo (**Figura 12**).

Figura 12. Factores que afectan directamente el desarrollo del sistema radicular de las plantas.

De los cuatro factores mencionados, el contenido de humedad es el que controla en la mayor parte de los casos el comportamiento de los restantes. La interrelación agua-aireación es opuesta a la interrelación agua-resistencia mecánica, en sus efectos sobre las raíces. De este modo, al incrementarse el contenido de humedad, disminuye la resistencia mecánica y en casos extremos puede reducirse la aireación y llegarse a un cuadro de asfixia radicular. Una interpretación similar debe ser considerada para la interrelación agua–temperatura versus agua–resistencia mecánica. Así por ejemplo, la mantención de contenidos de humedad relativamente altos, a fin de reducir la resistencia mecánica, aún cuando no produzca efectos sobre la aireación, conduce a una situación de suelo más frío o más difícil de calentar, por cuanto se está aumentando la capacidad térmica volumétrica del suelo. Los efectos de la aireación del suelo sobre el crecimiento de las plantas, pueden provenir por fenómenos de oxidorreducción de constituyentes del suelo, los cuales a su vez influyen sobre el crecimiento y productividad de los cultivos; o bien, por reducciones en la concentración de oxígeno y en la tasa de difusión del mismo, lo que afecta la respiración a nivel radicular.

Los factores antes mencionados están estrechamente ligados y muchas veces determinados por las propiedades físicas de los suelos. Dentro de estas propiedades se pueden mencionar la textura del suelo, la estructura, distribución y tamaño de poros y los fenómenos de resistencia mecánica del suelo.

En el espacio poroso del suelo se distinguen, de acuerdo a su tamaño, macroporos y microporos. Los macroporos son esenciales para el flujo del aire que suministra el oxígeno para el crecimiento de raíces y la fauna edáfica. La mayor parte de las especies frutales requiere sobre un 15% de macroporosidad, sin embargo, hay algunas especies como el palto, cuyos requerimientos de aire en el suelo son mayores y requieren valores cercanos a 30%.

Los microporos en cambio retienen el agua, la que dentro de ciertos límites, puede ser absorbida por las plantas. En términos generales, los suelos arenosos tienen una porosidad total menor que los suelos de texturas más finas (franco arcillosos a arcillosos), sin embargo, predo-

minan los macroporos por lo cual la retención de humedad en este tipo de suelos es menor. Al contrario los suelos de textura más fina presentan una mayor porosidad total, pero predominan los microporos, por lo cual su capacidad de retención de humedad es alta. En consecuencia en estos suelos la macroporosidad es menor que la de los suelos más gruesos, lo que puede traer problemas de aireación, especialmente cuando aumentan los fenómenos de compactación (**Figura 13**).

El suelo se comporta como un estanque que almacena agua la que posteriormente será utilizada por las plantas. Clásicamente la cantidad de agua disponible para ser utilizada por las plantas, se denominada humedad aprovechable (HA). Esta cantidad de agua estaría comprendida entre dos valores límites, uno superior denominado capacidad de campo (CC) y otro inferior, denominado porcentaje de mar-

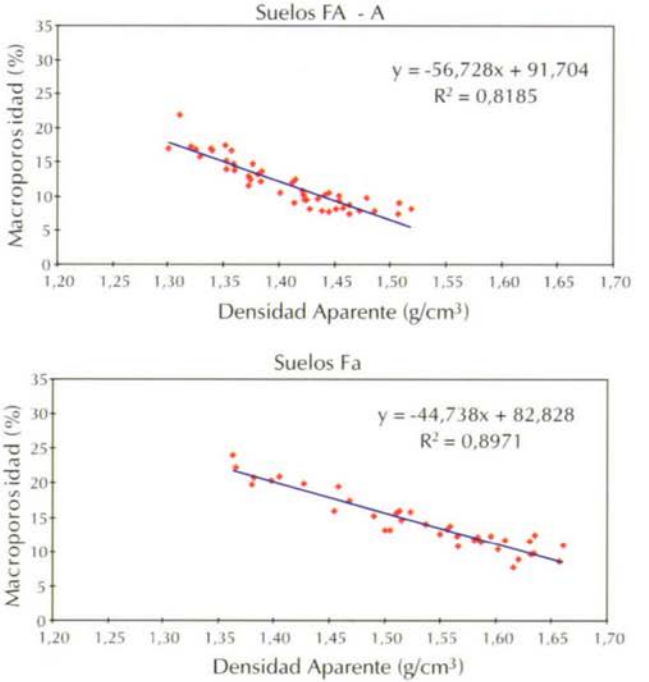


Figura 13. Efecto de la compactación (aumento de densidad aparente) sobre la macroporosidad. En la imagen superior, suelo de textura franca arcillosa a arcillosa (FA-A). En la figura inferior, para un suelo de textura franca arenoso (Fa).

chitez permanente (PMP). Algunos valores típicos de estos parámetros se presentan en el **Cuadro 9**.

El rango óptimo de contenido de agua para el crecimiento de las plantas se encuentra entre un valor cercano a la capacidad de campo y un límite inferior definido como umbral de riego, contenido de humedad bastante superior al porcentaje de marchitez permanente (PMP).

El concepto de umbral de riego se ha aplicado ampliamente en el riego superficial. En el caso de los sistemas de riego localizado, al menos la teoría dice que los riegos se deben realizar diariamente, manteniendo un alto contenido de humedad de suelo en la zona del bulbo húmedo (cercano a capacidad de campo), no teniendo importancia la capacidad de almacenaje del suelo. Hoy en día se ha visto que en suelos de baja capacidad de aire del suelo (contenido de aire en el suelo a -0,33 atmósfera) o macroporosidad (contenido de aire en el suelo a -0,06 atmósfera) y de alta capacidad de retención de humedad,

Cuadro 9. Valores típicos y rango de variación de capacidad de campo (CC), porcentaje de marchitez permanente (PMP), humedad aprovechable para suelos de diferentes texturas. Los intervalos normales están señalados entre paréntesis.

Textura del suelo	CC (%)	PMP (%)	HA (CC – PMP) Gravimétrico (%)	Altura de agua aprovechable (mm/m de suelo)
Arenoso	9 (6 - 12)	4 (2 - 6)	5 (4 - 6)	80 (60 - 100)
Franco arenoso	14 (10 -18)	6 (4 - 8)	8 (6 - 8)	120 (90 - 150)
Franco	22 (18 - 26)	10 (8 - 12)	12 (10 - 14)	170 (140 - 200)
Franco arcilloso	27 (23 - 31)	13 (11 - 15)	14 (12 - 16)	190 (160 - 220)
Arcillo arenoso	31 (27 - 35)	15 (27 - 35)	16 (13 - 17)	210 (180 - 230)
Arcilloso	35 (31 - 39)	17 (15 - 19)	18 (16 - 20)	230 (200 - 250)

el criterio de frecuencia diaria no da los resultados esperados, produciéndose zonas de mucha saturación y bulbos de pequeño tamaño, lo que afecta el desarrollo radicular por falta de una adecuada aireación. Sin embargo, es necesario tener presente que si se agota en demasía el agua en el suelo, se puede afectar el crecimiento de las plantas producto de un déficit hídrico. Por lo cual es necesario conocer que porcentaje de la humedad aprovechable se puede agotar en el suelo antes del próximo riego (umbral de riego).

5.1.3.1 Umbrales de riego

En goteo y microaspersión, hasta hace algunos años atrás, los programas de riego sólo consideraban altas frecuencias de aplicación de agua (riegos diarios) para reponer la evapotranspiración del cultivo, independiente del tipo de suelo. Actualmente, la experiencia ha mostrado que los riegos de alta frecuencia son más apropiados para aquellos suelos de baja capacidad de retención de humedad, de texturas medias a gruesas, de una alta macroporosidad y delgados. En suelos más pesados, de mayor capacidad de retención de humedad y de baja macroporosidad los riegos de baja frecuencia (riegos cada 2, 3 o más días en verano) se han mostrado más promisorios. Las aplicaciones diarias de agua en este tipo de suelo pueden significar problemas desde el punto de vista de la aireación de suelo, el desarrollo de ciertas enfermedades y una escasa área de suelo mojada.

Para definir la frecuencia de riego más apropiada, que optimice la relación agua–aire en el suelo sin producir estrés hídrico en la planta, es necesario conocer la capacidad de retención de humedad del suelo, el porcentaje de suelo mojado por los emisores y el umbral de riego. En palto, según experiencias realizadas por INIA, se puede agotar entre un 30 a 40% la humedad aprovechable del suelo (umbral de riego) antes de volver a regar sin afectar los rendimientos del cultivo.

En el **Cuadro 10,** se presenta el resultado de un ensayo realizado en un suelo franco donde las plantas se regaron con dos frecuencias o umbrales de riego diferente, concluyéndose que no hay diferencia, ya sea en el rendimiento, calibre y estado hídrico de la planta, entre regar en forma diaria en verano (umbral de riego del 10%) o cuando se ha ago-

Cuadro 10. Efecto del agotamiento de la humedad aprovechable (HA) en el suelo, antes de volver a regar en el rendimiento, calibre de fruto y estado hídrico del palto en un suelo franco de la localidad de Nogales.

Umbrales de riego	Rendimiento (kg / planta)*	Calibre entre 50 y 32 (%)**	PHxmin Verano MPa**	gs verano cm/s**	Volumen de agua aplicado m³/ha***
T1 (10%)	64,6 a	90 a	-0,35-0,55a	0,72-0,42a	10.558
T2 (20%)	61,4 a	89 a	-0,35-0,65a	0,72-0,38a	10.502

T1= riego cuando se agota el 10% de la humedad aprovechable (HA) (aproximadamente riegos diarios en verano).
T2 = riego cuando se agota el 20% de la HA (aproximadamente riegos cada dos días en verano).
PHxmin = potencial hídrico xilemático medido a medio día.
gs = conductancia estomática medida a medio día.
* promedio de tres temporadas 2002/03; 2003/04 y 2004/05.
** dato de la temporada 2003/04.
*** dato de la temporada 2004/05; Marco de plantación 8 x 4 m.

tado el 20% de la humedad aprovechable del suelo (en verano riego cada dos días en este suelo).

En forma paralela, se realizó otro ensayo en un suelo franco arenoso de la zona de Panquehue, que presentaba alta aireación (27% de capacidad de aire) (**Cuadro 11**). Las plantas en esta experiencia fueron regadas con cuatro diferentes umbrales de riego (frecuencias), concluyéndose que disminuciones de 60% de la humedad aprovechable antes de volver a regar no afectan el estado hídrico, rendimiento y calibre de la fruta. Las plantas que se regaban con un umbral de riego del 60% (riego en verano cada 5 o 6 días) presentaron a medio día, en verano, potenciales hídricos xilemáticos entre -0.53 a -0.68 MPa.

En forma paralela al trabajo anterior, en la localidad de Hijuelas se llevó a cabo, en un suelo franco arcilloso, un ensayo con dos frecuencias de riego, una diaria (dos pulsos al día en verano) donde se aplicó el agua por goteo (tres líneas por camellón con goteros a 33 cm) y otra que se regaba aproximadamente cada 5 a 6 días en los meses de enero a marzo, a través de microaspersión. De un análisis de estos resultados (**Cuadro 12**) se puede concluir que en riego por goteo se aplicó entre un 20 a 30% menos agua que en microaspersión. Esto se debe a que un porcentaje importante del agua aplicada por microaspersión cae fuera

Cuadro 11. Efecto del agotamiento de la humedad aprovechable (HA) en el suelo, antes de volver a regar en el rendimiento, calibre de fruto y estado hídrico del palto en un suelo franco arenoso de la localidad de Panquehue.

Umbrales de riego	Rendimiento (kg / planta)		Calibre entre 50 y 32 (%)		PHxmin Verano MPa		gs verano cm/s		Volumen de agua aplicado m^3/ha	
	04/05	05/06	04/05	05/06	04/05	05/06	04/05	05/06	04/05	05/06
T1 (5%)	40,6a	45,7a	33,0a	47,0a	-0,57a	-0,61a	0,28a	0,30a	6.771	10.220
T2 (30%)	38,7a	53,0a	28,0a	52,7a	-0,53a	-0,58a	0,31a	0,28a	6.996	10.241
T3 (60%)	41,1a	47,8a	28,0a	79,5b	-0,60a	-0,68a	0,35a	0,25a	7.116	10.572

T1 = riego cuando se agotaba el 5% de la humedad aprovechable (HA) (riego pulso).
T2 = riego cuando se agotaba el 30% de la HA.
T3 = riego cuando se agotaba el 60% de la HA.
PHxmin = potencial hídrico xilemático medido a medio día.
gs = conductancia estomática medida a medio día; Marco de plantación 6 x 4 m.

Cuadro 12. Efecto del agotamiento de la humedad aprovechable (HA) en el suelo, antes de volver a regar en el rendimiento, calibre de fruto y estado hídrico del palto en un suelo franco arcilloso de la localidad de Hijuelas.

Métodos de riego	Rendimiento (kg/planta)		Calibre entre 50 y 32 (%)		PHxmin Verano MPa		gs verano cm/s		Volumen de agua aplicado m^3/ha	
	04/05	05/06	04/05	05/06	04/05	05/06	04/05	05/06	04/05	05/06
T1 Goteo	482,5a	19,2a	56,2a	34,6a	-0,62a	-0,60a	0,45a	0,33a	8578	11726
T0 Micro-aspersión	52,5a	7,2b	69,3b	60,4b	-0,91b	-0,93b	0,39a	0,08b	11625	12953

T0: Plantas regadas por un Microaspersor de 70 l/h y de 3,5 m de radio. Frecuencia de riego no diaria. En enero se regaba cuando el potencial hídrico xilematico estaba entre -0,9 o -1,0 MPa. (Riego cada 5 a 6 días en verano, enero a marzo).
T1: Plantas regadas con tres líneas de goteo, con goteros a 33 cm., autocompensados, antidrenantes y con una caudal de 1,6 l/h. Las líneas de riego se dispusieron a 40 cm. unas de otras. Frecuencia de riego diaria.
PHxmin = potencial hídrico xilemático medido a medio día.
gs = conductancia estomática medida a medio día; Marco de plantación 5 x 4 m.

de la zona de raíces perdiéndose por percolación profunda y/o escurrimiento superficial. Esto nos indica que en estas condiciones, la eficiencia del riego por microaspersión es muy inferior a la que presenta el riego por goteo.

Por otra parte, una mayor producción y calibres se obtuvieron en las plantas regadas por goteo (Cuadro 12), las que presentaban un óptimo contenido de humedad del suelo. Las menores producciones y menores calibres en las plantas regadas por microaspersión durante enero puede ser debido a que presentaron potenciales hídrico xilemáticos cercanos a -1 MPa y valores de conductancia estomática bajo 0,1 cm/s, lo que pudo afectar la cuaja y calibre (Cuadro 12). Esta información nos indica que cuando en los paltos se aplica el agua con frecuencias entre riego que llevan a las plantas a potenciales hídricos xilemáticos menores que -0,9 MPa y conductancias estomáticas inferiores a 0,1 cm/s, se afectan los rendimientos

Es necesario indicar que los valores de PHxmin cercano a -1 MPa se alcanzaron con frecuencia de riego entre 5 a 6 días, similar a la utilizada en un tratamiento del experimento anterior (Panquehue), pero que presentó PHxmin de -0,47 a -0,75 MPa (Cuadro 11). Esto se debe a que en la experiencia de Hijuelas, el sistema radicular estaba más superficial y concentrado que en Panquehue, por lo cual el agotamiento de la humedad aprovechable del suelo, en este caso, fue cercano al 70%, valor superior al utilizado en el experimento de Panquehue.

Para comprobar los antecedentes obtenidos de los tres experimentos anteriores (Nogales, Panquehue e Hijuelas), durante febrero de 2006 se realizó un ensayo en un suelo franco arcilloso de la zona de San Pedro con el objeto de medir en forma detallada el estado hídrico de las plantas entre un riego y otro. Para ello, fueron seleccionados 12 paltos var. Hass sobre portainjerto mexícola homogéneos, regados en forma diaria por microaspersión. Seis de ellos se dejaron de regar por 13 días para producir estrés, mientras los otros seis continuaron con un régimen de riego normal (control). Luego de los 13 días de iniciado el experimento, a los árboles privados de agua se les aplicó un riego de 300 mm, para posteriormente continuar regándolos en forma similar a los árboles del control. Los resultados de este experimento, se presentan en la **Figura 14**. Sólo a 5 días de dejar de regar las plantas, cuando ya se había agotado aproximadamente el 30% de la humedad aprovechable del suelo, se comenzaron a visualizar diferencias en el estado hídrico al compararlas con las regadas (control).

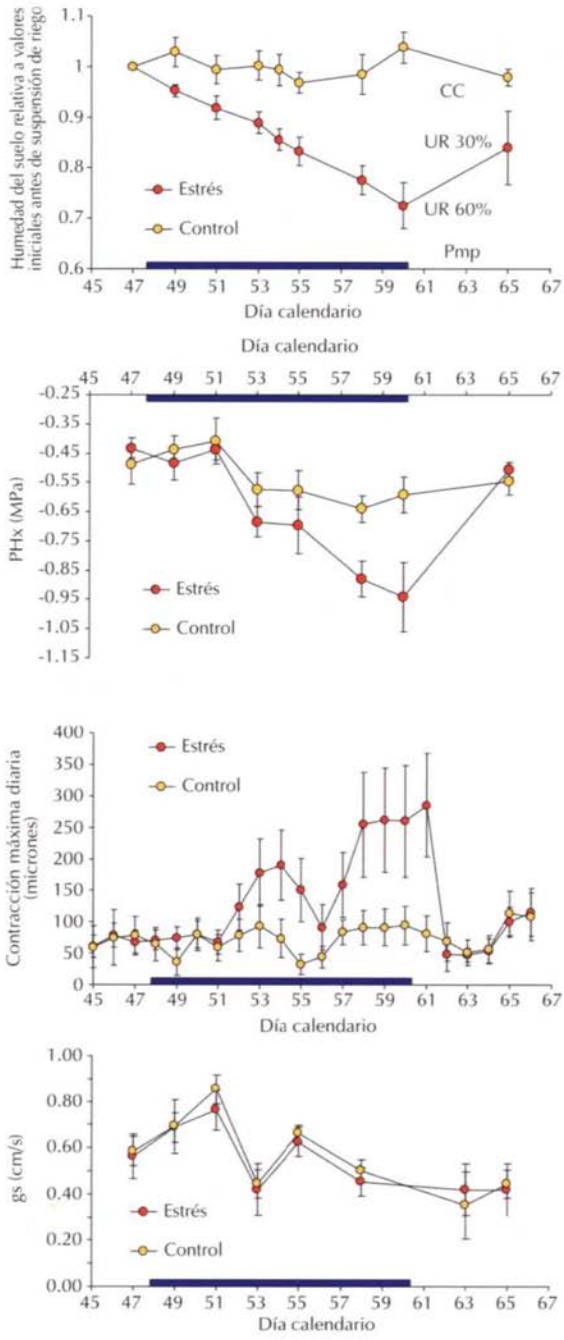


Figura 14.
Efecto del agotamiento de la humedad aprovechable (HA) antes de volver a regar en el potencial hídrico xilemático (PHx), en la contracción máxima diaria del tronco (ACD) y en la conductancia estomática (gs) del palto, febrero 2006. Localidad de San Pedro.
Cada punto representa el promedio de seis mediciones. Las barras verticales representan la desviación estándar. Asterisco indica diferencias significativas entre los tratamientos (P<0,05). La barra horizontal gruesa indica la duración del período sin riego.

Hasta ese momento, las magnitudes de parámetros medidos no señalaban que las plantas estuvieran sometidas a estrés hídrico (Ferreyra *et al.*, 2006). Los árboles continuaron extrayendo agua del suelo a la misma tasa, lo cual se deduce al analizar la pendiente con que disminuye la humedad en el suelo (Figura 14), lo que indica que las plantas durante todo el tiempo sin riego mantuvieron una adecuada transpiración, lo cual se corrobora con las mediciones de conductancia estomática que presentaron valores adecuados (0,6 a 0,4 cm/s) y similares a las plantas regadas.

Como se indicó anteriormente, el potencial hídrico xilemático medido a medio día (PHxmin) comenzó a ser diferente entre las plantas regadas y no regadas, después de 5 días de comenzado el ensayo, alcanzando al día 11 valores de -0,85 Mpa, cercano a los valores reportados en los trabajos de Hijuelas como restrictivos para el rendimiento del palto y que en este suelo correspondió a aproximadamente un agotamiento del 70% de la humedad aprovechable. Por otra parte, la amplitud de las contracciones diarias (ACD) medidas con dendrómetro, comenzaron a ser diferentes entre las plantas con riego y sin riego a partir del quinto día iniciado los tratamientos, al igual que el PHxmin. Por lo tanto, las ACD como el PHxmin, comienzan a indicar diferencias antes que las plantas hayan cerrado sus estomas y disminuido la transpiración.

En resumen, se puede indicar que los paltos en suelos de textura fina pueden ser regados con baja frecuencia de riego, sin afectar los rendimientos y el calibre. Sin embargo, es necesario que esta frecuencia se determine de acuerdo a la retención de humedad del suelo, utilizando un umbral de riego entre un 30 a 40% (o sea, agotar antes de regar como máximo un 30 a 40% de la humedad aprovechable del suelo). Además, es necesario controlar esta frecuencia de riego, para lo cual se puede utilizar mediciones de humedad del suelo o potenciales hídricos xilemáticos, los cuales no pueden ser menores a -0.75 MPa ya que con valores de -0,9 MPa se encontraron efectos sobre en rendimiento.

5.1.4 Cómo elaborar un programa de riego en palto

Para realizar un programa de riego es necesario analizar el sistema suelo en forma integral, viendo la posible interacción entre la aireación, la retención de humedad y la resistencia mecánica del suelo. En

consecuencia, una adecuada programación de riego requiere de un reconocimiento previo del suelo. Este se logra mediante un estudio agrológico (de suelo), a escala apropiada, que permita separar unidades de suelo homogéneas, en cuanto a su textura, estructura, secuencia de estratas y profundidad. Incluso el diseño de los equipos de riego debiera considerar la variabilidad de suelos existentes, para evitar problemas posteriores en el manejo de los equipos. Para cada unidad homogénea de suelo es recomendable realizar una determinación *"in situ"* (sin alterar mayormente su estructura) de su densidad aparente y capacidad de campo, para derivar parámetros tales como la porosidad total y capacidad de aire del suelo, en particular en aquellos de texturas finas, que son los que presentan las mayores dificultades de manejo del agua de riego.

Por lo tanto, como paso preliminar es necesario conocer la variabilidad espacial que presentan los suelos en los diferentes cuarteles, de tal manera de planificar el riego de acuerdo a unidades homogéneas (**Figura 15**). Por otra parte, el conocimiento de la variabilidad espacial de los suelos es básica para realizar el diseño de equipos de riego localizado, en particular la sectorización y selección de emisores.

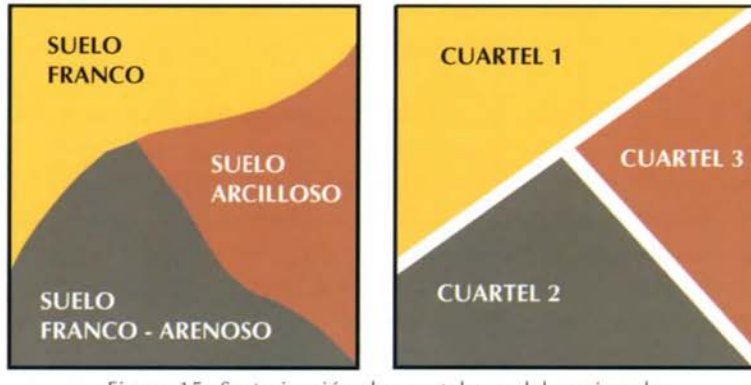


Figura 15. Sectorización de cuarteles y del equipo de riego de acuerdo a la variabilidad espacial del suelo.

Tomando en consideración los antecedentes anteriores, es posible establecer tiempos y frecuencias de riego que permitan definir un programa de riego para el cultivo.

5.1.4.1 Tiempo de riego (cantidad de agua a aplicar)

El tiempo de riego corresponde a las horas que debe operar cada sector del equipo de riego para suplir la Etm del cultivo. En zonas de lluvia se debe considerar la magnitud de las precipitaciones, ya que parte de las necesidades serían suplidas por éstas.

El tiempo de riego requerido para suplir la Etm del cultivo debe considerar el marco de plantación, la eficiencia de aplicación del método de riego, el número de emisores por planta y la descarga de los emisores, de acuerdo a la siguiente relación:

$$Tr = \frac{(Etm-Pp) \times DEH \times DSH}{Efa \times q \times N}$$

Donde:

Tr = tiempo de riego en horas/día
Etm = es la evapotranspiración máxima del cultivo en mm/día
Pp = precipitación efectiva, mm
DEH = corresponde a la distancia entre hileras
DSH = corresponde a la distancia entre hileras
q = corresponde a la descarga real del emisor, L/h
N = corresponde al número de emisores por planta
Efa = es la eficiencia del método de riego, en tanto por uno

Dada la relevancia que adquiere la descarga de los emisores en la determinación del tiempo de riego, es muy importante realizar evaluaciones periódicas del caudal de los emisores, de tal manera de tener el valor real del caudal por sector de riego y su coeficiente de uniformidad. Esto porque los emisores van sufriendo obturaciones, o bien, porque no se regula adecuadamente la presión de los sectores. Mediciones periódicas de presión (semanal a quincenal) y de gasto de emisores (dos a tres veces en la temporada), son parte indispensable de la programación del riego.

El tiempo de riego se puede calcular como horas de riego por día, sin embargo, como se verá a continuación, los riegos se podrán realizar diariamente, aplicando el tiempo de riego estimado, o bien "acumulando horas de riego", de tal manera de realizar riegos más espaciados en el tiempo (cada 2, 3 o más días, por ejemplo).

5.1.4.2 Frecuencia de riego

En el riego localizado en frutales, como se indicó anteriormente hasta hace algunos años atrás, los programas de riego localizado sólo consideraban altas frecuencias de aplicación de agua (riegos diarios) para reponer el agua evapotranspirada por el cultivo, independiente del tipo de suelo. Actualmente, la experiencia ha mostrado que los riegos de alta frecuencia son más apropiados para aquellos suelos de baja capacidad de retención de humedad, de texturas medias a gruesas, de una alta macroporosidad y delgados. En suelos más pesados, de mayor capacidad de retención de humedad y de baja macroporosidad, los riegos de baja frecuencia (cada 2 o tres días en verano) se han mostrado más promisorios. Las aplicaciones diarias de agua en este tipo de suelo pueden significar problemas desde el punto de vista de la aireación del suelo, desarrollo de ciertas enfermedades y una escasa área de suelo mojada.

Para definir la frecuencia de riego más apropiada es necesario disponer de antecedentes que permitan determinar la capacidad de retención de humedad del suelo, el umbral de riego y el porcentaje de suelo mojado por los emisores, lo que se obtiene de estudios de terreno. En palto, como se indicó anteriormente, se puede utilizar un agotamiento (umbral de riego) entre el 30 a 40% de la humedad aprovechable, aplicada al volumen de suelo mojado por los emisores.

5.1.4.3 Ejemplo de programación de riego en palto

A continuación se presenta a manera de ejemplo como realizar un programa de riego para la zona de Quillota-La Ligua, que permita optimizar la relación agua-aire en el suelo. En el **Cuadro 13,** se presenta una estimación de los volúmenes de agua a aplicar en la zona de Quillota-La Ligua, para árboles adultos, en un año promedio de evapotranspiración de referencia (Eto). Al final del Cuadro 13, se incluyen las relaciones que permiten determinar los requerimientos del palto, de acuerdo a dos distancias de plantación, el cual posteriormente, conociendo la descarga del emisor, se puede convertir en tiempo de riego.

Los valores de coeficientes de cultivo (Kc), que permiten estimar los requerimientos hídricos, han sido determinados en condiciones de ma-

Cuadro 13. Estimación de los volúmenes de agua a aplicar en la zona de Quillota en paltos adultos.

Meses	Eto mm/día	Kc	Etc mm/día	DB l/m²/día	6 x 4 l/planta/día	6 x 6 l/planta/día
Enero	5,7	0,75	4,3	5,0	120,7	181,1
Febrero	5,9	0,75	4,4	5,2	124,9	187,4
Marzo	4,6	0,75	3,5	4,1	97,4	146,1
Abril	3,3	0,75	2,5	2,9	69,9	104,8
Mayo	2,1	0,75	1,6	1,9	44,5	66,7
Junio	1,1	0,65	0,7	0,8	20,2	30,3
Julio	0,8	0,65	0,5	0,6	14,7	22,0
Agosto	1,1	0,65	0,7	0,8	20,2	30,3
Septiembre	2,1	0,65	1,4	1,6	38,5	57,8
Octubre	3,3	0,65	2,1	2,5	60,6	90,8
Noviembre	4,6	0,75	4,1	4,1	97,4	146,1
Diciembre	5,5	0,75	4,9	4,9	116,5	174,7

Etc = Evapotranspiración del cultivo = Eto x Kc;
Kc = Coeficiente de cultivo;
DB Demanda bruta = Etc/efa;
Efa = eficiencia de aplicación (goteo = 0,9; Microaspersión = 0,85).

nejo que pueden diferir del huerto donde se estén utilizando, ya que la magnitud de este factor depende principalmente del área de cobertura (marco de plantación). Debido a esto es necesario disponer de elementos que permitan controlar si las cantidades de agua que se están aplicando son las correctas, ajustando los coeficientes de cultivo a las condiciones del predio. Para realizar este control se pueden utilizar calicatas acompañadas de mediciones de agua del suelo con sondas capacitivas (FDR), tensiómetros, o bien, del estado hídrico de la planta, estimado con dendrómetros y/o cámara de presión. Es necesario indicar que el éxito en el uso de controladores pasa por disponer de personal capacitado en su uso e interpretación, ya que de no ser así su utilización puede ser hasta perjudicial.

En el caso de plantas nuevas la cantidad de agua a aplicar, se puede estimar a partir de la demanda bruta (DB l/m²/día) multiplicada por el área de cubrimiento (m²) que presenta la planta. Por ejemplo una planta de un año, cuya parte aérea cubre 1,5 m² de suelo, en la zona de Quillota, en el mes de enero consume 5 l/m²/día (Cuadro 13), por lo cual, sus requerimiento totales serían de aproximadamente 7,5 litros por planta al día (5 l/m²/día x 1,5 m²).

En lo referente al manejo de riego, también se debe considerar en que momento reponer el agua. En la actualidad hay dos tendencias en lo referido a la forma de reponer los requerimientos hídricos en los huertos de paltos: riego por pulso y riego de baja frecuencia.

En el riego por pulso o de alta frecuencia los requerimientos hídricos diarios son aplicados en forma parcializada durante el día. En este tipo de manejo los requerimientos hídricos diarios son divididos y aplicados entre 4 a 12 pulsos de riego diarios.

El riego por pulso se puede iniciar con diferentes contenidos de humedad en el suelo, como se muestra en la **Figura 16** (línea de cuadrados y círculos), para luego regar diariamente, dividiendo el agua a aplicar en varios eventos, de acuerdo a como fluctúa la evapotranspiración diaria del cultivo. En la Figura 16, se observa que, en un suelo franco con una capacidad de aire del 20%, si se comienza a regar cuando el suelo tiene un contenido de humedad alta, sobre capacidad de campo (línea con círculos en la Figura 16), se mantiene un espacio de aire en el suelo inferior al 17%. Sin embargo, si se comienza a reponer el riego cuando el suelo presenta valores de humedad bajo capacidad de campo (línea de cuadrados) y cuando se ha agotado entre un 30 a 40% de la humedad aprovechable, se logra en el suelo contenidos de aire cercanos al 25% (línea con cuadrado de la Figura 16).

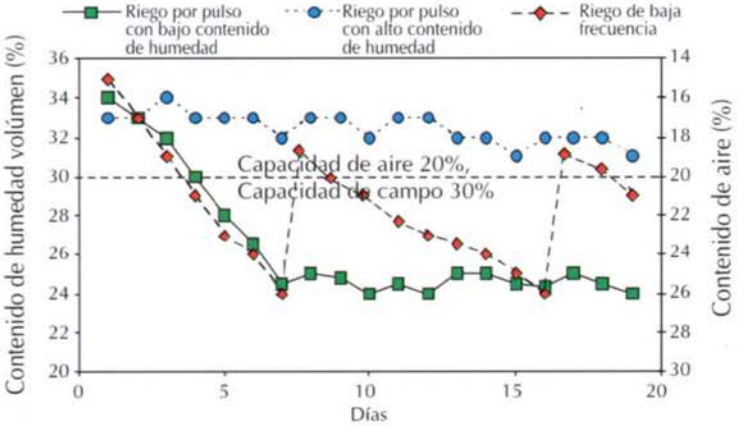


Figura 16. Efecto del manejo de alta y baja frecuencia sobre la aireación del suelo. Porosidad Total = 50%

Lo anterior implica que cuando se utiliza la estrategia de riego por pulso, es fundamental definir adecuadamente el momento de inicio del riego, de manera de tener en el suelo un adecuado contenido de aire y agua. Es necesario considerar que manejar el riego de esta forma requiere aplicar el agua sólo durante el día, de acuerdo a como varían los requerimientos del cultivo y realizar un estricto control de la humedad en el suelo y en la planta, ya que cualquier error puede afectar seriamente el desarrollo y producción del cultivo.

Otra forma de reponer el agua, optimizando la relación agua-aire en el suelo, es a través de riegos de baja frecuencia, que consiste en regar cuando se ha agotado alrededor de un 40% de la humedad aprovechable del suelo, nivel que no afecta el crecimiento del cultivo, aumentando con esto la cantidad y difusión de oxígeno en el suelo (Figura 16 línea con rombo). La cantidad de agua aplicada en cada riego corresponde a la demanda hídrica diaria acumulada entre riego. De esta forma, la cantidad de agua aplicada en riego de baja frecuencia es la misma que la aplicada en pulsos. La técnica de baja frecuencia es más simple y segura de implementar en el campo que el riego por pulsos y además permite un mejor lavado de sales.

Para implementar el riego de baja frecuencia es necesario conocer las constantes hídricas del suelo (capacidad de campo, punto de marchitez permanente y densidad aparente) además de la profundidad radicular efectiva. En el **Cuadro 14,** se presenta, para diferentes texturas, el agua que se puede agotar en suelo antes de volver a regar (Ha) cuando se utiliza un umbral de riego del 40%. Además, en la parte inferior del Cuadro 14 se incluyen las relaciones que permiten obtener el Ha.

A modo de ejemplo, en un suelo franco, el agua disponible en las condiciones antes descritas es 20 mm, por lo cual, si la evapotranspiración del cultivo (Etc) es 5 mm/día, se podría regar como máximo en ese suelo cada 4 días. Por lo indicado anteriormente, la frecuencia entre riegos depende del tipo de suelo, de la demanda hídrica del cultivo que varía durante la temporada y de la profundidad del sistema radicular.

Respecto a la eficiencia de aplicación del agua de riego (Efa), que se utiliza para calcular los requerimientos de agua del cultivo (Cuadro 13),

Cuadro 14. Agua que se puede agotar en el suelo (Ha) antes de volver a regar, en huertos con profundidad radicular efectiva (pef) de 50 cm, si se pretende agotar el 40% de la humedad aprovechable y los emisores mojan (psm) un 70% del suelo.

Textura	Da g/cc	CC % base peso	pmp % base peso	Ha mm
Arenoso	1,65	9	5	9
Franco arenoso	1,50	14	8	13
Franco	1,40	22	12	20
Franco arcilloso	1,35	27	14	25
Arcilloso arenoso	1,30	31	16	27
Arcilloso	1,25	35	18	30

Da = densidad aparente;
CC = capacidad de campo;
pmp = punto de marchitez permanente;
Ha = Agua disponible en el suelo; **Ha = ((cdc – pmp) / 100 x da x Ur x pef x psm) x 10;**
psm = porcentaje de suelo mojado.

es necesario indicar que es posible alcanzar 85% en microaspersión y 90% en goteo (**Foto 22**). Sin embargo, si el equipo está obturado o mal regulado, esta eficiencia puede disminuir. En huertos de paltos plantados en camellón y regados por microaspersión con rotores que mojan fuera del camellón donde no hay desarrollo de raíces, la eficiencia es bastante menor que 85%. En estas situaciones es común observar que los

Foto 22. Distribución del agua de riego en goteo y microaspersión.

huertos regados por goteo requieren menos agua que los regados por microaspersión. En un huerto de la zona de Nogales se ha observado durante las temporadas 2004/2006 que plantas regadas con tres hileras de goteo, con emisores a 33 cm de distancia sobre la hilera, mantuvieron un contenido de humedad en el suelo mayor al compararlas con las regadas por microaspersión, que recibieron de un 20 a 35% más de agua, dado las pérdidas que se producen al caer agua fuera del camellón (Cuadro 12). Por ello, en paltos plantados en camellones, la eficiencia de aplicación depende en gran medida de la selección del microaspersor, sobre todo del radio de mojamiento y la forma en que distribuye el agua sobre el suelo.

5.2 Control de riego

Así como los programas fitosanitarios se apoyan en el monitoreo de plagas o en los programas de fertilización se realizan análisis foliares y de suelo, el programa de riego también debe ser controlado para poder ajustar los tiempos y frecuencias a las necesidades específicas del cultivo y a las características de los suelos.

Es posible que el programa de riego esté subestimando o sobrestimando la evaporación del cultivo, o no se esté regando con la cantidad de agua correcta, (por ejemplo, una obturación de emisores en riego localizado). Debido a esto, es necesario contar con mecanismos de control de riego.

El primer mecanismo de control es la evaluación periódica de la descarga, presiones y uniformidad del equipo de riego.

Los otros mecanismos son el control del estado hídrico del suelo y/o el estado hídrico de la planta. Los métodos basados en parámetros obtenidos de las plantas, tienen la ventaja de que integran el contenido de humedad de toda la zona radicular, pero requieren de instrumentos especiales y una interpretación más cuidadosa.

5.2.1 Control del estado hídrico del suelo

El control de la humedad del suelo permite conocer el nivel de disponibilidad de agua en forma cualitativa o cuantitativa, esto último midien-

do el contenido de humedad (gravimétrico o volumétrico) o el potencial mátrico del agua en el suelo. El control de humedad permite determinar la profundidad del riego y determinar si éste es excesivo o deficitario. En el caso de riegos localizados permite, además, definir y conocer el comportamiento del bulbo húmedo que generan los emisores.

Se debe tener presente que previo al establecimiento de cualquier sistema de control, se debe conocer la variabilidad espacial de los suelos para lograr una clara interpretación de los resultados que se obtengan y que sirvan como una herramienta adecuada para mejorar el manejo de riego de los paltos.

5.2.1.1 Uso de barrenos y calicatas

Entre los métodos de control de suelo, el más sencillo es el control sensorial del perfil por medio de calicatas o barreno. Consiste en tomar muestras de suelo a distintas profundidades y observar el contenido aparente de humedad. Este método es de muy fácil aplicación, pero requiere de cierta experiencia.

El uso de calicatas es siempre recomendable, pues permite una visualización más completa de la humedad del suelo y, además, permite observar el estado general del suelo y el desarrollo de raíces para comprobar la calidad del riego que se está utilizando. Las calicatas deben ser anchas y profundas, de tal manera que se pueda apreciar toda la zona de raíces (**Foto 23**).

Foto 23. Control de la humedad a través del uso de calicatas.

5.2.1.2 Humedad del suelo

El control de humedad del suelo se puede evaluar mediante el uso de instrumentos que pueden cuantificar la energía de retención del agua en el suelo (potencial mátrico) y otros que cuantifican el contenido de humedad volumétrico del suelo. Ambos parámetros están íntimamente relacionados, ya que a medida que disminuye el contenido de agua del suelo, aumenta la energía de retención de ella por parte de la matriz del suelo (es decir, disminuye el potencial mátrico). Esta relación depende de las características de la textura y de la estructura del suelo (**Figura 17**).

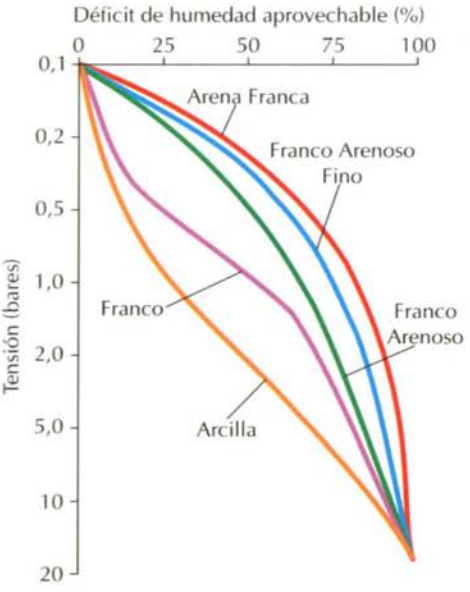


Figura 17. Relación entre el contenido de humedad del suelo y la energía de retención del agua (Potencial mátrico).

Entre los instrumentos que miden la energía del agua en el suelo se encuentran los tensiómetros (**Foto 24**) y los sensores en base a resistencia eléctrica (como los sensores Watermark, fabricados por Irrometer Co. EEUU). Los tensiómetros miden la energía de retención del agua en el suelo hasta 60 a 70 kPa o centibares (cb), rango en que se encuentra más del 50% de la humedad aprovechable del suelo. Los sensores de resistencia eléctrica pueden registrar valores mayores (0 a 200 cb), sin embargo muestran una baja sensibilidad a rangos altos de humedad en el suelo, que son comunes y normales en la práctica del riego localizado. Aunque estos instrumentos pueden ser muy útiles, requieren de una instalación y mantención rigurosa, así como una localización muy precisa respecto del sistema radicular de las plantas.

Entre los equipos que miden humedad de suelo existen también los sensores conocidos con el nombre de sondas capacitivas o FDR

Foto 24. Uso de tensiómetros en paltos.

(Frequency Domaine Reflectometry) que basan su medición en la constante dieléctrica del suelo, la cual varía en función del contenido de humedad de éste. La constante de un suelo seco es del orden de 4 a 10, en cambio la del agua pura es del orden de 80. El sensor está constituido por una sonda con un par de electrodos (anillos circulares) conectados a un oscilador. Cuando esta sonda se introduce en el suelo, a través de un tubo de acceso de PVC, el campo eléctrico se activa utilizando una radio frecuencia y su variación registra el contenido de humedad. Los instrumentos traen una curva de calibración incorporada, sin embargo, se pueden presentar errores de medición en suelos con contenidos salinos sobre 1 dS/m o suelos heterogéneos. Es muy importante que los tubos de acceso de PVC queden muy bien ajustados al perfil de suelos para obtener lecturas adecuadas, ya que bolsones de aire entre el tubo y el suelo invalidan las lecturas. Es posible trabajar con las curvas de calibración estándares que traen los equipos, para diferentes texturas de suelo, no obstante, es indispensable al menos calibrar las curvas estándar con el contenido de humedad a capacidad de campo de cada suelo, medido *in situ*, a objeto de tener un patrón de comparación real de las lecturas, determinando si la humedad está por sobre o bajo este valor y cuantificar esta diferencia. El contenido de humedad a capacidad de campo se puede estimar mediante mediciones de humedad con la sonda después de 48 a 72 horas de ocurrida una lluvia invernal que moje

todo la zona de raíces. Para evitar la evaporación directa después de la lluvia se cubre el suelo con un *mulch* de plástico.

Independiente del sistema de medición de humedad que se utilice, es necesario conocer la variabilidad espacial de la distribución de humedad que se produce tanto al interior del bulbo húmedo generado por el gotero o microaspersor como entre los diferentes sectores del campo, con el objetivo de definir el número y posición de los puntos de medición de humedad, de tal manera que éstos sean representativos. En cada estación de control de humedad, a lo menos se debieran considerar tres puntos de medición (**Foto 25**). Es recomendable, previo a la colocación de los instrumentos (tensiómetros o tubos para FDR), ver en calicatas la forma y distribución de la humedad del bulbo húmedo y donde se concentran las raíces.

Foto 25.
Ubicación de tubos para medir la humedad de suelo (arriba) y sonda FDR (abajo).

Un ejemplo de la medición de la humedad del suelo con una sonda FDR se presenta en las **Figuras 18a** y **18b**. En la Figura 18a, se puede observar los períodos en que la humedad del suelo estuvo sobre o bajo el rango deseado. En algunos momentos, alrededor del 11 de octubre, el suelo presentó una humedad superior a la deseada (exceso de agua) y cerca del 23 de agosto, el suelo presentó humedades inferiores a las definidas como mínimas (déficit de agua). El rango de humedad en que se desea mantener el suelo lo puede definir el usuario, a partir de las mediciones de la

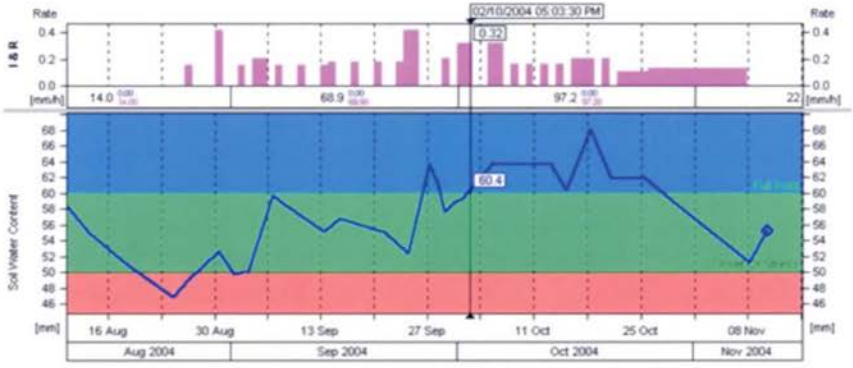


Figura 18a. Lecturas de humedad promedio de suelo con un FDR en palto.
Línea azul, corresponde a la humedad promedio en 60 cm de suelo, en un huerto de palto regado por microaspersión.
Full point = contenido de humedad máximo que se quiere tener en el suelo.
Onset of stress = Valor máximo permitido de agotamiento de agua en el suelo o umbral de riego.

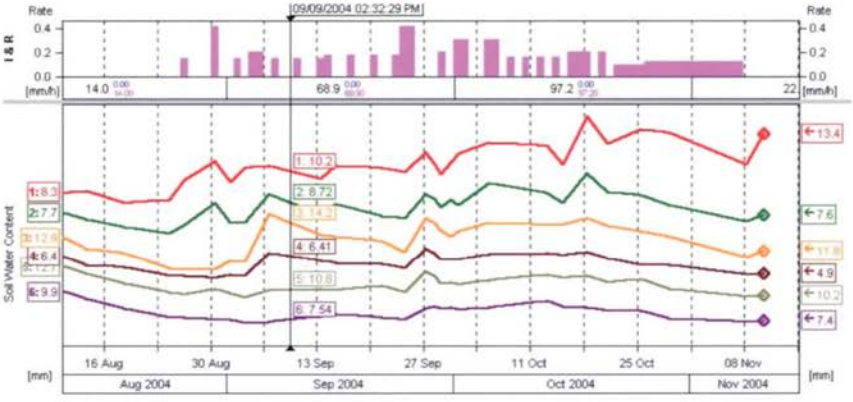


Figura 18b. Lecturas de humedad de suelo con un FDR en palto por estrata de suelo.
Rojo 0 -10 cm; Verde 10-20 cm; Café 20-30 cm; Morado 30-40 cm; Gris 40-50 cm y Lila 50-60 cm de profundidad, en un huerto de palto regado por microaspersión.

capacidad de campo (CC) *in situ* determinadas con la sonda FDR y el porcentaje de agotamiento de humedad del suelo que se permitirá (umbral de riego).

En la Figura 18b, para el mismo periodo reportado en la Figura 18a, se presenta los contenidos de humedad a diferentes profundidades, medidas cada 10 cm. Se observa que las raíces están muy activas en los primeros 30 cm de suelo (línea roja, verde y café) donde los contenidos de humedad varían debido a que están extrayendo agua. En cambio, entre los 50 y 60 cm de profundidad (línea lila) el contenido de humedad prácticamente no varía. La información reportada por la sonda FDR en la Figura 18a permite controlar el riego, al disponer de información promedio de la humedad de suelo en la zona de actividad radicular, de manera de evitar excesos o déficit hídricos y la Figura 18b, entrega información por estrato, para poder conocer la profundidad de la actividad radicular donde se debe controlar la humedad del suelo.

No obstante la precisión de los diferentes instrumentos para medir la humedad del suelo que se han señalado, se sugiere que las mediciones sean complementadas con el uso de calicatas.

5.2.1.3 Control del estado hídrico en la planta

Otra forma de evaluar si el riego se está realizando en forma adecuada, es medir el estado hídrico de las plantas. Este parámetro tiene la ventaja que integra el contenido de humedad del suelo disponible en toda la zona radicular del cultivo y las condiciones de demanda evaporativa imperantes en el momento de la medición.

El estado hídrico de las plantas se puede medir evaluando el potencial hídrico xilemático y mediante el seguimiento continuo de la microvariación del diámetro de los troncos, a lo que se realiza con un instrumento llamado dendrómetro.

5.2.1.3.1 Potencial hídrico xilemático

Cada vez más productores utilizan este tipo de mediciones como ayuda para manejar y/o controlar el riego, empleando para ello una cámara de

presión. El potencial hídrico es una integración de la demanda evaporativa de la atmósfera y de la disponibilidad de agua en el conjunto de suelo explorado por el sistema radicular de las plantas. Esto último no se logra cuando se realizan mediciones directas al suelo, ya sea con tensiómetros u otros instrumentos utilizados para ese efecto donde el volumen de suelo analizado es pequeño y no siempre coincide con las zonas de mayor desarrollo de raíces de las plantas, donde se realiza la extracción más importante de agua. Las mediciones de carácter puntual que realizan los instrumentos que miden la humedad de suelo puede conducir a errores en la estimación del agua disponible para la planta, sobre todo en riego localizado (goteo, microaspersión), ya que el bulbo de mojamiento presenta variaciones importantes del contenido de humedad, que van desde saturación bajo el emisor, hasta el suelo seco en el límite del bulbo húmedo. Por otra parte, la medición del potencial hídrico es una forma confiable para controlar la magnitud del estrés hídrico. Esta técnica se utiliza en algunas especies frutales, como vides para vino, con el fin de obtener un producto de alta calidad.

El potencial hídrico se mide con una cámara de presión que, en términos simples, mide «la presión sanguínea « de la planta. Por supuesto, en la planta circula agua en lugar de sangre y la presión en su interior corresponde a una tensión (presión negativa), producto de la evaporación del agua desde las hojas. El agua se mueve dentro de la planta a través de células muy pequeñas interconectadas, a las que colectivamente se les llama xilema, que corresponde a una red de "cañerías" de diferentes diámetros que llevan agua de las raíces a las hojas, desde donde se evapora al ambiente, lo que provoca la fuerza motriz que hace circular el agua. Por lo tanto, el agua en la planta está bajo succión y su magnitud no es constante sino varía en la medida que aumenta la transpiración de la planta o bien disminuye la humedad del suelo explorado por el sistema radicular. A menor disponibilidad de agua en el suelo, mayor es la tensión del agua en la planta. Dicho en otras palabras, el potencial hídrico disminuye (Figura 6).

La cámara de presión (**Figura 19**) es un dispositivo de acero con un manómetro en su parte exterior que permite aplicar presión a una hoja que es dispuesta en su interior con su pecíolo que sale al exterior a través de un orificio. La cantidad de presión que se necesita para que

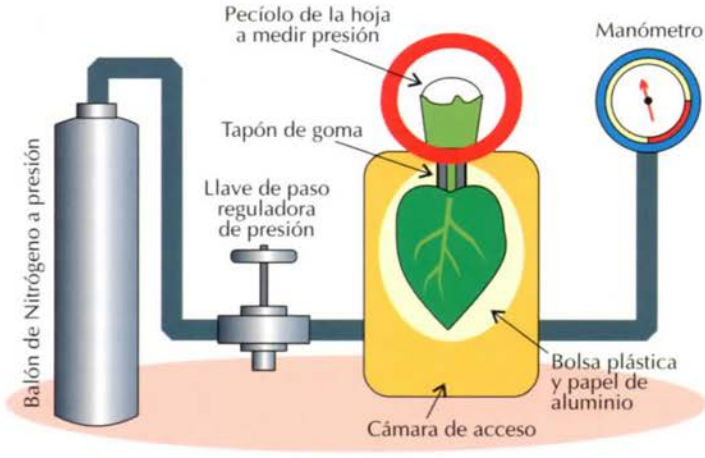


Figura 19. Esquema cámara de presión con sus componentes.

el agua aparezca por el pecíolo, indica cual es la tensión o potencial hídrico xilemático del agua en la hoja. Utilizando nitrógeno gaseoso se va aplicando progresivamente presión sobre la hoja que se encuentra en la cámara, hasta que se observa que sale agua por el extremo del pecíolo que se tiene a la vista. El manómetro del equipo va midiendo la presión que se va ejerciendo. Mientras mayor es la presión medida en la cámara, mayor es la tensión y un grado alto de estrés hídrico. Las unidades de presión que la mayoría normalmente usa es el Bar (1 Bar ≅ 1 atmósfera ≅ 1 kg/cm^2 = 14.5 libras por pulgada cuadrada (PSI) ≅ 10 m.c.a) y el Mega Pascal (1 MPa = 10 bares). En la práctica, lo más importante para el operador de una cámara de presión, es reconocer la presión a la cual ocurre el "punto final", es decir, cuando el agua comienza a aparecer por el extremo cortado del pecíolo. Se debe procurar tomar los datos a una hora determinada y en hojas seleccionadas para homogenizar la muestra, como se detallará más adelante.

El riego podría ser controlado a través de mediciones del estado hídrico de las plantas, como el potencial hídrico de la hoja (PHh) (Boyer, 1995) medido con la cámara de presión. No obstante su valor, como indicador del estado hídrico del cultivo, ha sido cuestionado por su variabilidad (Shackel *et al.*, 1997). Debido a lo anterior, algunos autores sugieren medir el PHh en la madrugada, cuando es más uniforme, pero al amanecer disminuye su sensibilidad y en suelos donde la distribución del agua

es heterogénea, como ocurre en riego por goteo o microaspersión, este puede mostrar una respuesta muy limitada, ya que los suelos se secan en forma heterogénea (Ameglio *et al.*, 1999). Además de lo indicado anteriormente, es difícil que el PHh medido en la madrugada sea utilizado como controlador del riego debido a la hora (antes de la salida del sol) en que debe realizarse la medición en el campo.

Es posible controlar los factores de variación en las mediciones del PHh indicados anteriormente al bloquear la transpiración de la hoja antes de ser cortada de la planta (Garnier y Berger, 1985; Olien y Lakso, 1986; Shackel *et al.*, 1997). Una metodología para lograr lo anterior, es poner las hojas que se van a medir dentro de una bolsa con plástico por dentro y papel aluminio por fuera (**Foto 26**), para mantener la humedad relativa e impedir el paso de la luz. Una vez cubiertas las hojas, debe esperarse entre 15 a 30 minutos, para que PHh se equilibre con el potencial hídrico xilemático o del brote (PHx) (McCutchan and Shackel, 1992). Fulton *et al.* (2001) indican que en nogales, (*Junglans regia* L.), almendros (*Prunus dulcis* (Mill) y ciruelos (*Prunus domestica* L.), este equilibrio se logra en 10 minutos.

Foto 26 (arriba). Técnico operando cámara de presión y (abajo) hoja de palto tapada con papel aluminio para bloquear la transpiración de la hoja, previo a la medición del potencial hídrico xilemático.

El PHx es menos afectado por cambios medioambientales de corto plazo que afectan la transpiración de la hoja y por lo tanto el PHh. En consecuencia, el PHx es una medida apropiada para conocer el estado hídrico de la planta (McCutchan y Shackel, 1992). Diferentes estudios han demostrado que el PHx medido con cámara de presión es un buen indicador del estrés hídrico en árboles frutales. Naor *et al.* (1995) encontró una buena correlación entre PHx, el rendimiento y calibre en manzanos (*Pyrus malus* L.). Datos similares encontraron Ferreyra *et al.* (2002) y (2004) en duraznero (*Prunus persica* L.) y vides viníferas (*Vitis vinifera* L.). Naor (1998) y Ferreyra *et al.* (2002) comprobaron que la conductancia estomática en nectarinos (*Prunus persica* var. nectarino) y vid vinífera está altamente correlacionada con el PHx.

El PHx mínimo o de mediodía (PHxmin) ha sido propuesto por varios autores como un indicador estándar para determinar el estado hídrico de la planta con fines de riego (Fereres y Goldhammer, 1990; Shackel *et al.*, 1997; Naor y Peres, 2001; Ferreyra *et al.*, 2002).

En resumen, la medida de potencial hídrico (PH) se llama «potencial hídrico xilemático" (PHx), cuando se mide en una hoja cubierta y "Potencial hídrico de la hoja" (PHh), cuando se realiza en hoja descubierta. El PHx es más sensible a la falta de humedad del suelo y presenta menos influencia a las condiciones ambientales que el PHh. Por lo tanto, es recomendable realizar mediciones de potencial hídrico xilemático, es decir medir en hojas cubiertas.

- **Factores que influyen en la medición del potencial hídrico**

Además de la técnica de medición, hay otros factores que pueden influir en los valores del potencial hídrico del árbol, los que se reseñan a continuación.

Características de la hoja. El aspecto más importante a considerar para medir el potencial hídrico de una planta utilizando las hojas, es la ubicación de la misma dentro de la corona del árbol. Durante el día, las hojas expuestas al sol pierden agua en una proporción más rápida que las hojas que se encuentran a la sombra, por lo tanto, al ser más rápida la pérdida de agua de las hojas soleadas éstas presentarán un

potencial hídrico más negativo que las hojas sombreadas. Para reducir la variabilidad de las mediciones debido a este hecho, se deben cubrir las hojas en las que se medirá el potencial hídrico. Al cubrir la hoja se detiene el proceso de pérdida de agua y el potencial hídrico de esa hoja se iguala al potencial hídrico de la ramilla en la que se inserta. La mayor ventaja de medir el potencial hídrico xilemático de la forma indicada, es la uniformidad de los datos obtenidos en las diferentes partes de la corona del árbol. El tipo, tamaño, forma y condición fisiológica de la hoja (estado nutritivo) tendrían poca influencia en la variabilidad de los valores del potencial hídrico xilemático. Ferreyra *et al.* (2006) encontraron que hojas de palto expuestas al sol presentaron un potencial hídrico xilemático (PHxmin) de -0,52 MPa, medido a mediodía, inferior en -0,1 MPa, comparado al de las hojas que se encontraban en la sombra que fue -0,40 MPa, pese a que se bloqueó la transpiración de esas hojas antes de ser cortadas. La desviación estándar (DS) de las mediciones fue baja. Las hojas expuestas al sol presentaron DS de 0,065 y las de la cara expuesta a la sombra de 0,018.

Respecto a la edad de las hojas en paltos, Ferreyra *et al.* (2006) indica que las determinaciones en hojas de un mes presentaron PHxmin promedio de -0,55 MPa y una DS de 0,12; las realizadas en hojas de 4 meses el PHxmin promedio fue de -0,52 MPa con una DS de 0,13 MPa y en hojas de 10 a 12 mes el PHxmin promedio fue de -0,49 MPa con una desviación estándar de 0,1 MPa. Las hojas más jóvenes presentan un potencial de 0,06 MPa más bajo que las hojas más adultas y una mayor desviación estándar. El PHxmin presenta menor variación al ser medido en hojas de 10 a 12 meses. Esto se puede deber a que las hojas nuevas pueden ser afectadas por la presión que ejerce la goma de la cámara de presión sobre el pecíolo de la hoja, retrasando la aparición de la savia en su extremo. Se debe mencionar que una variación de 0,06 MPa puede ser importante en el control del riego. Datos reportados por Lampinen (2004), indican que el nogal presenta PHx entre -0,3 a -0,5 MPa cuando está sin restricción hídrica y debiera regarse cuando disminuye este valor en -0,2 a -0,3 MPa.

Según Shackel (2001), la altura a la que se realiza la medición dentro del árbol tiene un pequeño efecto sobre los valores medidos. Las hojas que se ubican cerca de la base del tronco (es decir, más cerca de las

raíces), muestran un potencial hídrico xilemático ligeramente menos negativo que las hojas ubicadas a mayor altura. Por esta razón, la posición de la hoja recomendada en árboles es del interior del dosel más bajo, cerca del tronco o brazos principales.

Estructura y sanidad de la planta. Las diferentes especies vegetales tienen una estructura foliar propia y asociado a ello un control diferente de la pérdida de agua. Dicho de otra forma, el potencial hídrico varía entre especies. Sin embargo, un aspecto común y determinante para todas las plantas es la sanidad del sistema radicular. Un problema de sanidad del sistema radicular causará que el potencial hídrico xilemático sea más negativo que en las plantas sanas, incluso bajo condiciones de suelo húmedo. En el proceso de absorción de agua por la raíz, cualquier factor que influya en su sanidad, como deterioros producidos por artrópodos, patógenos o baja aireación del suelo, reducirá la habilidad de estas raíces de absorber agua, lo que causará que el potencial hídrico xilemático sea más negativo que en las plantas sanas. Por lo tanto, para que las mediciones sean representativas, hay que realizarlas sobre plantas sanas.

Condiciones ambientales. Las condiciones climáticas y la hora del día tienen gran influencia en la magnitud del potencial hídrico que se mide. Además de la disponibilidad de agua en el suelo, lo afectan la cantidad de radiación solar, la temperatura del aire y la humedad relativa. Por ello, es recomendable realizar la medición en días despejados, donde el potencial hídrico es más negativo. Según Shackel (2001), los días más calurosos y secos condicionan un potencial hídrico xilemático más negativo. Ferreyra *et al.* (2006) indican que en palto las variaciones en la temperatura y humedad relativa (presión de vapor o DPV) no tiene gran efecto sobre en el PHxmin (**Figura 20**). El PHxmin fluctúa entre -0,40 a -0,50 MPa (variación del 20%) para DVP que oscilan entre 1,5 a 3,0 kPa (variación del 50%), respectivamente.

De estos resultados se puede inferir que el PHxmin en paltos que están creciendo sin restricción hídrica, varía entre -0,4 y -0,5 MPa.

- **Uso de la cámara de presión**

Para medir el PHxmin se recomiendan los siguientes pasos:

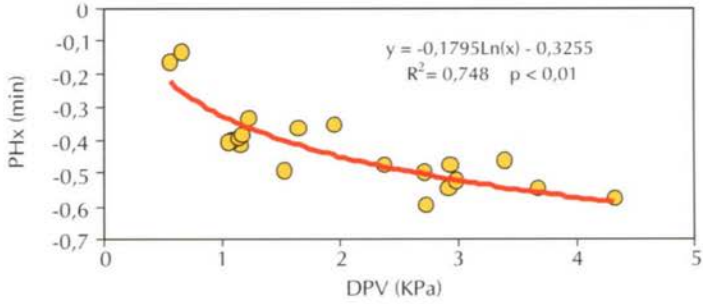


Figura 20. Efecto del déficit de presión de vapor (DVP) sobre el potencial hídrico xilemático a mediodía (PHxmin).

Selección de árboles para medición. El número de árboles que deben medirse con la cámara de presión para un adecuado manejo de riego, dependerá de varios factores. Según Shackel (2001), 10 árboles es un número adecuado para un bloque de riego homogéneo de hasta 25 ha. Es preferible seleccionar los árboles a principios de temporada y realizar las mediciones en ellos durante toda la temporada. Si hay áreas del bloque de riego con suelos diferentes, o diferencias en el mojamiento del suelo relacionada con el sistema de riego, se debe decidir cuales árboles serán los mejores indicadores de la situación promedio. Si hay duda sobre el número de árboles a utilizar, se sugiere empezar con un mayor número de árboles y luego de algunos riegos, seleccionar los más cercanos al promedio del campo. Si los suelos del huerto son muy heterogéneos se deberá considerar esta condición, seleccionando árboles que representen esta variación. Para huertos homogéneos, tres árboles son suficientes. Se recomienda realizar mediciones cada dos días y posteriormente, con más experiencia las mediciones podrán ser más distanciadas. Ferreyra *et al.* (2006) estimaron, según la metodología para datos continuos descrita por Cochran (1971), que para obtener datos que representen adecuadamente la condición de un árbol se requiere medir tres hojas por planta.

Selección y cubrimiento de la hoja. En la mañana del día que se desea medir, se seleccionan las hojas ubicadas a aproximadamente 1,5 m de altura, cercana al tronco o brazo principal. Para realizar las mediciones en palto se recomienda utilizar hojas maduras entre 8 a 12 meses de edad, las cuales se cubren con una bolsa con plástico por dentro y

papel aluminio por fuera, para bloquear la transpiración. Al momento de envolver la hoja, ésta debe estar seca (sin rocío) y en lo posible a la sombra desde que se envuelve hasta la medición. La luz directa del sol sobre la hoja envuelta la calentará, lo que puede causar condensación de agua en el interior y con ello una hidratación artificial de la hoja.

La hoja deberá mantenerse cubierta por 15 minutos hasta que el potencial hídrico (PH) se estabilice (**Figura 21**). Tiempos más prolongados de cubrimiento no afectan las mediciones, siempre que la hoja permanezca seca y sin deterioros. En la figura 20, también se observa que los valores de potencial hídrico medidos en hojas recién cubiertas (PHh), presentan una mayor variación (-0,6 a -0,8 MPa) al compararlo con los potenciales evaluados después de 15 minutos (-0,47 a -0,55 MPa), lo que concuerda con lo reportado por Shackel *et al.* (1997), que indica que el PHh es más variable que el PHx,

Cuando medir. El momento más apropiado para medir potencial hídrico xilemático es a mediodía. Durante este período del día, las condiciones climáticas provocan de máxima tasa de pérdida de agua de la planta. Según Ferreyra *et al.* (2006), en paltos en la zona de Quillota, el potencial es más estable entre 12:30 a 17:30 PM (**Figura 22**).

Recolección de las hojas. Para realizar la medición de potencial hídrico las hojas deben ser desprendidas procurando no dañarlas. Una vez desprendidas se debe realizar un corte transversal en el extremo del pe-

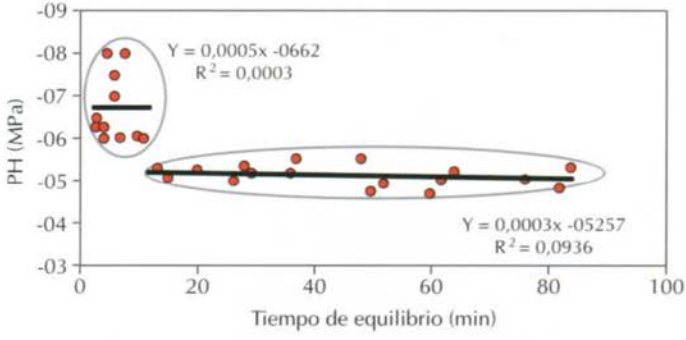


Figura 21. Efecto del tiempo de equilibrio en el potencial hídrico (PH) a mediodía, bajo condiciones de campo, después de cubrirse la hoja.

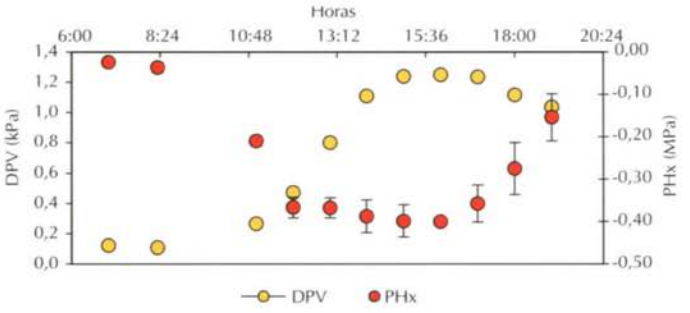


Figura 22. Evolución diaria del potencial hídrico xilemático (PHx) y el déficit de presión de vapor (DVP) en palto var. Hass en el Valle de Aconcagua, Quillota.
Las barras verticales representan la desviación estándar.

cíolo, utilizando algún instrumento muy afilado como una hoja de afeitar doble filo o un bisturí quirúrgico. El tiempo entre la extracción de la hoja del árbol y la medición en la cámara no debe ser muy prolongado, esto es, la medición se debe realizar dentro de un minuto de realizado el corte (**Figura 23**). Tiempos más largos provocan una deshidratación que aunque sea mínima, afecta notablemente las lecturas del potencial xilemático. Por lo tanto, no es recomendable realizar una "recolección de hojas" para medirlas juntas posteriormente. Lo correcto es que una vez cortada la hoja, colocarla en la cámara y realizar la medición inmediatamente. Esto nos obliga a desplazarnos contínuamente con la cámara de presión por el terreno. Una alternativa útil para aumentar el tiempo entre el corte de la hoja y la medición

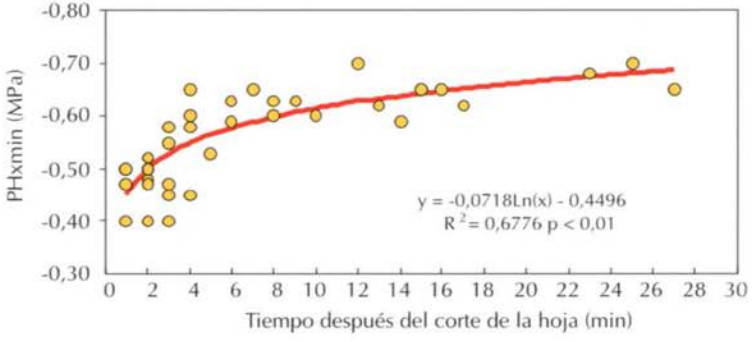


Figura 23. Efecto del tiempo transcurrido entre corte y la medición de la hoja, sobre el potencial hídrico xilemático (PHxmin) a mediodía, bajo condiciones de campo.

del potencial es el uso de una caja de PVC aislada térmicamente (cooler) con alta humedad relativa, donde se deben ir depositando las hojas cortadas. El PHx en hojas de un mismo árbol medidas inmediatamente luego de cortadas y otras después de 60 minutos de almacenamiento, en condiciones de oscuridad, con 100% HR y 5°C, muestran valores similares (**Figura 24**). El uso de esta metodología para medir el PHx es factible de implementar, pero requeriría medir un mayor número de hojas por árbol ya que aumenta la variabilidad. Se estimó el tamaño de la muestra según la metodología para datos continuos descrita por Cochran (1971), la cual indica que para mediciones inmediatamente después de cortada, la muestra debe ser de tres hojas por planta. Para evaluaciones después de 60 minutos de almacenamiento, en condiciones de alta humedad relativa, ésta debe ser de seis hojas por planta.

Medición. Una vez desprendida la hoja del árbol, el pecíolo de la hoja se inserta a través del sello (tapón de goma), el que luego es puesto en la tapa de la cámara, quedando aproximadamente 1 mm de pecíolo asomado fuera de ésta. Luego se procede a cerrar con la hoja sujeta por el pecíolo, quedando la hoja en el interior de la cámara y parte del pecíolo afuera. Como ya se ha indicado, el tiempo desde que se saca la hoja del árbol y se realiza la medición debe ser inferior a un minuto. Es importante que la hoja quede bien apretada por el sello de goma, a objeto de evitar la fuga de gas al momento de aplicar presión. Asegu-

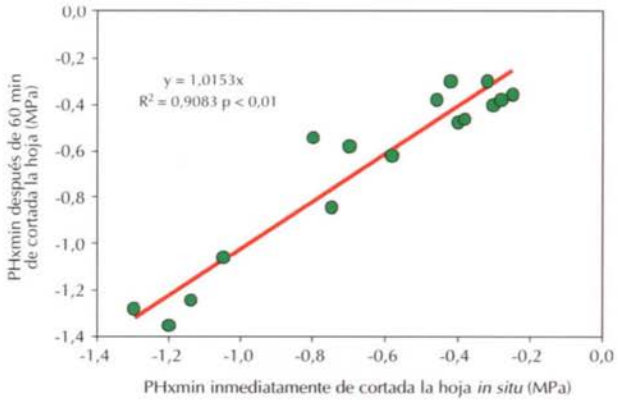


Figura 24. Efecto de la conservación de la hoja en condiciones de alta humedad relativa sobre el potencial hídrico xilemático (PHxmin).

rada la tapa, se hace entrar nitrógeno gaseoso que va aumentando en forma creciente la presión en el interior de la cámara y sobre los tejidos foliares. Esta operación se debe hacer cuidadosamente, ayudado por una lupa manual, mirando el extremo del pecíolo que se encuentra fuera de la cámara, hasta que se observa que una gota de agua empieza a salir por el xilema. A este momento se le denomina «punto final» y la presión que registra el manómetro de la cámara corresponde al potencial hídrico xilemático (PHx). El agua que sale de la superficie del corte del pecíolo aparece como saliendo desde una superficie porosa, sin embargo antes de salir, se observa un ligero cambio de color del tejido que se observa más cristalino.

Normalmente, la presión a la que el agua aparece en el extremo del pecíolo está muy definida y no hay grandes diferencias entre la presión cuando el agua está empezando a salir (primera gota) o cuando sale en mayor cantidad. El punto final óptimo es donde un aumento pequeño de la presión (0.2 bares) causa un aumento notable en el flujo de agua en el extremo cortado, y donde una disminución de la presión (a veces esto necesita ser más de 1 bar) causa que el agua desaparezca rápidamente en el pecíolo.

Si no se está seguro del valor medido, se puede repetir la lectura sobre la misma hoja, sin sacarla de la cámara. Para ello se baja la presión dentro de la cámara, purgando un poco de nitrógeno hacia el exterior, hasta que el agua desaparezca del extremo del pecíolo y luego se aumenta lentamente la presión. Se debe conseguir casi el mismo valor de "punto final". Cuando se realizan repeticiones de lecturas entre varias hojas adyacentes, ubicadas en el mismo brote o dardo, normalmente los valores medidos no difieren en más de 0,3 bares. Esta es una buena forma de verificar la calidad de la medición o comparar los efectos de diferentes técnicas u operadores.

Hay dos problemas comunes que pueden dificultar determinar el punto final. Uno de ellos es el burbujeo y la aparición de agua no xilemática. Si hay rotura en la hoja que está dentro de la cámara, se puede introducir aire por la parte dañada, que empuja agua de otros tejidos hacia el extremo del pecíolo a través del xilema, saliendo por el extremo cortado lo que produce un burbujeo que corresponde a la salida de aire. Si esto suce-

de se puede detener la presurización temporalmente y se puede secar la superficie cortada con un trozo de papel (papel absorvente). Haciendo esto, se detiene el burbujeo sobre el pecíolo y se puede continuar aumentando la presión. Si la superficie cortada se remoja y empieza a burbujear inmediatamente, lo más probable es que se haya sobrepasado el "punto final". Cuando ocurre este tipo de problemas, es recomendable repetir el proceso en una nueva hoja para asegurar la medición.

La aparición de agua no xilemática puede ocurrir también cuando se presiona el pecíolo en el sello y sale agua por el extremo cortado. Si se piensa que es el "punto final", se anota la presión y se seca el extremo cortado aumentando la presión lentamente. Si sale más agua de la superficie cortada, entonces probablemente era el punto final correcto. Por el contrario, si permanece seco se puede deducir que se trataba de agua no xilemática. Un buen conocimiento de la anatomía de la hoja puede contribuir a que el operador pueda diferenciar mejor el punto final correcto (agua del xilema) de la aparición de agua de otros tejidos.

En resumen, para utilizar el PHxmin como controlador del riego en palto es necesario tener en cuenta lo siguiente:

- Los valores de PHx medidos a mediodía en el palto son estables entre las 12:30 y 17:30 horas.
- Los paltos sin restricción hídrica presentan valores de potenciales entre -0,40 a -0,50 MPa, para DVP que oscilan entre 1,4 y 3,0 kPa, respectivamente.
- En las hojas de palto, se equilibra el PHh con el PHx después de 15 min de cubrirlas impidiendo el paso de la luz.
- Una vez cortadas las hojas del árbol, deben medirse en un lapso de tiempo cercano a un minuto.
- Se puede aumentar el tiempo entre el corte de la hoja y la medición del potencial, al mantener ésta en una caja de PVC aislada térmicamente con alta humedad relativa.
- Las hojas que presentan la menor variabilidad son las de 10 a 12 meses de edad y que se encuentran expuestas al sol.
- Las hojas expuestas al sol presentan valores de PHx más negativos (en -0,1 MPa, que aquellas que se encuentran en la sombra, aunque se frene la transpiración de la hoja antes de ser cortada.

5.2.1.3.2 Microvariación del diámetro de troncos

Otra forma de evaluar el estado hídrico de la planta, es la medición de las microvariaciones diarias de diámetro que presentan los órganos de la planta, particularmente el diámetro del tronco. Este método se presenta promisorio en el caso de árboles frutales, donde este indicador ha mostrado ser muy sensible al estado hídrico de la planta.

Las microvariaciones diarias del diámetro de tronco se miden con un captor de desplazamiento lineal o dendrómetro electrónico, que debe instalarse en la base del tronco de la planta y que mide variaciones del orden de 1 micrón (0,001mm). Este sensor se conecta a una central de adquisición de datos, lo que permite realizar mediciones en forma continua. A estas centrales de adquisición de datos (**Foto 27**) también se les pueden conectar sensores para medir las variaciones de diámetro de los frutos (**Foto 28**).

Foto 27.
Dendrómetro de tronco (izquierda) y central de adquisición de datos y consola para bajar información montada en vehículo de campo (derecha).

Foto 28. Sensores electrónicos de crecimiento de tronco (izquierda) y de fruto (derecha) y dendrómetro mecánico de tronco (abajo).

Además de los sensores de tronco y fruto, también existen dendrómetros mecánicos en los cuales se deben realizar lecturas dos veces al día, temprano en la mañana para determinar el diámetro máximo y a mediodía para determinar el diámetro mínimo (Foto 28).

En el transcurso del tiempo, el diámetro del tronco o de cualquier otro órgano, presenta variaciones irreversibles, debido al crecimiento celular; y reversibles, causadas por cambios en su contenido de agua. Así, en un ciclo de 24 horas, durante el período diurno, donde la transpiración es elevada, se produce una fase de reducción de diámetro o contracción de entre una decena a una centena de micrones, seguido de un proceso de rehidratación y crecimiento, durante el período nocturno (**Figura 25**). A medida que disminuye la disponibilidad de agua del suelo como consecuencia de la extracción que realiza la planta, el creci-

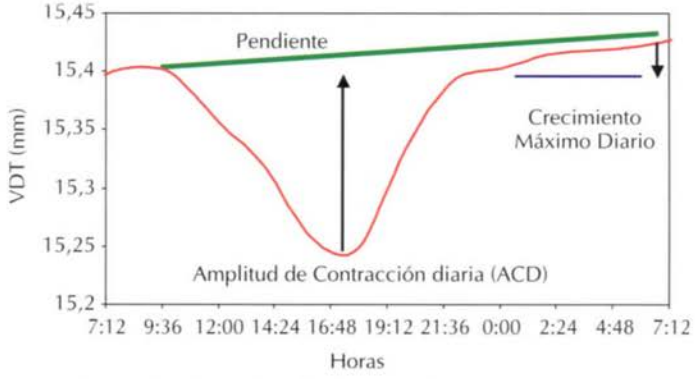


Figura 25. Variación del diámetro del tronco (VDT) en (mm) durante el día en el cultivo del palto var. Hass.

miento o expansión nocturna decrece, pudiendo llegar a ser nulo e incluso negativo. La tendencia del crecimiento diario permite determinar si las condiciones de riego son óptimas o no. En el caso particular de palto, la tendencia del crecimiento pareciera ser el criterio más adecuado. Sin embargo, es importante tener en cuenta el estado fenológico por el que atraviesa el cultivo en el momento de la interpretación de la variación de diámetro de tronco, ya que existe una alta interacción entre el periodo de crecimiento del palto y las mediciones de desarrollo de diferentes órganos del cultivo (Figura 25).

La medición del estado hídrico de una planta a través de las microvariaciones del diámetro del tronco es una técnica de medición continua y no destructiva, relativamente reciente. Entre los factores que influirían en la contracción del tronco se encuentran la especie, la edad del árbol (**Figura 26**), la disponibilidad de agua en el suelo (**Figura 27**), la profundidad y extensión de las raíces y la demanda atmosférica (Kozlowski y Winget, 1964). Garnier y Berger (1986), informaron que en días nublados o lluviosos las contracciones tendían a ser de menor magnitud.

Varios parámetros, derivados de la variación del diámetro del tronco (VDT), han sido considerados para la evaluación del estado hídrico de la planta, siendo el más utilizado la amplitud de la contracción máxima diaria (ACD) (Garnier y Berger, 1986; Goldhamer y Fereres, 2001; Jones, 2004, Sellés y Berger, 1990). ACD, corresponde a la diferencia entre diámetro del tronco máximo (DTMX) y el diámetro mínimo (DTMN)

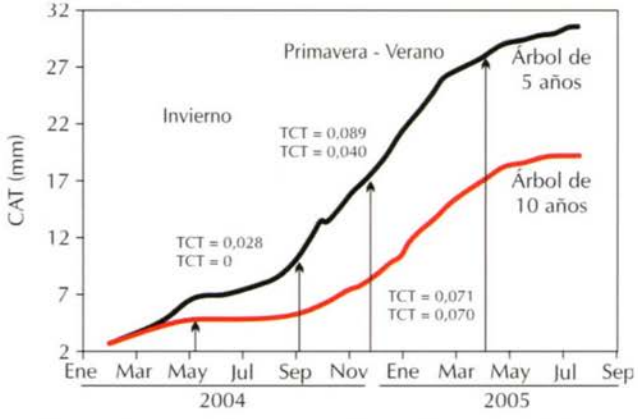


Figura 26. Crecimiento acumulado del tronco (CAT) en paltos de diferentes edades, en la zona de Nogales. TCT = Tasa de crecimiento del tronco (mm/día).

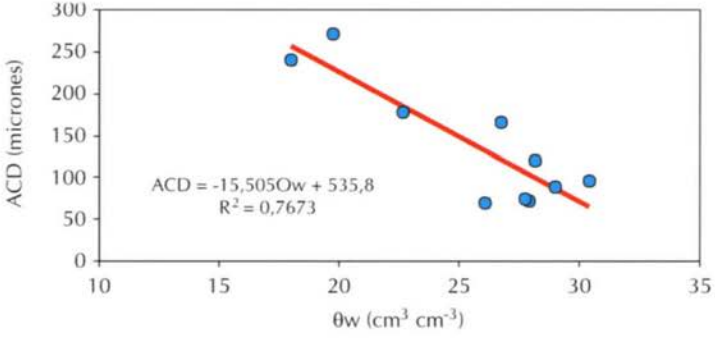


Figura 27. Relación entre la amplitud de la contracción máxima diaria (ACD) y el contenido volumétrico de agua del suelo (θw) ($P<0,01$) en palto var. Hass.

en el transcurso de un día. Huguet *et al.* (1992), postulan que la respuesta de ACD frente al déficit hídrico puede ser especie dependiente y se podría atribuir a características de resistencia radial al flujo de agua y a la capacidad de almacenar agua de los tejidos vivos que rodean al xilema de la planta.

Numerosos estudios han probado que existe una estrecha relación entre las contracciones del diámetro del tronco y el potencial hídrico de la planta (Goldhamer *et al.*, 2000; Cohen *et al.*, 2001).

- **Amplitud de la contracción máxima diaria (ACD) del diámetro de tronco**

Las contracciones máximas diarias del diámetro del tronco (ACD) tienden a ser mayores cuando disminuye el agua en el suelo. En la **Figura 28**, se puede observar que un sector con plantas regadas por microaspersión en forma no frecuente, presentaron mayores contracciones que las regadas en forma diaria por goteo en el mes de marzo. Las plantas regadas por microaspersión cada seis días, presentaron contracciones de 350 micrones y las regadas con tres líneas de goteo en forma diaria, registraron contracciones de 150 micrones.

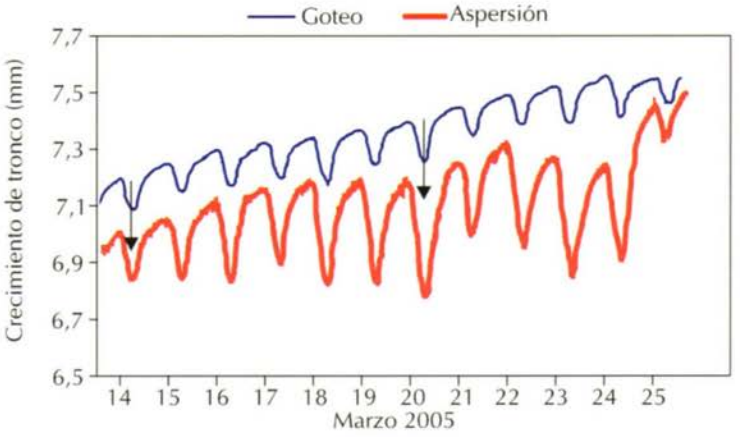


Figura 28. Secuencia de la variación diaria del diámetro del tronco en palto var. Hass en suelo franco-arcilloso, entre el 14 al 25 de marzo de 2005. (La flecha indica riego por microaspersión; por goteo se riega diariamente).

Las variaciones de contracción debido a la diferente frecuencia de riego aplicada por goteo o por microaspersión no tuvieron un efecto importante en el crecimiento total del tronco y en la tasa promedio de crecimiento, como se observa en la **Figura 29**. Entre el 15 de enero y el 30 de marzo, la frecuencia de riego en microaspersión fue de 5 a 6 días y las plantas en esos momentos alcanzaron, antes del riego, un PHxmin de -0,92 MPa, mientras que en mayo, la frecuencia entre riego fue cada 10 días y el PHxmin alcanzaba valores de -0,6 MPa.

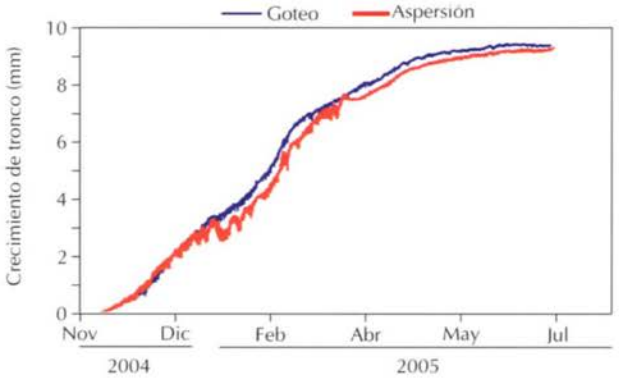


Figura 29. Secuencia de la variación diaria del diámetro del tronco en palto var. Hass entre el 15 de noviembre del 2004 al 8 de junio del 2005.

En la **Figura 30**, se puede observar como las contracciones del tronco aumentan cuando un tratamiento de riego deja de ser aplicado por desperfecto en una válvula solenoide. Las plantas con riego tenían un ACD en septiembre entre 40 y 60 micrones, en cambio las plantas que no se regaron por la avería del equipo (T 2) alcanzaron valores de 140 micrones. Al reparar el sistema, las plantas con problemas de riego recuperaron rápidamente el crecimiento de su tronco.

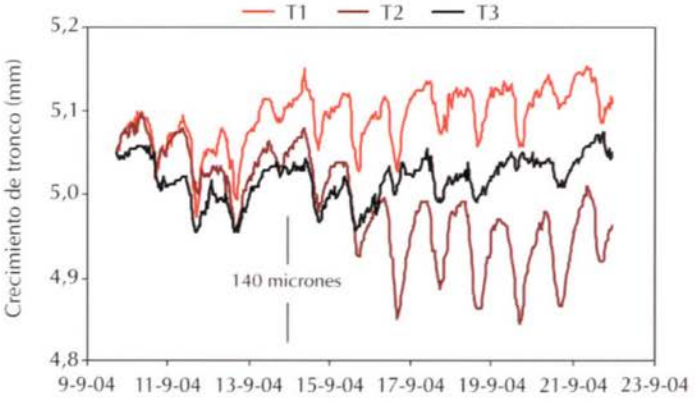


Figura 30. Efecto de la avería de una válvula solenoide en las contracciones máximas diarias del tronco.
T1 = Riego diario Verano UR = 5%; T2 = dos riego a la semana en verano (UR = 30%) T3 = Un riego a la semanal en verano (UR = 45%)

En las **Figuras 31** y **32** se muestran las variaciones de las magnitudes de las contracciones diarias del tronco a través del año, en la zona de Panquehue e Hijuelas. En ambas localidades, las contracciones tienen un patrón común, encontrándose los mayores valores en verano y los menores en invierno. Entre los meses de abril y noviembre, las contracciones en promedio tienen valores cercanos a los 50 micrones. En verano, estos valores varían entre 60 y 175 micrones. En la Figuras 31 y 32, también se aprecia, que esta ACD presenta una alta variabilidad, tema que se tratará en mayor detalle en el punto 5.2.2.

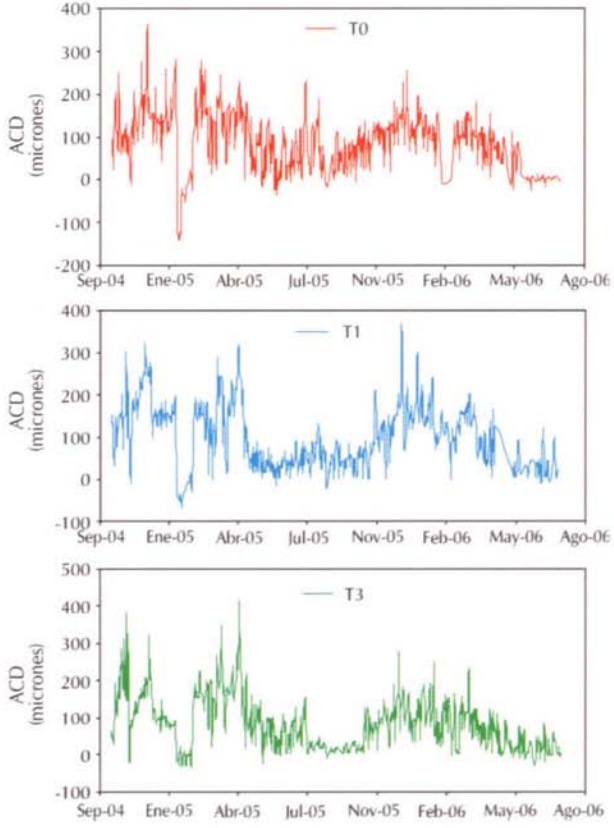


Figura 31. Amplitud de la contracción diaria del tronco (ACD) en palto en temporada 2004/2006 en Panquehue, en plantas sometidas a diferentes frecuencias de riego.
T1 = Riego diario Verano UR = 5%; T3 = Un riego a la semanal en verano (UR = 60%); Predio = Un riego a la semana en verano UR = 55%.

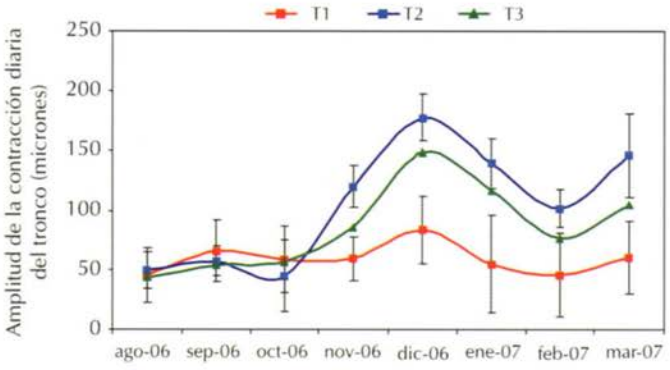


Figura 32. Promedio mensual de la amplitud de la contracción diaria del tronco (ACD) en palto en temporada 2006/2007 en Panquehue, en plantas sometidas a diferentes frecuencias de riego.

Algunos asesores recomiendan la ACD para controlar el riego en palto, indicando que valores de 120 micrones en verano y que 60 micrones en invierno son normales en plantas con buen suministro hídrico. Sin embargo, hay que tener en cuenta la variabilidad de este indicador, consignadas en las Figuras 30 y 31, antes de utilizar valores absolutos como criterio de manejo del riego en palto, aunque las tendencias pueden ser de utilidad.

Crecimiento acumulado del tronco (CAT)

El crecimiento del tronco está relacionado con el suministro hídrico. En las **Figuras 33, 34** y **35** se puede observar, en árboles de palto en producción (aproximadamente 20 ton/ha), que el crecimiento del tronco es muy bajo en invierno, particularmente entre mayo y fines de agosto. En primavera, entre septiembre y principios de diciembre, la tasa de crecimiento varia entre 0,029 a 0,042 mm/día y el mayor crecimiento ocurre en verano, entre mediados de diciembre y marzo, con una tasa que varía entre 0,057 a 0,071 mm/día. Los valores de la tasa de crecimiento son muy estables en los diferentes períodos fenológicos, independiente de la localidad y año.

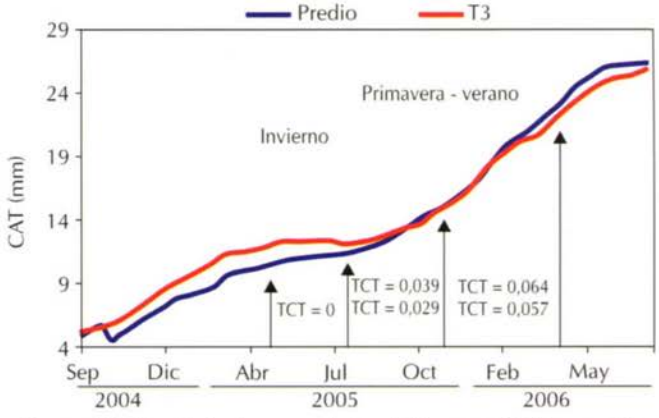


Figura 33. Crecimiento acumulado del tronco (CAT) en palto var. Hass sobre portainjerto mexícola en la localidad de Panquehue, medido con dendrómetro. Temporada 2005/2006.
T1 = Riego diario Verano UR = 5%; T3 = Un riego a la semanal en verano (UR = 60%); Predio = Un riego a la semana en verano UR = 55%.
TCT = Tasa de crecimiento del tronco (mm/día).

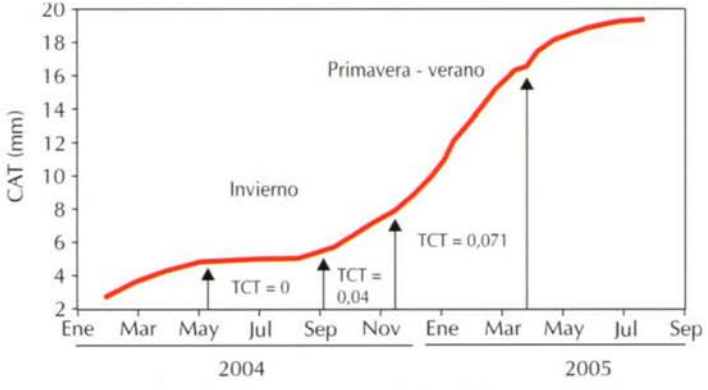


Figura 34. Crecimiento acumulado del tronco (CAT) en palto var. Hass sobre portainjerto mexícola, en la localidad de Nogales, medido con dendrómetro. Temporada 2004/2005.
TCT = Tasa de crecimiento del tronco (mm/día).

Se debe tener presente que la tasa de crecimiento del tronco está estrechamente ligada con el desarrollo de otros órganos (como los frutos), por lo cual, la correcta interpretación de este indicador debe tomar en cuenta la carga y edad de los árboles. En la Figura 26, se observa que la tasa de crecimiento del tronco es muy diferente en árboles con edades y producciones diferentes.

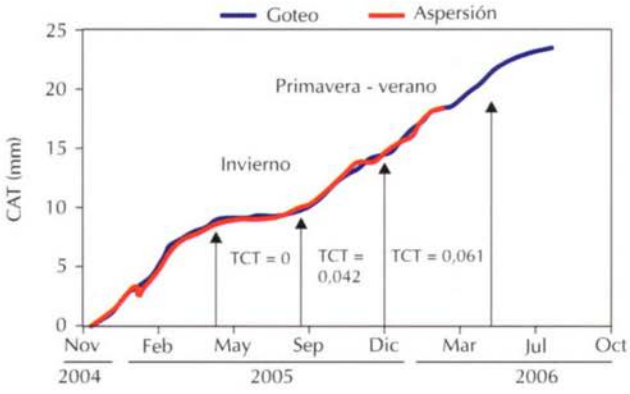


Figura 35. Crecimiento acumulado del tronco (CAT) en palto var. Hass sobre portainjerto mexícola en la localidad de Hijuelas, medido con dendrómetro. Temporada 2005/2006.
TCT = Tasa de crecimiento del tronco (mm/día)

Cuando se utilizan sensores, se espera que éstos representen la situación general del huerto. Para ello, hay que disponer de un número adecuado de sensores y a su vez, tratar de disminuir su variabilidad lo que puede lograrse aumentando el número de árboles muestreados y/o refinando la técnica de medición (Cochran, 1971).

En experiencias realizadas en la V Región, se pudo constatar que los sensores que se ubican en la zona plana de la cara norte del tronco entregan valores con una menor variabilidad. En estas experiencias se utilizaron 12 árboles homogéneos y un total de 6 sensores por tratamiento. Los valores medios de ACD, reportados por los seis sensores ubicado en zonas planas y curvas del tronco, fueron de 47,02 y 41,11 mm y de TCT fueron de 0,042 y 0,034 mm/d, respectivamente. Aunque no hubo diferencia estadística entre esos valores, los sensores ubicados en la zona plana del tronco tendieron a presentar valores con una menor variación (Ferreyra *et al.*, 2005).

Por otra parte, seis sensores ubicados en la cara norte presentaron mayores valores de ACD que los ubicados en el lado sur del tronco. La media de ACD para la cara norte fue de 84,09 mm mientras que para el lado sur del tronco fue de 59,31 mm (**Figuras 36 y 37**), alcanzando

un valor máximo de 118 mm el día 8 en la cara norte y 74 mm, el mismo día en el lado sur. La media del valor de TCT para la cara norte y sur fue de 0,06 y 0,03 mm/d, respectivamente. La menor variación de los ACD y TCT, se presentaron en los valores reportados por los sensores ubicados en la cara norte (Figuras 36 y 37). Esto concuerda con lo señalado por Kozlowski y Winget (1964), que indican que la magnitud de la contracción puede ser distinta en diferentes partes del mismo tallo, en lados opuestos y a diferentes alturas. Entre las razones de estas variaciones, se encontraría las diferencias en la estructura de la madera y la humedad de la corteza.

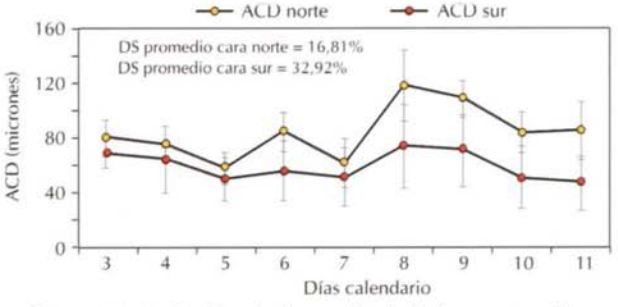


Figura 36. Variación de la amplitud de la contracción máxima diaria (ACD) para la cara de exposición del tronco norte y sur.
DS = Desviación estandar . El valor graficado por tratamiento corresponde al promedio de 6 árboles

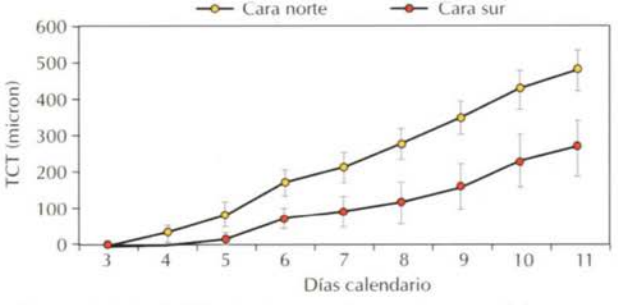


Figura 37. Variación de la tasa de crecimiento del tronco (TCT) de la cara de exposición del tronco norte y sur.
DS = Desviación estandar . El valor graficado por tratamiento corresponde al promedio de 6 árboles

5.2.2 Sensibilidad y variabilidad de los indicadores del estado hídrico de las plantas

Al utilizar un controlador del estado hídrico de las plantas es necesario conocer su sensibilidad y variabilidad.

En la zona central de Chile, en febrero del 2006, en huerto comercial de palto se realizó un ensayo para evaluar la sensibilidad y variabilidad de indicadores del estado hídrico de las plantas (Contracción máxima diaria del tronco, (ACD), Potencial hídrico xilemático (PHx) y conductancia estomática (gs)). Para lo cual, se seleccionaron 12 árboles de palto var Hass, plantado el año 2000, e injertado sobre patrón mexícola, los cuales se regaban en forma diaria por microaspersión. Seis árboles se dejaron de regar por 13 días (sin riego), mientras los otros continuaban con un régimen de riego normal (control). A los árboles sin riego, después del periodo de 13 días, se les aplicaron 300 mm de agua, para posteriormente, continuar regándolos en forma similar a los árboles del control.

En la Figura 14, se presentan algunas de las mediciones realizadas. El tratamiento control presento en promedio una ACD de 69.15 µm y un PHx de - 0,55 MPa. A medida que progresaba el ensayo, las plantas sin riego incrementaron los valores de ACD y PHx llegado a valores de 285 µm y -0,95 MPa, respectivamente.

En los valores obtenidos se puede observar que a los 6 días de cortado el riego (día calendario 53), las ACD presentaron diferencias entre los tratamientos, antes que los otros indicadores del estado hídrico de las plantas. Después del día calendario 61, cuando se aplicaron a las plantas sin riego 300 mm de agua, el PHx y los valores de ACD se homogenizaron.

En la Figura 14, también se observa que los valores de los indicadores presentan una mayor variabilidad cuando en el suelo comienza a disminuir la humedad (tratamiento estrés)

Algunos trabajos en otras especies como olivo y damasco, se ha observado que cuando el estrés se prolonga y llega a ser más severo, el ACD

alcanza un valor máximo y luego comienza a decrecer (Michelakis, 1997; Ruiz-Sánchez *et al.*, 2004). Por otra parte, hacia el final del periodo de déficit, el PHx de las plantas sin riego alcanzó un valor 1,6 veces menor que el control. Este resultado es similar a lo que observaron en almendro Fereres y Goldhamer (2003). En cambio, los valores de ACD, fueron cerca de 3,6 veces mayores al comparar las plantas sin riego con las plantas control. Esto concuerda con los datos reportados por Cohen *et al.* (2001) que indica que en durazneros sometidos a un déficit hídrico moderado, los valores de ACD aumentaron en un 100% al compararlos con un tratamiento de riego normal. Fereres y Goldhamer (2003) indican que en almendro, al final del ciclo de estrés hídrico, los valores de ACD son 400% mayores que el tratamiento control.

Cuando se ajustan los valores absolutos de ACD y PHx de las plantas sin riego a valores relativos respecto al primer día del tratamiento (Día 47), se pudo observar que, el ACD es más sensible al estrés hídrico que el PHx. Cuando el PHx aumenta en un 100%, el ACD se incrementa en un 236% (**Figura 38**). Estos resultados son similares a los obtenidos por Garnier y Berger (1986) en otra especie.

Otra forma de determinar la sensibilidad al estrés hídrico de un indicador es hacerlo mediante la relación denominada intensidad de la señal (Estrés/Control). En este sentido, se puede observar que las contracciones del tronco son más sensibles al déficit hídrico que el PHx, puesto

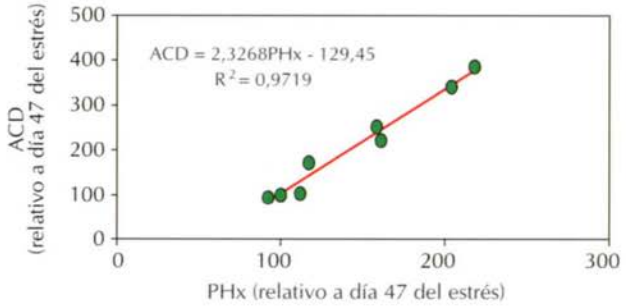


Figura 38. Relación entre la amplitud de la contracción máxima diaria (ACD) y del potencial hídrico xilemático (PHx) relativo de la planta sin riego respecto al primer día del tratamiento (día 47).

que su intensidad de la señal alcanza a 4,5 hacia el final del período de estrés. En tanto que el PHx no alcanza a 2 (**Figura 39**).

Los resultados anteriores confirman que el ACD es más sensible que el PHx puesto que la intensidad de su señal es mayor, lo que concuerda con lo reportado por Goldhamer *et al.* (2000) y por Fereres y Goldhamer (2003) para otros frutales.

En general, a medida que el déficit hídrico se hace más pronunciado, la variabilidad del indicador se hace mayor. En palto, Chartzoulakis *et al.* (2002) evidenciaron esto en la conductancia estomática. Lo mismo ocurrió para PHx, ACD y la transpiración según lo observado por Naor y Cohen (2003) en manzano. La desviación estándar de ACD en el tratamiento estrés es mayor en comparación a la desviación estándar del control, a medida que el déficit hídrico del suelo se hace más pronunciado (**Figura 40**). Algunos autores han propuesto que esta dispersión de los datos, por sí misma, podría ser utilizada como un indicador de estrés hídrico (Aston y Van Bavel, 1972).

La alta variabilidad del tratamiento sometido a estrés estaría dada por el incremento en la variabilidad de la humedad en el suelo cuando el contenido de agua en la zona de raíces disminuye. Es decir, la variabi-

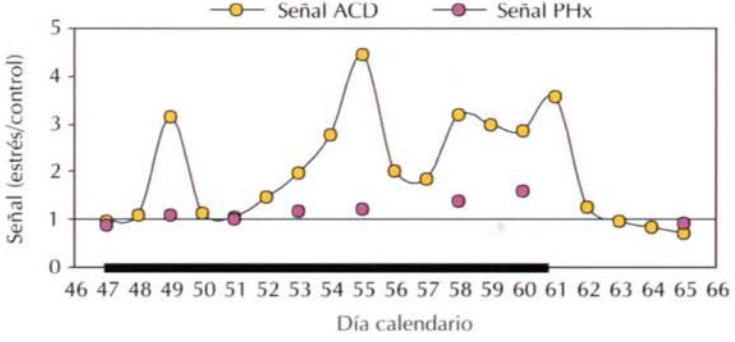


Figura 39. Intensidad de la señal (Estrés/Control) de la amplitud de la contracción máxima diaria (ACD) y del potencial hídrico xilemático (PHx).
La barra horizontal gruesa indica la duración del período de déficit.

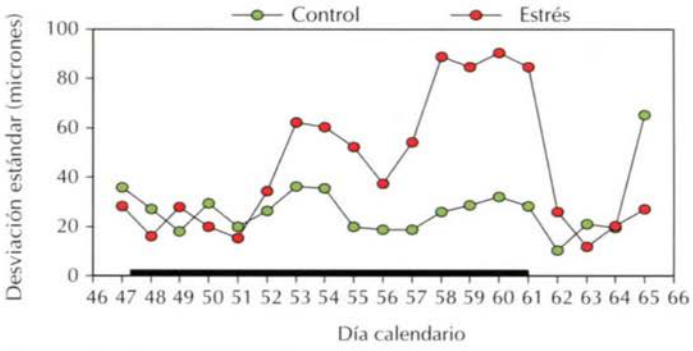


Figura 40. Desviación estándar de la amplitud de la contracción máxima diaria (ACD) del tratamiento control y del estrés.
Cada punto representa la desviación estándar de seis mediciones.
La barra horizontal gruesa indica la duración del período de estrés.

lidad llegaría a ser más pronunciada cuando la humedad del suelo es un factor limitante (Naor y Cohen, 2003).

Al comparar los diferentes indicadores, se observa que las mediciones de ACD tienen una mayor variabilidad al compararlas con el PHx y la conductancia estomatica (gs) (**Figura 41**).

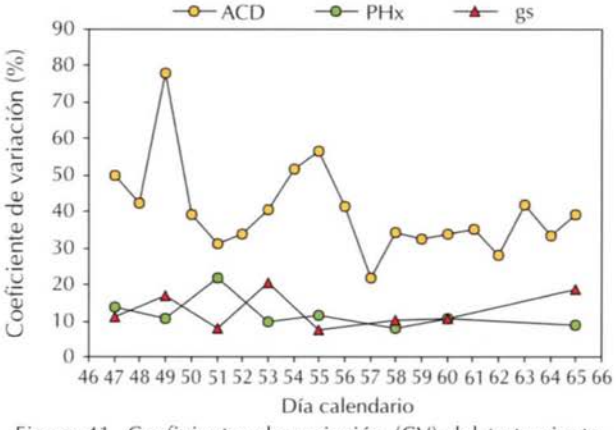


Figura 41. Coeficientes de variación (CV) del tratamiento control de la amplitud de la contracción máxima diaria (ACD), el potencial hídrico xilemático (PHx), y la conductancia estomática (gs).

La mayor variabilidad de ACD respecto a PHx podría atribuirse a diferencias en la conductividad del agua entre la corteza y los vasos del xilema. Estas fuentes de variación serían independientes del estado hídrico de la planta (Naor y Cohen 2003). Fereres y Goldhamer (2003), indican que la mayor variabilidad de la ACD se debe en parte a que el dendrómetro mide en una pequeña porción del tronco, mientras que el PHx da una medición representativa de la canopia entera.

Una consecuencia de los resultados anteriores es que, dada la variabilidad de las mediciones de crecimiento del tronco respecto del PHx, el número necesario de sensores para determinar el estado hídrico de la planta con dendrómetros es necesariamente alto. Una alta variabilidad de las mediciones podría requerir de un gran número de árboles para representar adecuadamente el estado hídrico de un cultivo, aumentando los costos de monitoreo para disminuir la incertidumbre (Goldhamer *et al.*, 2000). Una forma práctica de abordar este aspecto, es mantener en el huerto un sector "testigo" el cual esté adecuadamente regado y con buen crecimiento e ir comparando el comportamiento del resto del huerto para realizar los ajustes de riego que se requieran.

En resumen, los indicadores derivados de las variaciones del diámetro del tronco son más variables que otros indicadores discretos del estado hídrico de la planta, como el PHx. Esto genera dudas respecto al número necesario de árboles que se debe instrumentar, para determinar adecuadamente el estado hídrico de un huerto de palto. Por otra parte, los indicadores derivados de las variaciones del diámetro del tronco son más sensibles al estrés hídrico que otros indicadores discretos del estado hídrico de la planta, lo que es de gran una utilidad para el control del riego en palto.

RECUPERACIÓN DE UN HUERTO DE PALTO VAR. HASS CON PROBLEMAS DE ASFIXIA RADICULAR: UN ESTUDIO DE CASO

J. Celedón A., R. Ferreyra E., G. Sellés van Sch., P. Gil M., C. Barrera M., P. Maldonado B.

A continuación, se presenta un resumen de una experiencia desarrollada en un huerto de palto var. Hass para recuperarlo de la condición de asfixia radicular en que se encontraba. Esta situación de huertos con problemas de asfixia de raíces, ya sea por mal manejo del riego, suelos con aireación deficiente o una combinación de ambos factores, afecta a una gran cantidad de agricultores y representa un problema de gran importancia en esta especie. Por lo anterior, las técnicas aplicadas en este estudio de caso y las conclusiones que se puedan extraer pueden servir como una guía para solucionar este tipo de problemas o como evitar que se produzcan.

6.1. Descripción del área

El predio donde se realizó este estudio de caso se ubica en la zona de Limache (V Región), en un área que se caracteriza por un clima Mediterráneo Subtropical Húmedo con una temperatura máxima media diaria en el mes más cálido (enero) de 26,9°C y una mínima media diaria en el mes más frío (julio) de 4°C. La precipitación anual se concentra entre los meses de mayo y septiembre (383,5 mm/año) y la evapotranspiración promedio anual es de 1024 mm.

El huerto se estableció en una ladera de cerro de exposición sur con pendientes de 40% aproximadamente. El suelo, presenta un horizonte A en los primeros 50 cm. de textura franca y un horizonte B, de acumulación de arcillas de textura arcillo limosa en profundidad (**Figura 42**). El perfil natural del suelo fue modificado para la construcción de terrazas en curvas de nivel.

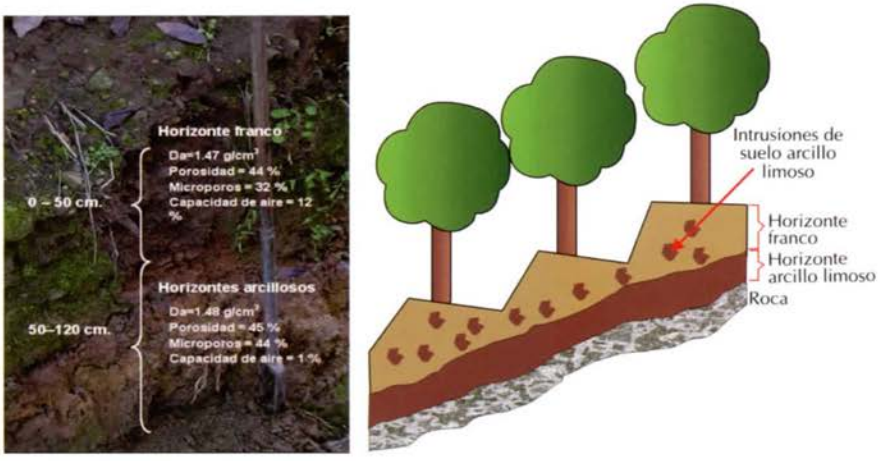


Figura 42. Esquema del perfil de suelo y diseño de plantación.

6.2 Equipo de riego

El sistema de riego utilizaba agua de canal y de pozo, las que se acumulan en un tranque antes de ser elevadas hacia los sectores de riego. Las terciarias o submatrices se diseñaron en el sentido de la pendiente y alimentan las laterales que van por las terrazas en curvas de nivel. La diferencia de cota entre la primera y última lateral es de aproximadamente 30 metros, lo que provocaba un exceso de riego en los árboles ubicados en las posiciones bajas, debido al desagüe de las tuberías cuando se termina el riego.

Los emisores eran microaspersores autocompensados de distintas marcas y modelos que se disponen de un emisor por árbol. El caudal promedio de los emisores es de 44 lts/hr con un coeficiente de uniformidad de 45%.

Durante la operación del equipo se observaba una acumulación de agua al pie del talud de la terraza, producto del mayor diámetro de mojamiento del emisor comparado con el ancho de la terraza (**Figura 43**).

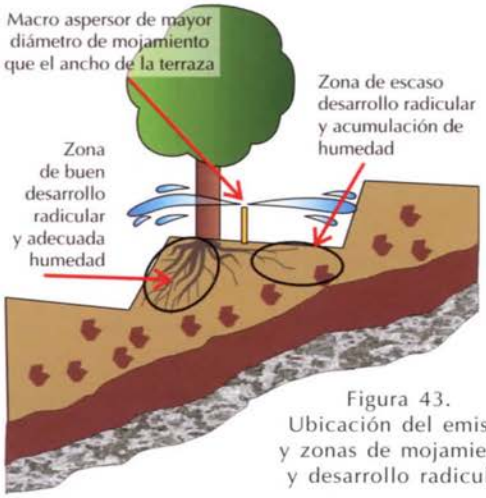


Figura 43.
Ubicación del emisor y zonas de mojamiento y desarrollo radicular

6.3 Condición inicial de los árboles

Los árboles fueron plantados en 1998 y los problemas de asfixia se comenzaron a presentar el año 2002. El estado de los árboles cuando se inició el estudio de caso no era bueno. Se podía observar un color verde amarillento en el follaje y una importante caída de hojas como se observa en la **Foto 29**.

Muchas hojas presentaban quemaduras en las puntas y un tamaño de lámina menor al normal. Se observaban escasos brotes nuevos y los que habían eran débiles. La fruta tenía un calibre más pequeño comparado con otros huertos de la zona.

Foto 29. Árboles asfixiados en la condición inicial.

Para evaluar el estado de las raíces se realizaron dos calicatas en árboles representativos de la condición del huerto. En ellas se pudo observar que las raíces estaban concentradas en la zona del talud de la terraza donde existían mejores condiciones de humedad y aireación. Casi no habían raíces o estaban muy dañadas en la zona plana de la terraza donde se acumulaba el agua y había exceso de humedad (Figura 43).

La producción frutal de los últimos 5 años del sector fue en promedio 4.000 kg/ha.

6.4 Prácticas y manejos realizados para recuperar el huerto

• Mejoramiento del equipo de riego

Como primera medida, se cambiaron todos los emisores por microaspersores de menor diámetro de mojamiento. Con esto se disminuyó el problema de las zonas de saturación que se provocaban a los pies de las terrazas debido al choque del agua con el talud. Además, se eliminaron los emisores que estaban obturados o que funcionaban en forma defectuosa.

El segundo cambio importante realizado al equipo de riego consistió en la instalación de válvulas antidrenantes para solucionar el problema de exceso de riego que se produce en las zonas de menor cota.

El aspecto más relevante en el mejoramiento del riego fue el aumento de la uniformidad. Con estos cambios, se logró aumentar el coeficiente de uniformidad de un 45% a un 96%.

• Programación y control de riego

En una segunda etapa, luego de contar con un equipo de riego adecuado y operando en buenas condiciones, durante noviembre de 2004, se procedió a aplicar un programa de riego que permitiera asegurar que no se produjeran condiciones de asfixia en el suelo. Para esto, se regó con frecuencias de riego distanciadas que permitieran mejorar la aireación y a la vez, la entrega del agua que requerían los árboles. Para

ello, se empleó un umbral de riego de aproximadamente 30%, es decir se permitió agotar el 30% de la humedad aprovechable antes de reponer el agua. Con esta metodología se regó el huerto durante dos meses, en los que se observó una leve mejoría en la condición de los árboles. Para monitorear los riegos se utilizaron sensores FDR de humedad de suelo y barreno.

• Poda y aplicación de hormonas

Al cabo de los dos primeros meses de intervención se evaluó el avance de los árboles y se decidió hacer un cambio de planes debido al estancamiento en la condición del huerto. Así en febrero del 2005, se realizó una poda de rebaje a nivel de ramas madres (**Figura 44**), antes de la cual se dio un riego profundo para dejar el suelo a capacidad de campo.

Después de una a dos semanas sin regar, comenzaron a aparecer brotes que rápidamente crecieron. Durante este período se monitoreó el riego a barreno y el criterio de riego fue dejar que el árbol consumiera un 30% del agua aprovechable en el suelo antes de reponerla. Cuando los brotes alcanzaron 20 centímetros de largo se realizó una aplicación de hormonas para estimular el crecimiento vegetativo. El efecto fue positivo observándose un aumento del vigor en el crecimiento vegetativo, aunque los brotes no alcanzaron un crecimiento muy notorio, debido a

Figura 44. Esquema de la poda a ramas madres. Huerto paltos var. Hass en Limache. Febrero de 2005.

que la poda se realizó a fines del verano y no se aplicaron fertilizantes por riesgo de tener brotes muy suculentos que pudieran quemarse con las heladas de invierno.

Desde el comienzo de la brotación se observó una alta heterogeneidad en el vigor de los árboles. Una posible causa que podría explicar esto serían las diferentes condiciones iniciales con que se encontraban los árboles. Algunos presentaban troncos de mayor diámetro y un follaje en mejores condiciones, en cambio otros presentaban troncos de menor diámetro y follaje más débil. Estas diferencias en el diámetro de troncos y follaje posiblemente fueron debido a diferencias en las reservas disponibles para la brotación, lo que explicaría la heterogeneidad del vigor de los árboles. Para compensar las diferencias de vigor se realizó una aplicación de hormonas dirigida sólo a los árboles de menor brotación.

• Fertilización

En septiembre de 2006, cuando los brotes tenían 40 centímetros de largo, se observó una deficiencia leve de nitrógeno en las hojas. Para solucionar este problema y favorecer el crecimiento de los brotes en primavera, se aplicó el equivalente a 40 unidades de nitrógeno por hectárea.

• Manejo del riego después de la poda

Después de la poda, el manejo del riego tuvo por objetivo mantener una buena humedad de suelo en los árboles de brotación menos vigorosa. Esto provocó un grado de estrés leve a medio en los árboles más vigorosos los que naturalmente requerían más agua debido al mayor follaje. Sin embargo, si no se hubiera manejado el riego de esta forma, los árboles de brotación más lenta se hubieran asfixiado nuevamente. Los árboles de mayor tamaño probablemente extendieron sus raíces hacia el horizonte arcillo-limoso donde existía una mayor reserva de agua y de esta forma sólo evidenciaron síntomas leves de estrés hídrico.

En todo momento la frecuencia de riego se determinó con umbrales de riego altos, es decir, se permitió que el suelo agotara aproximadamente un 30% de la humedad aprovechable. El objetivo de este manejo

fue asegurar una buena aireación del suelo por la mayor cantidad de días posibles.

Como se puede observar en las **Fotos 30** y **31**, los árboles del estudio presentaron un color verde más intenso y menos amarillo, diferenciándose claramente de los árboles asfixiados. También es posible observar el crecimiento entre octubre de 2005 (Foto 30) y abril de 2006 (Foto 31).

Foto 30. Vista del sector del estudio en huerto var. Hass. Octubre de 2005.

Foto 31. Vista del sector del estudio en huerto var. Hass. Abril de 2006.

Luego de un año de la poda, las diferencias entre los árboles del estudio y los del resto del huerto eran evidentes. El follaje era de un verde oscuro e intenso en los árboles del estudio y pálido y amarillento en los árboles vecinos que no recibieron ningún tratamiento. Además del color, la cantidad y calidad de las hojas era muy distinta, siendo mucho mejor en los árboles del estudio (**Fotos 32** y **33**). Lo anterior se comprobó con una medición de índice de área foliar el que fue de 5,2 en los árboles recuperados y de 2,4 en los árboles asfixiados (**Figura 45**).

Foto 32. Comparación de la condición de árboles recuperados (der.) y asfixiados (izq.).

Foto 33. Follaje de árboles recuperados respecto a árboles asfixiados.

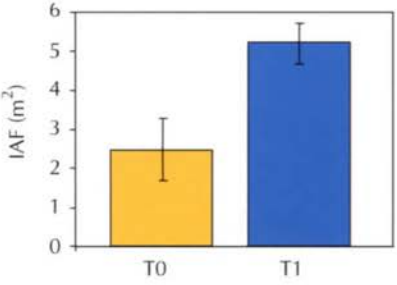


Figura 45. Índice de área foliar (IAF), en planta tratadas (T1) y testigos (T0).

Mediciones de potencial hídrico xilemático (PHx) de medio día realizadas en febrero en los árboles recuperados, tuvieron valores de -0,5 a -0,6 MPa, los que indican una condición normal y de un árbol sano. En cambio, mediciones en árboles asfixiados tuvieron valores de -1,2 MPa y humedad de suelo sobre capacidad de campo en los árboles asfixiados.

Otro aspecto destacable observado en esta experiencia, fue que un grupo de 4 árboles vecinos al sector del estudio, que también fueron podados al mismo tiempo y con el mismo criterio. Sin embargo, por no pertenecer al estudio, estos árboles no tuvieron el manejo de riego que los otros y se siguieron regando según el programa definido en el predio. En un comienzo estos árboles brotaron en forma similar a los del estudio, pero al cabo de dos o tres semanas, se observó una detención del crecimiento. Posteriormente, los árboles comenzaron a mostrar síntomas cada vez más claros de asfixia, hasta llegar a una condición similar a la del resto del huerto (**Foto 34**). El único factor que fue distinto entre los árboles del estudio y éstos, y que podría explicar la detención del crecimiento y asfixia, fue el manejo del riego.

Foto 34. Árboles sometidos a poda pero sin cambió del manejo de riego. Huerto var. Hass. Limache.

De este trabajo se desprende que el manejo del riego es un factor clave tanto en la recuperación de un huerto asfixiado, como para evitar que este llegue a condiciones de asfixia. Por otra parte, sólo el manejo del riego no es suficiente para recuperar los árboles con asfixia severa como los de este estudio de caso en que fue necesario hacer una poda a las ramas madres. Si el manejo del riego después de la poda vuelve a provocar excesos de humedad en el suelo, los árboles rápidamente vuelven a presentar los síntomas de la asfixia.

MANEJO DEL SUELO Y NUTRICIÓN EN SUELOS CON PROBLEMAS DE AIREACIÓN

R. Ruiz Sch., R. Ferreyra E., G. Sellés van Sch.

El palto probablemente es una de las especies más sensibles a los problemas de falta de aire y por lo tanto a la escasez de oxígeno en el suelo. Por otro lado, los problemas de circulación de gases en el suelo derivados de una mala estructura, implican una acumulación de CO_2 que, como se verá también, afectan el desarrollo del cultivo. Es probable que esta sensibilidad del palto a la falta de aireación tenga que ver con el origen evolutivo de la especie.

El traslado del cultivo del palto a condiciones edáficas o químicas más desfavorables hace que frecuentemente se presenten problemas de «decaimiento» que pueden ser severos y que bajan la productividad o calidad del producto debido a asfixia radicular.

Este capítulo pretende clarificar algunos aspectos nutricionales asociados a los efectos de una mala aireación, derivados de problemas físicos del suelo o de la implementación de criterios de riego no ajustados a las características del suelo.

7.1 Asfixia radicular del palto y su relación con problemas físicos del suelo

En los últimos años se ha generado una conciencia de que existen muy pocos suelos con condiciones físicas adecuadas al crecimiento del palto, de allí que se haya generalizado la técnica de plantación en camellones. El camellón permite independizarse de algunas propiedades negativas del suelo original, a la vez que otorga mayor seguridad para el drenaje del agua. Sin embargo, es frecuente observar problemas de «decaimiento», a veces con resultado de muerte de los árboles, aún en camellones. El decaimiento consiste en que árboles que

hasta ese momento han estado creciendo y produciendo en forma normal, comienzan a mostrar síntomas leves de amarillamiento del follaje, hojas abarquilladas, caída anormal de hojas y frutos, así como un crecimiento de brotes muy disminuido o nulo. En grados más avanzados, aparecen síntomas necróticos en los márgenes y ápices foliares. El resultado es una pérdida paulatina del vigor y productividad de los árboles.

Las diferencias entre plantas afectadas y sanas, claramente visibles en la parte aérea, en general están relacionadas con las características del perfil de suelo y la concentración de raíces.

En la **Figura 46**, se presenta la densidad de raíces en el camellón en plantas afectadas y normales. Las plantas afectadas presentan un menor número de raíces que las plantas normales.

La escasez de raíces en las plantas con decaimiento (Figura 46) está relacionada con la textura del suelo, franco-arcillosa a arcillosa hasta los 60 u 80 cm de profundidad y la estructura masiva que rompe a bloques angulares. Estas características producen problemas en el crecimiento radicular del palto ya que propician una baja capacidad de aire (13,2%). De hecho, en las plantas afectadas se observó una gran canti-

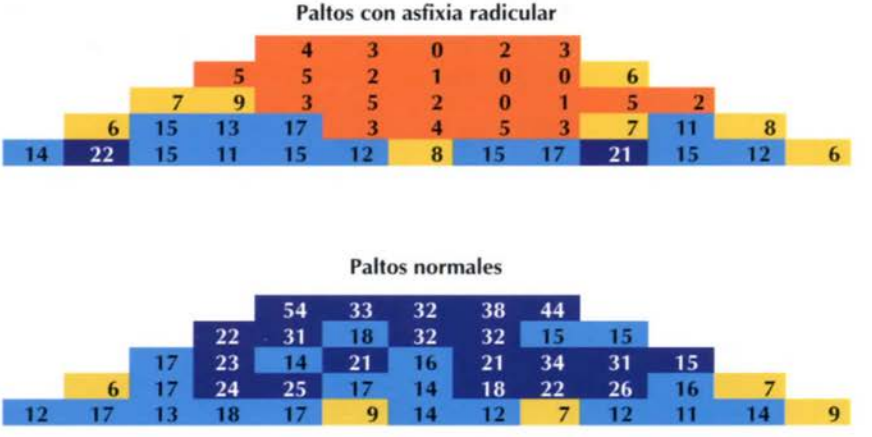


Figura 46. Densidad de raíces en paltos con asfixia radicular y normales plantados en camellones.
(Número de raíces en 400 cm^2). Las cuadrículas son de 20 x 20 cm.

dad de raíces muertas. En profundidad, las propiedades cambian; la textura es franca (con abundante gravilla granítica) y la estructura es de bloques subangulares, mejorando el enraizamiento, con una macroporosidad de 26%. Sin embargo, esta mejoría de condiciones en el subsuelo profundo no es suficiente para sustentar el árbol.

En contraste a lo anterior, los paltos normales y sanos, creciendo en un sector adyacente, indican un camellón totalmente diferente, con adecuado enraizamiento en todo el perfil, texturas moderadamente gruesas; francas arenosas a francas con abundante gravilla granítica. Los valores de capacidad de aire determinados fueron superiores al 25% en todo el perfil.

El análisis de varios casos puntuales como el indicado, da la certeza que siempre que existen problemas de decaimiento es por consecuencia de un problema de raíces asociado a las propiedades físicas del suelo y/o a condiciones de riego que conducen a asfixia radicular.

7.2 Asfixia radicular y problemas nutricionales

Los componentes nutricionales asociados a paltos decaídos parecen obvios. Algunos de los síntomas se asemejan a déficit o toxicidad nutricional. Sin embargo, los análisis de hojas del mismo tipo y edad en cuatro casos, contrastando árboles decaídos respecto a sanos, indica una situación distinta a la esperada.

En la **Figura 47,** se indican los niveles nutricionales de N, P, K y Ca. En ella se observa que los valores foliares de los elementos indicados no varían en árboles decaídos respecto a sanos.

En la **Figura 48,** se indican los niveles determinados para microelementos, sodio y cloruros. Como se observa, los valores difieren substancialmente, siendo mucho mayores en los árboles decaídos, llegando en algunos casos a niveles de toxicidad (cloruro y probablemente cobre). Sin embargo, estos cambios nutricionales no explican totalmente el fenómeno del decaimiento, sino que son consecuencia de un profundo cambio metabólico producido por el estrés radicular.

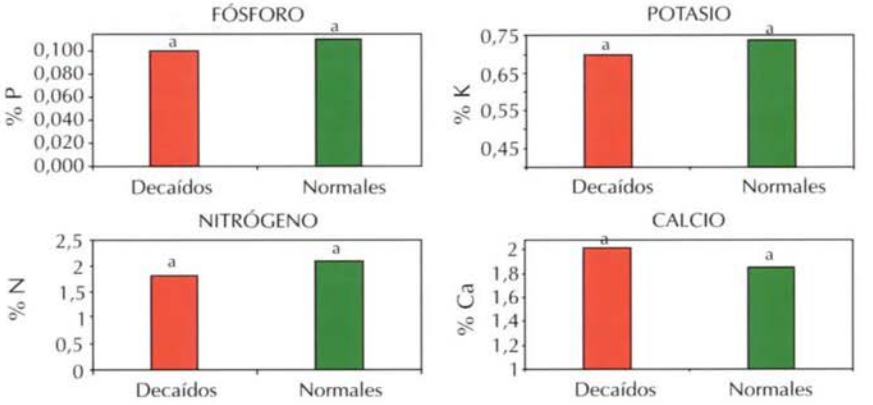


Figura 47. Comparación de niveles foliares en árboles «decaídos» vs. árboles sanos.

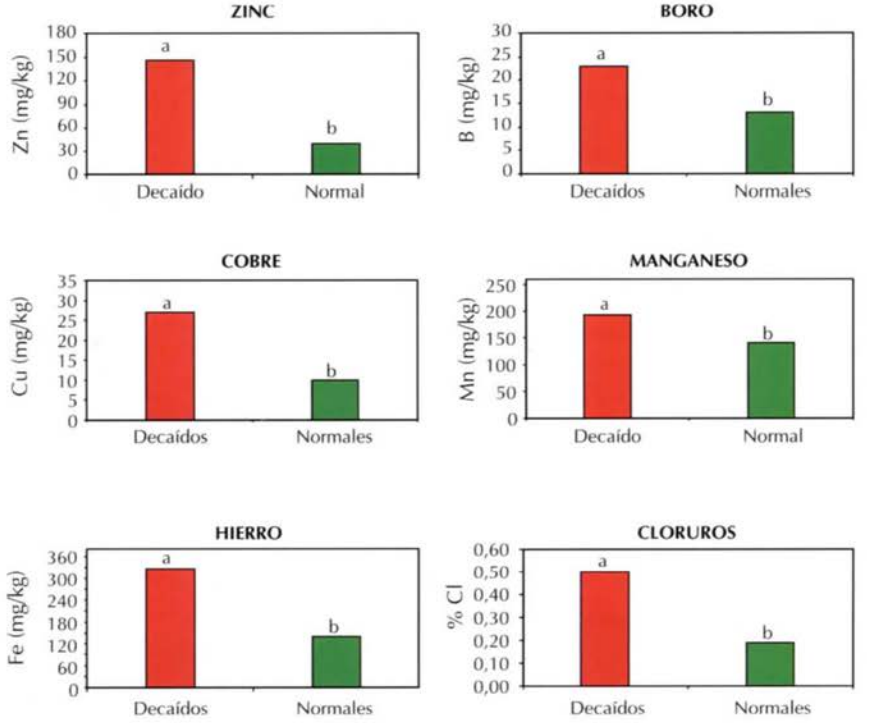


Figura 48. Comparación de niveles foliares de microelementos, boro y cloruros en árboles «decaídos» respecto de árboles sanos.

Es conocido en otras especies que la anoxia radicular, en este caso deducida de la gran cantidad de raíces muertas, genera desde las raíces señales bioquímicas, tales como ácido abcísico, con resultado de cierre estomático y menor fotosíntesis. Por otro lado, el ácido abcísico genera etileno, el cual acelera los fenómenos de senescencia y pérdida de clorofila. En este hipotético cuadro, es posible explicar que los elementos nutritivos móviles emigraron a sitios de reserva (ramas, troncos, raíces), como parte de un fenómeno de senescencia precoz, al contrario de los inmóviles (microelementos y cloruros). Estos últimos incrementan fuertemente su concentración debido a la migración de azúcares desde las hojas a sitios de reserva y por ende, el mismo contenido nutricional en menor materia seca, que es la base del análisis, se incrementa. El hecho de que el contenido de elementos móviles no suba implica que necesariamente se retranslocaron a sitios de reservas.

De lo anterior, surge la pregunta ¿a qué se debe entonces el amarillamiento de las hojas?. En este caso, ya que podemos descartar el N como problema inductor de la clorosis, las determinaciones vía SPAD (**Figura 49**) nos confirman que las hojas afectadas poseen mucho menos clorofila que las sanas, siendo ésta la causa del amarillamiento.

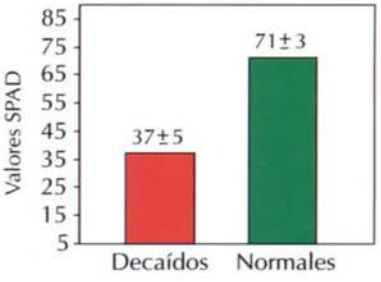


Figura 49. Determinaciones SPAD en hojas de árboles decaídos respecto a normales.

Se puede afirmar que la sintomatología «nutricional»; amarillamiento leve a moderado y la necrosis presente en las hojas de los árboles obedecería, por una parte, a menores niveles de clorofila que es el pigmento que da el color verde a las hojas, mientras que la necrosis parece relacionada a toxicidad inducida por cloruros y posiblemente cobre (**Foto 35**). Sin embargo, el trastorno como un todo, parece estar correlacionado con una profunda alteración metabólica derivada de problemas físicos del suelo conducentes a la asfixia radicular.

Determinaciones de reservas de carbohidratos en raíces evaluadas durante el mes de agosto del 2006, presentan una similitud entre árboles

Foto 35.
Árbol con necrosis en las hojas producto de toxicidad por cloruros y posiblemente cobre relacionado con problema de asfixia radicular.

decaídos y sanos, lo cual indicaría que en los árboles decaídos habría ocurrido una migración de azúcares desde la parte aérea. Esto ayudaría a explicar porqué los árboles decaídos pueden ser recuperados totalmente después de una poda intensa y una mantención de esta condición con un manejo adecuado de las condiciones del riego.

Es nuestra hipótesis que el grave problema indicado deriva de falta de aire en el suelo. La correcta elección de los materiales del suelo para construir el camellón aparece como vital para explicar las grandes diferencias observadas, incluso dentro de un mismo cuartel. Texturas finas tienden a producir mayores problemas de decaimiento que las gruesas. En el área de lomajes y cerros estas diferencias texturales entre suelo y subsuelo son aún mayores. Como precaución será necesario efectuar previamente a la construcción del camellón un estudio del perfil para examinar y determinar cuales son las estratas aptas para construirlo en cada sector predeterminado.

7.3 Aireación y problemas químicos del suelo

La clorosis férrica es un problema en muchas de las áreas que se están habilitando para plantaciones de palto. De acuerdo a nuestras observa-

ciones, también frecuentemente está incluido el zinc como causante de la clorosis, en cuyo caso no podría hablarse de clorosis «férrica».

El diagnóstico del problema de la clorosis férrica propiamente tal es complejo, tanto vía análisis de suelo como foliar. De hecho, el análisis foliar convencional (determinación del Fe total de las hojas) es ineficiente para el diagnóstico (Figura 48), tal como ocurre en varias especies. Por otra parte, el problema se da con una connotación muy particular; puede coexistir un árbol fuertemente afectado con uno sano inmediatamente vecino (**Foto 36**). Esta situación indica que cambios sutiles de la química del suelo y de las condiciones de aireación, hacen que el problema se presente o no.

Foto 36. Palto con evidencia de clorosis.

7.3.1 Dinámica del hierro en el sistema suelo-planta

La forma metabólica activa del hierro es la Fe^{+2}. El hierro es vital para la formación de la molécula de clorofila aunque no sea parte integrante de ésta. En la **Figura 50**, se observa que sin hierro no hay formación de clorofila, molécula vital para la producción de azúcares. Las formas químicas solubles del hierro en el suelo son la Fe^{+2} y la Fe^{+3}.

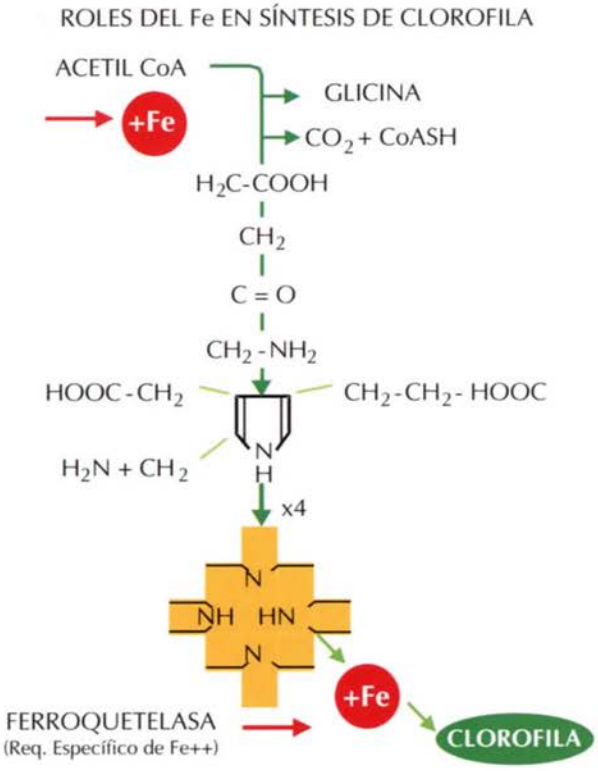


Figura 50. Dinámica del hierro

Ambas se encuentran en muy baja disponibilidad en los pH de suelos alcalinos en que ocurre normalmente la clorosis férrica.

Las condiciones reductivas u oxidativas del suelo hacen variar la proporción de una y otra en solución, de acuerdo a:

Condiciones reductivas

$Fe^{+3} \rightleftharpoons Fe^{+2}$

Condiciones aireadas

Otro elemento directamente implicado en la nutrición del Fe son los bicarbonatos (ión HCO_3^-), los cuales interfieren negativamente en la

absorción de Fe^{+2}. Los bicarbonatos pueden acumularse en el suelo debido a varios procesos, los que se detallan a continuación.

En primer lugar, la propia respiración radicular y de la fauna microbiana implica absorción de O_2 y expulsión de CO_2. Este CO_2 se disuelve en el agua de la solución del suelo de acuerdo a:

$$CO_2 + H_2O \longrightarrow H_2CO_3$$

El ácido carbónico es inestable en pH alcalino y se descompone a bicarbonato, de acuerdo a:

$$H_2CO_3 \longrightarrow H^+ + HCO_3^-$$

La presencia de carbonatos, siempre presentes en la clorosis férrica, es la base para generar más carbonatos que los que normalmente se encuentran en el suelo, de acuerdo a:

$$CaCO_3 + CO_2 + H_2O \longrightarrow Ca^{+2} + HCO_3^-$$

De acuerdo a esto, los suelos calcáreos están más proclives a generar excesos de bicarbonatos y por lo tanto clorosis férrica y los bicarbonatos alcalinizan el apoplasto radicular (espacio libre radicular), impidiendo el ingreso de Fe^{+2}, pero no de Fe^{+3}. Sin embargo, el Fe^{+3} no es metabólicamente activo.

Resumiendo, se puede concluir que el problema de clorosis férrica está asociado a suelos de pH alcalino y calcáreos. Sin embargo, no basta la presencia de estos dos factores para provocar el problema, sino que es preciso establecer los niveles de bicarbonatos, que dependen de las dos condiciones anteriores, pero además de factores que pueden ser variables, incluso dentro de un mismo camellón o época del año, actividad radicular (que genera CO_2) y de microorganismos y aireación local. Una deficiente aireación provoca acumulación de CO_2 y por ello producción de bicarbonatos. Por lo tanto, la estrategia de riego resulta vital en suelos susceptibles a clorosis férrica.

7.4 Alternativas de manejo en la solución de los problemas

Como ya se ha señalado, muchos de los problemas asociados al decaimiento del palto, son posibles de preverlos en parte. Una alternativa es seleccionar bien el material suelo con el cual construir los camellones, después de un estudio acucioso del suelo. Este aspecto se descuida en el entendido de que el camellón soluciona todos los problemas. Obviamente que el diseño correcto del drenaje y la tecnología de riego más adecuada a cada caso particular resulta vital, tema discutido en capítulos anteriores.

La situación real actual es que aún hay problemas con camellones y es muy difícil de mejorar si el sustrato básico, como es el camellón, no reúne los requerimientos de capacidad de aire. En este sentido se está evaluando el efecto mejorador a través de enmiendas. Dentro de las enmiendas se contempla la incorporación de lombrices, aplicaciones de yeso y aplicación de sustratos orgánicos compostados localizado en hoyos, entre otras.

En el caso del yeso, la acción está basada en el ión calcio que se libera muy lentamente al disolverse el yeso en el suelo. El ión calcio acorta la denominada «doble capa» de las arcillas, acercando estas partículas coloidales de carga negativa, uniéndolas y formando estructura, lo cual conduce a mejorar la macroporosidad y la infiltración del suelo. Al respecto, información de experiencias realizadas en Messenger, Menge y Pond (2000) indican una respuesta positiva (en términos de velocidad de infiltración) al adicionar 5 ton de yeso por hectárea, en superficie, bajo el microaspersor, con aguas de bajo contenido salino (<250 mg/L, equivalente aproximadamente a 0,4 mmhos/cm.).

Los resultados de ensayos con aplicaciones de yeso en palto cultivados en camellones en la zona de Quillota, se indican en la **Figura 51**.

Se observa el gran efecto en la velocidad de infiltración del camellón y dentro de los tratamientos se observan efectos positivos del yeso, adicionado al voleo, bajo los aspersores, a razón de 2 ton/ha. La laya (tridente que perfora hoyos hasta 15 o 20 cm.), ejerce una acción positiva pero con la desventaja que es de alto costo.

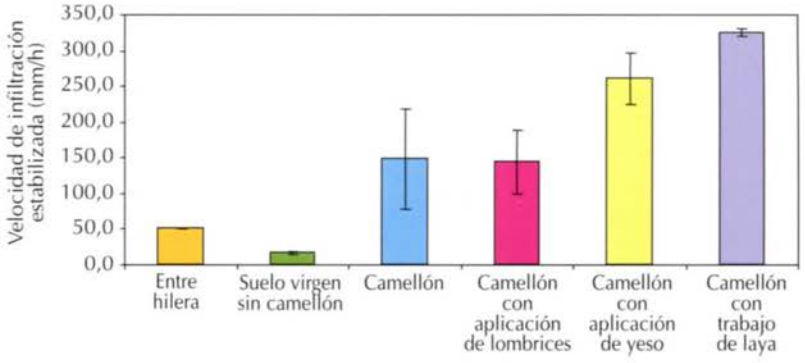


Figura 51. Efecto en la velocidad de infiltración estabilizada de diferentes enmiendas.

Los efectos mejoradores del yeso serían en la estructura de la capa más superficial del suelo y están asociados al incremento del calcio intercambiable en la estrata superficial, como lo demuestran los niveles de calcio determinados un año después de la adición (**Figura 52**).

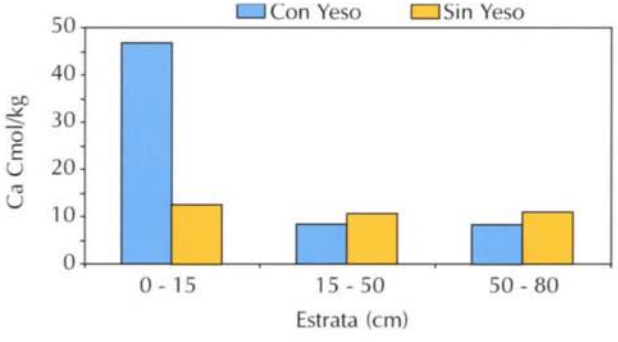


Figura 52. Niveles de calcio intercambiable del perfil a un año de la adición de 2 ton de yeso por ha.

El resultado es interesante ya que se producen efectos positivos del yeso con aguas de riego de mayor salinidad (0,6 a 0,8 mmhos/cm), a la de los experimentos realizados por Messenger, Menge y Pond (2000). También puede haber actuado en la misma dirección el incremento leve de salinidad detectado en la estrata superficial después de la aplicación del yeso (**Figura 53**).

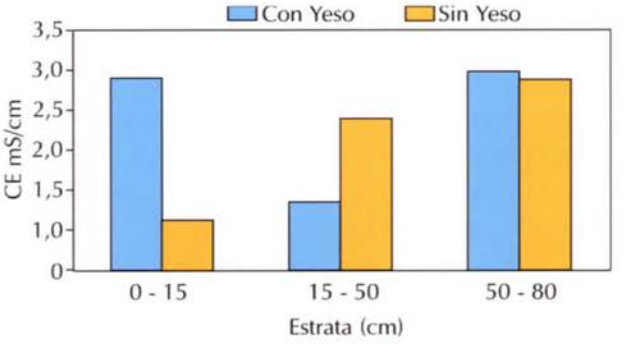


Figura 53. Salinidad del perfil a un año de la agregación de 2 toneladas de yeso/há.

El aumento de la salinidad acorta la doble capa de las arcillas y pasa a ser un elemento estructurador del suelo y por lo tanto mejorador de sus propiedades físicas.

Literatura Citada

Allen. R, M. Smith., A. Perrier. and L. Pereira. 1994. An update for the definition of reference evapotranspiration. ICID Bulletin 1994, vol 43 Nº 2.

Anguiano-Contreras, J., V.M. Coria-Avalos., J.A. Ruíz-Corral., G. Chávez-León. y J.J. Alcántar-Rocillo. 2003 Caracterización edáfica y climática del área productora de Aguacate (*Persea americana* cv. "hass") en michoacán, méxico. Proceedings V World Avocado Congress (Actas V Congreso Mundial del Aguacate) 2003. pp. 323-328.

Faber, B., Apaia, M. and M. Yates. 1995. Irrigation management of avocado in a California coastal environment, Proceedings of the world avocado Congress III, 1995 189 – 195.

Ansorena, J. 1994. Sustratos. 172 p. Mundi-Prensa, Madrid, España.

Aston, A.R. and C. H. M. Van Bavel, 1972. Soil surface water depletion and leaf temperature. Agronomy Journal, 64:368- 373.

Ayers, R.S. and D.W. Westcot. 1985. Water quality for agriculture. FAO Irrigation and Drainage Paper 29 Rev.1, Roma, 174 p.

Boyer, J.S. 1995. Measuring the water status of plants and soils 178 p. Academic Press, San Diego, California, USA

Cochran, W.G. 1971. Técnica de muestreo 507 p. Compañía ed. Continental S. A., México.

Chartzoulakis, K., M. Loupassaki., M. Berkati. and I. Androulakis. 2002. Effect of NaCl salinity on growth, ion content and CO_2 assimilation rate of six olive cultivars. Sci. Hort. 96: 235-247

Cohen, M., D. A. Goldhamer., E. Fereres., J. Girona., and M. Mata. 2001. Assessment of peach tree responses to irrigation water deficits by continuous monitoring of trunk diameter changes. J. Hort. Sci. and Biotech. 76: 55-60.

Cook, F. J. and J. H. Knight. 2003. Oxygen Transport to Plant Roots Modeling for Physical Understanding of Soil Aeration Soil Science Society of America Journal 67:20-31

Fereres. E., and D. Goldhamer. 1990. Deciduous fruit and nut trees. In: Steward, B.A.; Nielsen, D.R. (eds.). Irrigation of agricultural crops. Monograph Nº 30. p. 987-1017. American Society of Agronomy, Madison, Wisconsin, USA.

Fereres, E. and D.A. Goldhamer. 2003. Suitability of stem diameter variations and water potential as indicators for irrigation scheduling of almond trees. J Hortic Sci Biotech 78:139–144.

Ferreyra, R., G. Sellés., P. Gil., P. Maldonado., G. Cabezas. y V. Rodríguez. 2001. Diagnóstico de la situación de plantaciones frutales en cerro. 30 p. Documento Interno, Instituto de Investigaciones Agropecuarias.

Ferreyra, R., G. Sellés. y G, Lemus. 2002.Efecto del estrés hídrico durante la fase II de crecimiento del fruto del duraznero cv. Kakamas en el rendimiento y estado hídrico de las plantas. Agricultura Técnica. vol.62 Nº.4, p.565-573.

Ferreyra, R., G. Sellés., J. Peralta. y J. Valenzuela. 2004. Effect of water stress applied at different development periods of Cabernet Sauvignon grapevine on production and wine quality. Acta Horticulturae, v. 646, p.27-33.

Ferreyra, R., y P. Maldonado. 2004. Optimización del riego en el cultivo del palto a través del uso de cámara de presión y el secado parcial de raíces. 42 p. Informe final Proyecto Fontec.

Ferreyra, R., G. Selles., P. Maldonado., J. Celedon, y A. Torres. 2006. Efecto de la macroporosidad y atmósfera del suelo en el estado hídrico del palto. V Congreso Internacional de Ingeniería agrícola, 9 – 12 mayo 2006, Chillan, Chile 208 p.

Ferreyra, R., G. Selles., P. Maldonado. y J. Celedon, 2005 Informe Técnico Proyecto Innova – FDI Aumento de la productividad del Palto a través del mejoramiento de las practicas de riego y aireación del suelo en la zona central del país

Ferreyra, R., G. Selles., P. Maldonado. y J. Celedon, 2006 Informe Técnico Proyecto Innova – FDI Aumento de la productividad del Palto a través del mejoramiento de las practicas de riego y aireación del suelo en la zona central del país

Fulton, A., R. Buchner., B. Olson., L. Schwankl., C. Gilles. and N. Betagna. 2001. Rapid equilibration of leaf and stem water potential under field conditions in almonds, walnuts, and prunes. Horttechnology 11:609- 615.

Gardiazabal, F. 2004. Riego y Nutrición en Paltos. 2º Seminario Internacional de Paltos. 29 Septiembre – 1 Octubre, 2004. Sociedad Gardiazabal y Magdahl Ltda.Quillota,Chile.

Garnier, E. and A. Berger. 1985. Testing water potential in peach trees as an indicator of water stress. J. Hortic. Sci. 60:47-56.

Garnier, E. and A. Berger. 1986. Effect of water stress on stem diameter changes of peach treesgrowing in the field. Journal of Applied Ecology, 23: 193-209.

Glenn, D.M. 2000. Physiological effects of incomplete root zone wetting on plant growth and their implications for irrigation management. HortScience 35:1041-1043.

Gur, A., S. Dasberg., I. Schkolnik., E. Sapir., and M. Peled. 1979. The influence of method and frequency of irrigation on soil aeration and some biochemical responses of apple trees. Irrigation Science 1, 125-134.

Goldhamer, D.A., M. Soler., M. Salinas., E. Federes., M. Cohen., J. Girona. and M. Mata. 2000. Comparison of continuous and discrete plant-based. Monitoring for detecting tree water deficits and barriers to grower adoption for irrigation management, Acta Horticulturae 537(1):431-445.

Hernández, R, 2001. Relaciones Hídricas de las plantas. Libro Botánico online. (en línea). Consultado 10 de enero 2005. Disponible en: http://www.forest.ula.ve/~rubenhg/transpiracion/

Hernández, F. 1991. Aproximación al ciclo fonológico del palto (*Persea americana* Mill.), cultivar Hass, para la zona de Quillota, 5 Región. Tesis de grado de Ing. Agronomo. Universidad Católica de Valparaíso, Chile 99 p.

Huguet, J.J., Y. Lorendeau., and G. Pelloux. 1992. Specific micromorphometric reactions of fruit trees to water stress and irrigation scheduling automation. J. Horti. Sci. 67(5):631-640

Jones, H.G. 2004. Irrigation scheduling: advantages and pitfalls of plant-based methods. Journal of Experimental Botany, v.55, p.2427-2436.

Kozlowski. T. T. and C. H. Winget 1964 Diurnal and Seasonal Variation in Radii of Tree Stems. Ecology, Vol. 45, Nº 1 (Jan., 1964), pp. 149-155

Kozlowski, T. 1997. Responses of woody plants to flooding and salinity. Tree Physiology Monograph Nº 1. Consultado 10 de enero 2005. Disponible en: http://www.heronpublishing.com/tp/monograph/kozlowski.pdf

Labanauskas,C.K., L. Stolzy. and G. Zentmyer. 1978. Rootstock, soil oxygen, and soil moisture effects on growth and concentration of nutrients in avocado plants. California Avacado Society Yearbook , 62: 118-125; 17

Lafitte, H. 2001. El maíz en los trópicos: Mejoramiento y producción. Inundación. Consultado 4 de marzo 2005. Disponible en línea: http://www.fao.org/documents/show_cdr.asp?url_file=/DOCREP/003/X7650S/x7650s12.htm

Lahav, E. and D. Kalmar. 1991. Water requierements and the effect of salinity in an avocado orchard on clay soil. World Avocado Congres II Procedings. Orange, California, april 21-26 pp. 323 – 330

Lahav, E. and A. Whiley, A. 2002. Irrigation and Mineral Nutrition. The Avocado: Botany, Production and Uses. 401 p.

Lampinen, B. D. 2004. Walnut production and orchard management in California 9 p. Seminario Internacional El nogal y otros frutos de nuez. 17 al 19 agosto 2004. Stgo, Chile.

Letey, J and L. Stolzy. 1964. Measurement of oxygen diffusión rates with the platinum microelectrode. 1. Theory and equipment. Hilgardia 35: 235-283.

McCutchan, H. and K.A. Shackel. 1992. SWP as a sensitive indicator of water stress in prune trees (*Prunus domestica* L. cv. French). J. Am. Soc. Hortic. Sci. 117:607-611.

Michelakis, N. 1997. Daily stem radius variations as indicators to optimise olive tree irrigation scheduling. Acta Horticulturae 449: 297-304

Messenger, B., J. Menge. and E. Pond. 2000. Effects of gypsum soil amendments on avocado growth, soil drainage, and resistance to *Phytophthora cinnamomi*. Plant Disease 84: 612-645

Nagera, F. 2006. Caracterización de suelos alcalinos cultivados con paltos (*Persea Americana* Mill) en la V región de Chile y aplicación de ácido sulfúrico como corrector de pH. 41 p Tesis, Universidad de Chile, Facultad de ciencias Agronómicas, Escuela de Agronomía, Santiago, Chile.

Naor, A. 1998. Relationships between leaf and stem water potential and stomatal conductance in three field-grown woody species. J. Hortic. Sci. 73: 431-436.

Naor, A., I. Klein. and I. Doron. 1995. Stem water potential and apple fruit size. J. Am. Soc. Hortic. Sci. 120:577- 582.

Naor, A. and M. Peres. 2001. Pressure increase rate effects the accuracy of stem water potential measurements in deciduous trees using the pressure chamber technique. J. Hortic. Sci. Biotech. 76:661-663.

Naor, A. and S. Cohen. 2003. Sensitivity and variability of maximum trunk shrinkage, midday stem water potential and transpiration rate apples tree. HortScience 38(4):547-551.

Núñez-Elisea, R., Schaffer, B., Fisher, J.B., Colls, A.M. and Crane, J.H. 1999. Influence of flooding on net CO_2 assimilation, growth and stem anatomy of Annona species. Annals of Botany 84: 771-780

Olien, W.C., and A.N. Lakso. 1986. Effect of rootstock on apple (Malus domestica) tree water relations. Physiol. Plant. 67:421-430.

Razeto, B. 1993. La nutrición mineral de los frutales. Deficiencias y excesos. 105 p. Sociedad Química y Minera de Chile (SOQUIMICH), Santiago, Chile.

Ruiz-Sánchez M.C., A. Torrecillas., E. Nicolás., M.F. Ortuño., J.M. Abrisqueta., J.J. Alarcón., R. Domingo. and A. Pérez-Pastor. 2004. Sap flow, trunk diameter and plant-water relations parameters as stress indicators of apricot trees ISHS Acta Horticulturae 664:575-582.

Salazar S., and J. Cortés.1986. Root distribution of mature avocado trees growing in soils of different texture. California Avocado Society Yearbook .70: 165-174

Schaffer, B., P. Andersen., and R. Ploetz. 1992. Responses of fruit trees to fooding. Horticultural Reviews. 13, 257–313.

Selles, G. and A. Berger. 1990. Physiological indicator of plant water status as criteria for irrigation scheduling. Acta Horticulturae 278: 87-100.

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

Selles G y R. Ferreyra. 2005 Criterios para controlar el riego en uva de mesa 40 p. www.inia.cl/platina/descarga.

Shackle, K.A., H. Ahmadi., W. Biasi., R. Buchner., D. Goldhamer., and S. Gurusinghe. 1997. Plant water status as an index of irrigation need in deciduous fruit trees. Horttechnology 7:23-29

Shackel, K. 2001. The Pressure Chamber, a.k.a. "The Bomb". Fuit nut research information center. Crop Information http:// fruitsandnuts.ucdavis.edu/pressure-chamber.html

Stolzy, L, G. Zentmyer., A. Klotz. and C. Labanauskas. 1967. Oxygen diffusion, water, and Phytophthora cinnamomi in root decay and nutrition of avocados. American Society for Horticultural Science. 90:67-76.

Taiz, L. and E. Zeiger. 1991. Planta Physilogy.The Benjamin/Cummings Publishing Company , Inc. 559 p.

Valoras, N., J. Leteo., I. Stolzy., and F. Frolich. 1964. The Oxygen Requirements for Root Growth of Three Avocado Varieties. American Society for Horticultural Science. 85:172-178.

Wolstenholme, B. 1986. Energy costs of fruiting as a yield limiting factor. Acta Horticulturae 175: 121-126.