

RELACIÓN SUELO-AGUA-PLANTA Y EVALUACIONES DE ESTRÉS HÍDRICO EN PAPAS

*Cristian Hernández
Paulina Villagra
Alejandro Antúnez*

A nivel mundial, mejorar la tolerancia a sequía y/o eficiencia en el uso del agua en las nuevas variedades papas es un desafío para muchos programas de mejoramiento genético, tanto públicos como privados. La fuerte competencia por el recurso hídrico entre los distintos sectores de la economía, como la agricultura, la minería, el uso urbano e industrias, presionan cada vez más hacia la producción de alimentos con menores volúmenes de agua. La problemática se acentúa al considerar los efectos del cambio climático, donde se estima que, para finales del siglo XXI, las precipitaciones se reducirán en torno al 25% en primavera y 35% en el periodo estival (IPCC, 2013; IPCC, 2015). Por lo tanto, el desafío no sólo está enfocado a producir variedades más eficientes en el uso del agua, sino también en utilizar métodos de monitoreo del estado hídrico de los cultivos que permitan diseñar estrategias de manejo de riego (métodos de riego, tiempos y frecuencias de riego), óptimos por cultivo, e incluso por variedad.

EFICIENCIA DEL USO DEL AGUA

Un concepto que comúnmente se evalúa en la búsqueda de variedades más tolerantes a déficit hídrico, es la eficiencia del uso del agua EUA o WUE (por su sigla en inglés, Water Use Efficiency). Existen varias definiciones según las metas y necesidad de la hipótesis planteada. En términos agronómicos, EUA se refiere a la cantidad

de agua requerida para producir 1 kilogramo de materia seca de producto (rendimiento). Sin embargo, EUA no siempre está bien correlacionado con rendimiento (Tuberosa, 2012). En papas, EUA se ha reportado frecuentemente como el rendimiento de tubérculos obtenido por unidad de agua consumida; ya sea, como agua aplicada en m^3 , o como unidad de agua transpirada (Doorenbos y Pruitt, 1977; Camargo *et al.*, 2015). La papa requiere de 400 a 600 litros de agua para producir 1 kilogramo de materia seca de tubérculos. Varios estudios han evaluado la EUA en papas. Por ejemplo, en el sur de Túnez se reportaron valores entre 44.1 y 63.4 kg /ha/mm, y entre 8 y 14 kg/m^3 (Nagaz *et al.*, 2007). En Irán, se reportaron valores de EUA en papa entre 1.92 y 5.25 kg/m^3 (Rashidi y Gholami, 2008). Mientras, un estudio más reciente en papas, en la zona de Albacete (España), reportó valores de EUA entre 8.6 y 11.6 $kg m^{-3}$ en el 2011 y entre 7.1 y 8.4 $kg m^{-3}$ in 2012, dependiendo de las tasas de riego aplicada y de la temporada (Camargo *et al.*, 2015). EUA también puede ser referida como rendimiento en base a transpiración (Tr) (Eficiencia de Transpiración, TE) o a evapotranspiración (ET), a nivel de hoja o de cultivo y en base a intercambio gaseoso. En la **Tabla 7.1**, se resumen algunas fórmulas que integran estos conceptos.

Otro concepto que discute es el Efectivo Uso del Agua (EUW), el cual está asociado a la máxima captura de humedad del suelo para transpiración, también a la disminución de la transpiración no estomática y a pérdidas mínimas de agua por evaporación del suelo (Blum 2009; Blum 2011), sugiriendo que el mejoramiento genético o selección debería estar orientado a maximizar la captura de humedad del suelo para transpiración, porque la producción de biomasa está ligada a transpiración.

SEGUIMIENTO DEL ESTADO HÍDRICO DEL SUELO-PLANTA, Y EN ENSAYOS DE ESTRÉS HÍDRICO EN PAPAS

En papas se han realizado varios estudios tendientes a evaluar la respuesta de distintos genotipos a déficit hídrico (DH) usando diferente metodología. En términos generales, existen diferentes tipos de ensayos para estudios de respuesta a DH, dependiendo del tamaño del ex-

Tabla 7.1. Formulas asociadas a la estimación de la eficiencia en el uso del agua a nivel de hoja, planta, o cultivo.

	Sigla Inglés	Fórmula	Referencia
Eficiencia en uso del agua del cultivo	WUE (C)	$WUE(C) = \frac{\text{(Biomasa producida Mat. Seca (kg))}}{\text{(Agua aplicada (m}^3\text{))}}$	Condon <i>et al.</i> 2004
Eficiencia de transpiración	TE	$TE = \frac{\text{(Biomasa Producida)}}{\text{(Agua Transpirada)}}$	Solomon and Labuschagne, 2004
Eficiencia intrínseca en el uso del agua	ITE	$ITE \text{ (EIUA)} = \frac{\text{(A (}\mu\text{mol CO}_2\text{))}}{\text{(gs (mol H}_2\text{O))}}$	Gil <i>et al.</i> 2007
Uso del agua en el cultivo	WU	$WU = \frac{\text{(g,H}_2\text{O)}}{\text{(planta o m}^2\text{)}}$	Solomon and Labuschagne, 2004

perimento, condiciones climáticas e hipótesis de trabajo. Los métodos más usados según Fernández (2010), son: (a) ensayos de campo en sitios con distintos regímenes de precipitaciones y/o balance hídrico en variadas condiciones de a textura o profundidad de suelo; (b) Parcelas experimentales regadas versus no regadas; (c) Exclusión total de lluvia por cubierta permanente versus precipitaciones normales; (d) Exclusión parcial de lluvia por cubiertas que evitan la llegada de una proporción del agua al suelo; (e) Exclusión de lluvia por cubierta corrediza, ya sea manual o automática (rain-out-shelter); (f) Ensayos en invernadero con control ambiental y/o en cámaras de crecimiento con iluminación natural o artificial; (g) Ensayos en medios de cultivo hidropónicos o con soluciones de distinto potencial osmótico.

Una vez determinado el tipo de experimento que se realizará, es necesario definir en qué etapa de desarrollo del cultivo se aplicará (cuándo) los tratamientos de estrés hídrico, qué nivel de estrés hídrico se aplicará (cuánto), cómo se controlará la cantidad de agua a aplicar, cómo se seguirá la disponibilidad de agua en el cultivo y el estado hídrico de la planta durante el ensayo. En relación con el momento para aplicar los tratamientos de déficit hídrico en papas, es importante considerar que la papa cultivada es sensible a la sequía particularmente durante el periodo de tuberización y del llenado de tubérculos (ver capítulo 2). Esta es la razón por lo cual la mayoría de los tratamientos de déficit hídrico en papas, se aplican a partir de tuberización. Restricciones en la disponibilidad hídrica en estas etapas, se expresa en pérdidas significativas en los rendimientos y también en la calidad de los tubérculos (Weisz *et al.*, 1994; Dalla Costa *et al.*, 1997; Mane *et al.*, 2008). Sin embargo, la magnitud de su efecto en los procesos fisiológicos y su consecuente impacto en los componentes del rendimiento depende además de la duración y severidad del estrés hídrico (Jeffery, 1995).

A continuación, se resumen en la **Tabla 7.2** algunos instrumentos de monitoreo, utilizados en el seguimiento del contenido de agua en suelo y en ensayos de respuesta a estrés hídrico en papa.

Tabla 7.2. Algunos Instrumentos de monitoreo y evaluaciones del estado hídrico del suelo y de la planta.

Mediciones	Definición	Instrumentos	$\frac{\text{MPa}^*}{\text{CC}} \frac{\text{PMP}}{\text{PMP}}$
Estado Hídrico de la Planta			
El potencial hídrico foliar o de la hoja (Ψ^h)	Mide el estado hídrico de la planta, se mide en la hoja y es influenciado por su edad, la ubicación dentro de la planta el nivel de exposición a la luz.	Cámara de Presión o bomba de Scholander, mide el agua retenida en la planta como el potencial de presión a la cual se encuentra el agua retenida por la hoja (Turner, 1980).	-1.0 -3.0
El potencial hídrico del xilema o tallo (Ψ^x)	Mide el estado hídrico general de la planta en forma indirecta utilizando hojas que previamente se han tapado para que se equilibre con el resto de la planta.	Cámara de Presión o bomba de Scholander, mide el agua retenida en la planta como el potencial de presión a la cual se encuentra el agua retenida por la hoja (Turner, 1980).	-0.7 -2.5
Contenido relativo de agua (CRA)	Es un indicador útil del estado del balance hídrico de una planta, porque expresa la cantidad absoluta de agua, que la planta requiere para alcanzar la saturación artificial.	Se registra el peso fresco de la hoja al ser retirada de la planta, luego el peso túrgido después de mantenerla por 12 horas en agua, seguido por el peso seco hasta obtener un peso constante (González y González 2001; Chaman, 2007).	
			$\text{CRA} = \frac{(\text{Peso fresco-peso seco})}{(\text{Peso turgente-peso seco})} \times 100$

*Rango de Valores reportados en papas:

CC = cuando el perfil del suelo está al 100% de su capacidad, después del riego y de 48 horas de drenaje, está en capacidad de campo (CC). El agua es retenida a una tensión cercana a 0.01 MPa por las partículas del suelo y es fácil de extraer por la planta.
 PMP = A medida que las plantas agotan el agua y el suelo se seca, la tensión en el suelo aumenta hasta alcanzar el punto de marchitez permanente (PMP). En la mayoría de los cultivos agronómicos, el PMP se presenta cuando la tensión en el suelo es de 0.15MPa, las plantas ya no pueden seguir extrayendo agua del suelo y mueren.

Continuación de la Tabla 7.2. Algunos Instrumentos de monitoreo y evaluaciones del estado hídrico del suelo y de la planta.

Mediciones	Definición	Instrumentos	MPa* CC PMP
Contenido de agua en el Suelo			
El potencial hídrico del suelo (Ψ_{H_2O})	Determina cantidad de agua en el suelo, a partir de la tensión del agua en el suelo.	Tensiómetro, mide el potencial mátrico del suelo en kPa. En un rango de 0 a -0.085MPa, algunos hasta -0.1 MPa. Requieren mantenimiento, sensible a la helada. Reaccionan más rápidamente a los cambios de humedad que los Watermark y son más exactos. Bajo costo (Martín, 2010).	-0.03 -1.5
		Bloques de resistencia eléctrica (Watermark), mide el potencial mátrico del suelo, en un rango de -0.003 a -0.2MPa. Contiene en su interior yeso para compensar los efectos de la salinidad. No requiere mantenimiento. A gran escala tienen menor costo por superficie que los tensiómetros (Martín, 2010; Fernandez, 2010).	
		Psicrómetro, mide el potencial hídrico del suelo, en un rango de 0 a -8MPa. También, mide el potencial osmótico de hojas, tallos y otros. De alto costo (Martinez <i>et al.</i> , 2011).	

Continuación de la Tabla 7.2. Algunos Instrumentos de monitoreo y evaluaciones del estado hídrico del suelo y de la planta.

Mediciones	Definición	Instrumentos	$\frac{MPa^*}{CC}$ PMP
Contenido volumétrico de agua en el suelo	Es la relación entre el volumen de agua y el volumen de suelo que la contiene. Se puede expresar en porcentaje (%), o fracción (θ)	Sondas TDR (Time-domain reflectometry) se basan en la medición de la constante die-eléctrica del suelo. Funcionan bajo el principio de que la presencia de agua en el suelo afecta la velocidad de propagación de una onda electromagnética haciéndola más lenta. Una limitante es que su lectura cubre un bajo volumen de suelo, y puede inducir errores por salinidad (Martínez <i>et al.</i> , 1994; Pastuszka <i>et al.</i> , 2014).	
		Sondas FDR (Frequency-domain reflectometry), estima el porcentaje volumétrico de agua (VWC) en el suelo y salinidad. Una limitante es que su lectura cubre un bajo volumen de suelo. Sensibles a burbujas de aire (Berengena, 2000; Dobryal <i>et al.</i> , 2012).	<10% >30%
		Sonda de neutrones, contiene una fuente radioactiva que envía una cierta cantidad de neutrones rápidos. Mide la proporción de los neutrones rápidos que salen y de los lentos que regresan según la interacción con los iones H+ del agua. De alto costo. Requiere calibración, y licencia para trabajar con radio-actividad (Dobryal <i>et al.</i> , 2012).	

EL CULTIVO DE PAPA RESPONDE DIFERENCIALMENTE A ESTRÉS HÍDRICO, DEPENDIENDO DEL CULTIVAR, MOMENTO E INTENSIDAD DEL ESTRÉS HÍDRICO

La papa es un cultivo que tiene requerimientos de agua relativamente altos. Mientras en España se han estimado requerimientos cercanos a los 6500m³ de agua/ha, en el CIP se ha estimado que un cultivar de papa de 120 a 150 días consume entre 500 y 700 mm de agua, dependiendo de las condiciones climáticas. En Chile y en la zona de la Araucanía se ha estimado requerimientos entre 450 y 550mm de agua (Fabeiro *et al.*, 2001; FAO, 2003; Mendez y Inostroza, 2009).

A continuación, se detalla algunos estudios de estrés hídrico publicados en papas. Martínez y Moreno (1992), evaluaron la respuesta fisiológica de dos cultivares de papa, Yungay y Revolución, (*Solanum tuberosum* L. *subsp. tuberosum* x *Solanum tuberosum* L. *subsp. andígena*) a déficit hídrico en La Molina (Perú). El ensayo se realizó, en un clima semiárido con precipitaciones de 20mm/año (12°05'Lat. S.; 78°57'Long W.; 230 m.s.n.m), la temperatura promedio fluctuó entre 15 y 16°C, y la humedad relativa estuvo entre 80 y 82%. El ensayo se realizó en un suelo franco-arenoso, bajo un sistema de riego por exudación en líneas (Line-source irrigation system). Desde la siembra hasta 60 días post-plantación, la zona de raíces fue mantenida cercana a capacidad de campo (-0.03MPa) y sólo para el tratamiento de déficit hídrico (DH), el riego fue suspendido durante 10 días (-0.7MPa) a partir de plena tuberización. El estado hídrico del suelo se monitoreó mediante psicrometría de termocuplas, utilizando una cámara de muestras modelo C-52, acoplados a un microvoltímetro modelo HR-33T (Wescor Inc. Logan, Utah, USA). Mientras las plantas control, mantuvieron el potencial hídrico de la hoja casi constante, entre -0.5 y -0.6MPa; las plantas bajo DH llegaron a valores de hasta -2.0 MPa en el cv Yungay. Yungay presentó una mejor respuesta a DH, en términos de ajuste estomático, capacidad fotosintética, y acumulación de prolina en las hojas. Este estudio sugirió que la variedad Yungay se recuperó más rápido que Revolución luego de 10 días bajo DH. Consecuentemente, Yungay mostró mayor área foliar, y peso seco de tubérculo bajo estrés, con valores de 84.6 g. peso seco/tubérculo, mientras en Revolución fue significativamente inferior 42.3 g. peso seco/tubérculo.

Otro estudio en el cultivar Desireé, evaluó la respuesta a DH y salinidad en un suelo arcilloso al norte de Negev, Israel (Heuer y Nadler, 1995). El tratamiento control, consistió en dos riegos por semana en función de la evapotranspiración de bandeja clase A (5.0 a 8.3 mm/día) y el coeficiente de cultivo (0,6 a 1 según la cobertura del suelo por la canopia). El tratamiento de DH, consistió en aplicar el 60% de la cantidad de agua aplicada al tratamiento control a través de todo el periodo de crecimiento del cultivo. Mientras, el contenido de agua en el suelo se monitoreó con sondas de neutrones a 100 cm de profundidad, el potencial mátrico del suelo se evaluó con tensiómetros instalados a 25, 45 y 75 cm de profundidad. El contenido de agua del suelo en el tratamiento control, fluctuó entre 24 y 35% (θ), y en el tratamiento con DH alcanzó el 10%. El potencial mátrico del suelo alcanzó los -0.095 MPa., a 25 cm profundidad. Las plantas sometidas a DH, mostraron menor crecimiento en altura, menor tamaño de hojas y menor área foliar. Contrariamente, el rendimiento de tubérculos y el porcentaje de materia seca de hojas y tallos no fueron afectados por el tratamiento de DH aplicado. Sí, el contenido de materia seca de los tubérculos fue significativamente más alto en DH, sugiriendo un mejor uso del agua debido al índice de cosecha. Sin embargo, un valor de potencial mátrico de suelo de -0.095 MPa., en el tratamiento de DH aplicado, no implica que las plantas estuvieron bajo estrés por sequía. En previos estudios y los siguientes, las plantas mostraron pérdidas significativas en los rendimientos cuando el potencial mátrico de suelo, fue inferior a -0.5MPa.

Deblonde y Ledent (2001), evaluaron la respuesta de seis genotipos de papa a distintos tratamientos de disponibilidad hídrica en condiciones de campo en Nodebais (Belgium), durante dos años. Se evaluaron dos cultivares tempranos (Eersteling, sensible y Jaerla, tolerante), dos cultivares de precocidad media (Krostar Eersteling, sensible, Claustar, intermedio, y Bintje, tolerante) y dos cultivares semitardíos (Nicola y Desireé, ambos tolerantes). La plantación se realizó en el mes de abril, y las precipitaciones alcanzaron los 85 mm (1995) y 57 mm (1996). Se evaluaron tres tratamientos: control (lluvia + riego), secano (sólo lluvia) y sequía (el suelo fue protegido con plástico). Los valores del potencial hídrico del suelo, alcanzaron

-0,3MPa (1995) y -0,5 MPa (1996) a 20 y 40 cm de profundidad (no se menciona con que instrumento se monitoreó). Los resultados mostraron que los cultivares tempranos, en general, tuvieron menor crecimiento en altura que los cultivares tardíos. El tratamiento-sequía, redujo significativamente la altura del tallo en comparación con el tratamiento-control, no así con el tratamiento- secano. Además, el tratamiento-sequía redujo significativamente el número de hojas verdes en dos fechas (108 y 124 días después de la siembra), resultados similares se observaron en el tratamiento- secano (124 días después de la siembra). En la primera temporada, se observaron diferencias en el número de tubérculos y en la segunda temporada en el peso seco promedio de tubérculo. En general, concluyeron que el número de hojas verdes, altura de tallos y tamaño de la hoja, respondieron a DH. Sin embargo, sólo la altura de tallo mostró diferencias cuando la planta experimentó el déficit hídrico temprano en la temporada, sugiriendo que relación entre altura de tallo y peso seco de tubérculo (s/r), podría ser un indicador interesante a considerar para discriminar entre cultivares tolerantes y sensibles. El estudio concluye, que es necesario profundizar en el estudio de la precocidad de cultivares y su respuesta a déficit hídrico, sugiriendo que los cultivares de ciclo más corto (precoces) escaparían a periodos de sequía tardíos.

Lahlou *et al.* (2003), sometieron cuatro cultivares de papa (Remarka, Desireé, Nicola y Monalisa) a DH, en campo (1998) y en invernadero (1998 y 1999). En campo, los ensayos se realizaron en Incourt (Belgica) en el mes de mayo; en el tratamiento control se aplicó 100% de riego por aspersión en función de la demanda del cultivo y en el tratamiento de DH se suspendió el riego completamente. En invernadero, los ensayos se realizaron en macetas de 40 cm de diámetro y 30 cm de alto, regulando la temperatura a valores similares a los registrados en el exterior. El tratamiento control, consistió en mantener potencial del suelo sobre -0,3 MPa, y el tratamiento DH fue regado sólo cuando el potencial de agua del suelo fue inferior -0,8 MPa, aplicando un 50% de la cantidad de agua aplicada al tratamiento control. El potencial de agua en el suelo tanto en campo como en invernadero fue monitoreado por tensiómetros a dos profundidades (25cm y 45cm), llegando a valores de -0.9MPa bajo sequía prolongada. El potencial hídrico de la hoja, alcanzó -1.4MPa

en algunos cultivares sometidos a DH en campo y hasta -2.0MPa en invernadero. El DH redujo los rendimientos entre un 11 % y un 44% en condiciones de campo, y entre un 40 % y 53% en invernadero. También disminuyó la materia seca de las hojas en ambas condiciones. Mientras, el número de tubérculos se redujo sólo en los cultivares precoces, el índice de área foliar y la duración del área foliar fueron más afectadas que en los cultivares tardíos.

Liu *et al.*, (2005), evaluaron la respuesta a DH del cv. Folva en condiciones de invernadero durante dos estados de desarrollo, a inicio de tuberización y durante el llenado de tubérculos. En este experimento, las plantas fueron establecidas en macetas (15 cm diámetro y 50 cm de alto) y mantenidas a una temperatura de 20°C día/ 14° noche $\pm 2^{\circ}\text{C}$, humedad relativa de 60%, fotoperiodo de 15h con una PAR de $600 \mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$. Para los tratamientos hídricos, las macetas fueron primero regadas y se les permitió drenar libremente hasta alcanzar peso constante (100% capacidad de retención). Después de emergencia, todas las plantas fueron regadas diariamente al 95%. El tratamiento de DH consistió en aplicar el 50% del volumen aplicado al tratamiento control. En ambas etapas, el contenido relativo de agua, el potencial hídrico de la raíz y el potencial hídrico de la hoja fueron significativamente afectados con DH, llegando a valores de $-0,8\text{MPa}$ para la raíz y entre -0.9 a $-1,1 \text{MPa}$ para la hoja. La conductancia estomática disminuyó tempranamente, y coincidió con la disminución del potencial hídrico de la raíz y el aumento de la concentración de ácido abscísico (ABA) en la xilema. Mientras, la asimilación de CO_2 disminuyó significativamente, dos días más tarde que la conductancia estomática. La conductancia estomática fue linealmente correlacionada con la concentración de ABA en el xilema mostrando potenciales de $-0,3 \text{MPa}$. La eficiencia intrínseca del uso de agua (asimilación/conductancia estomática), aumentó linealmente con la disminución de la conductancia estomática hasta $0,2 \text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$. Por debajo de este punto, se redujo drásticamente.

Liu *et al.* (2006), evaluaron la respuesta fisiológica del cv Folva a sequía parcial de raíces PRD (por su sigla en inglés, Partial Root-Zone Drying). Se realizaron dos ensayos, uno en macetas en condiciones de invernadero y otro en campo en el sur de Jutland, Dinamarca (Lat.

54° 9' N, long. 90° 13' E) bajo una cubierta corrediza (rain-out-shelter). En invernadero, las plantas fueron regadas diariamente, mojando todo el sistema radicular (control) y la mitad del sistema radicular durante nueve días (PRD). El ensayo se realizó en macetas de 47,5 cm de alto y suelo arenoso. La temperatura del invernadero fue 20°C día/14±2° noche, fotoperiodo de 15h día y PAR de 500 $\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$ PAR. El contenido de agua en el suelo (θ) fluctuó entre 17.5% a máxima capacidad de retención de la maceta y 4% a punto de marchitez permanente (PMP). Los ensayos de campo se realizaron en 2005, las plantas fueron regadas a través de riego por goteo mojando todo el sistema radicular a capacidad de campo (control) y regando en un 70% cada 5–10 días a un sólo lado de la hilera de plantación (PRD). El contenido de agua en el suelo (θ), fue monitoreado con sondas TDR (TRASE, Soil Moisture Equipment Corp., USA), fluctuó entre 16.1% y 6,3%. Mientras, no se observaron diferencias significativas en el potencial hídrico de la hoja para ambos tratamientos en invernadero (-0.4 a -0.6MPa), sí se observaron diferencias significativas en campo (-0.4 a -1MPa). También, en campo, la producción de tubérculos por planta fue de 231,94 g. por planta en el control y de 257,87 g. por planta en PDR. La eficiencia del uso de agua (WUE) incrementó en 59%; donde WUE, fue calculado en función del incremento en la biomasa de tubérculos y el uso del agua de la planta (esta última, calculada en función de cantidad de agua aplicada y θ) durante todo el experimento. Similares resultados fueron validados más tarde por el mismo grupo de trabajo. El ensayo se realizó en condiciones de campo bajo cubierta corrediza (rain-out-shelter). En el tratamiento control se repuso el 100% de la evaporación del cultivo y en el tratamiento PRD se regó cada 5-10 días a un lado de la hilera de plantación, reponiendo el 43 y 70% según temporada. Shahnazari *et al.* (2007) mostraron también en el cv Folva, que PRD permitió ahorrar el 30% del agua de riego, mantener la producción y mejorar la eficiencia del uso del agua en 61%. Esta metodología, PRD no está validada y no existe consenso al respecto.

Knipp y Honermeier (2006), estudiaron el comportamiento de siete líneas transgénicas (SST/FFT), del cv. Desireé, a través de ensayos en maceta en condiciones de invernadero. El tratamiento de DH consistió en aplicar entre 10 a 25% menos de riego que el tratamiento control. La respuesta a DH se evaluó en función del contenido de

prolina, potencial hídrico de la hoja, contenido relativo de agua. Mientras en el tratamiento control el potencial hídrico foliar alcanzó $-0,45$ MPa, bajo DH alcanzó $-0,53$ MPa. Además, en todas las líneas evaluadas bajo DH se observó un aumento en el contenido prolina a nivel foliar. Este estudio mostró una interesante asociación entre el contenido de prolina en hoja, el potencial hídrico foliar y contenido relativo de agua; sugiriendo que, en papas la prolina cumpliría un rol en la osmo-regulación bajo condiciones de déficit hídrico.

Para ensayos en macetas bajo ambiente controlado, además de determinar cómo se controlará la cantidad y disponibilidad de agua durante los tratamientos de déficit hídrico. Existen otras consideraciones muy relevantes, según Fernández (2010): una decisión substancial es el tipo de sustrato y el volumen del recipiente a utilizar. Respecto al sustrato es necesario asegurar un buen drenaje, en términos de porosidad, y de la textura del suelo. En relación al volumen de la maceta a usar, este dependerá de varios factores, cuanto más grandes sean, a igualdad de duración del experimento, menores serán los problemas desde el punto de vista del desarrollo radicular. Por otra parte, las macetas de menor tamaño, ahorra espacio y son útiles cuando éste es una limitante. Por ejemplo, macetas pequeñas en un invernadero o en cámaras de crecimiento, permiten un mayor número de repeticiones, pero se debe tener en consideración que las macetas pequeñas aceleran la exposición a sequía.

El INIA Chile, durante los últimos años ha evaluado la respuesta a déficit hídrico de diferentes genotipos de papas tanto en campo (Capítulo 8) como en invernadero. Bajo condiciones controladas de invernadero, se evalúan los genotipos más contrastantes en su respuesta a sequía, e identificados en campo durante la temporada anterior. En estos experimentos controlados, se han remplazado las tradicionales macetas con tubos PVC de 50 cm de alto y 250 mm de diámetro, considerando que en papas el 87 y 96% de las raíces se concentra en los primeros 30 cm de profundidad de suelo, y a fin de asegurar el crecimiento adecuado de los tubérculos y la caracterización radicular. Básicamente, se evaluó el efecto del déficit hídrico controlado sobre la respuesta fisiológica y los componentes de rendimiento en cuatro cultivares de papas. Los tratamientos

fueron 100% de riego (control), 50% de riego y 25% de riego durante dos temporadas, donde el tratamiento control correspondió al 100% de reposición de la evapotranspiración diaria en función del método gravimétrico. En la **Figura 7.1**, básicamente se muestra el seguimiento del estado hídrico del suelo y de la planta a través del contenido volumétrico de agua en el sustrato (θ) según registros

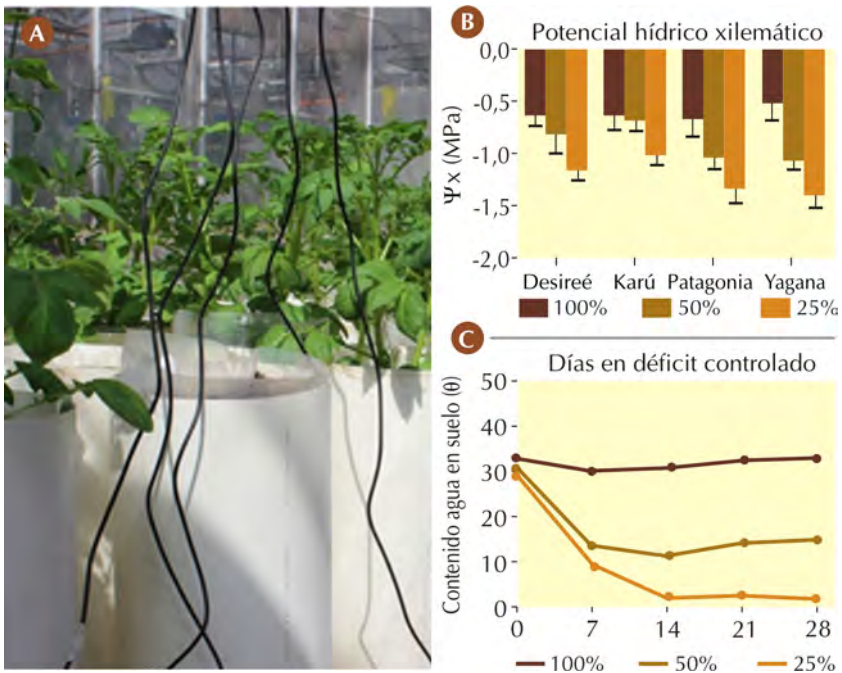


Figura 7.1. Seguimiento del estado hídrico del suelo y de la planta en los cvs Desireé, Karú, Patagonia y Yagana sometidos a déficit hídrico controlado durante 28 días a partir de tuberización. Los tratamientos fueron realizados en invernadero ($24\pm 3^{\circ}\text{C}$) en INIA-Chile; 100% de riego (control), 50% de riego y 25% de riego durante dos temporadas, donde el tratamiento control correspondió al 100% de reposición de la evapotranspiración diaria: **(A)** Plantas de papas creciendo en tubos de PVC (250 mm x 500 mm). **(B)** Potencial hídrico de la hoja a medio día según cámara de presión Scholander a los 28 días. **(C)** Evolución del contenido volumétrico promedio de agua en el sustrato (θ) según registro de sondas de FDR (EC-5) durante los 28 días.

periódicos de sondas de FDR (EC-5) conectadas a un Data Logger Em50 Digital (Decagon Devices, Inc., Pullman, WA) y a través del potencial hídrico de la hoja a medio día con la cámara de presión Scholander (PMS instrument, Corvallis, OR.).

El tratamiento de DHC (25% de riego), mostró una baja significativa en el contenido de agua del suelo (θ), con valores inferiores al 10%. También, se observó una baja significativa en potencial hídrico de la hoja, con valores inferiores a -1.1 MPa. Los cuales mostraron alta asociación (ver **Tabla 7.3**) con las bajas en los rendimientos mostrado en la Figura 2.2 del capítulo 2. El rendimiento disminuyó entre un 10% y 60%, en los cvs Desireé, Karu, Patagonia y Yagana luego de ser sometidos a DHC durante 28 días, siendo Karu el menos afectado y Yagana el más afectado.

Tabla 7.3. Matriz de coeficientes de correlación entre los parámetros evaluados durante 28 días bajo DHC, para cuatro cvs de papa (Desireé, Karú, Patagonia y Yagana). Los tratamientos de DHC fueron 100% de riego (control), 50% de riego y 25% de riego durante dos temporadas, el control correspondió al 100% de reposición de la evapotranspiración diaria. El ensayo se realizó en macetas bajo invernadero ($24\pm 3^{\circ}\text{C}$) en INIA-Chile.

	(θ)	Potencial hídrico- hoja	Rendimiento- planta	Biomasa- Canopia
(θ)	1,00*			
Potencial hídrico- hoja	0,87*	1,00*		
Rendimiento- planta	0,77*	0,93*	1,00	
Biomasa- Canopia	0,59*	0,40	0,24	1,00

(θ) = contenido volumétrico promedio de agua en el sustrato. * $p < 0.05$

En conclusión, el estudio de a déficit hídrico en papa es aún incipiente y esta limitado a pocos cultivares. En conjunto con determinar la respuesta a estrés hídrico en diferentes cultivares y zonas geográficas es necesario profundizar en tiempos de riego y su respuesta tanto en rendimiento como en calidad.

LITERATURA CONSULTADA

- Berengena, J., Gavilán, P., and Puech, I. (2000).** Validation of a FDR [Frequency Domain Reflectometry] equipment for estimating the water extractions by the crops]. In *Congresos y Jornadas-Junta de Andalucía (España)*. JA, CAP.
- Blum, A. (2009).** Effective use of water (EUW) and not water-use efficiency (WUE) is the target of crop yield improvement under drought stress. *Field Crops Research*, 112(2), 119-123.
- Blum, A. (2011).** Plant water relations, plant stress and plant production (pp. 11-52). Springer New York.
- Camargo, D. C., Montoya, F., Ortega, J. F., and Córcoles, J. I. (2015).** Potato yield and water use efficiency responses to irrigation in semiarid conditions. *Agronomy Journal*, 107(6), 2120-2131.
- Chaman, M. (2007).** Variaciones en el contenido relativo de agua y la concentración de prolina en *Capsicum annum* L. inducido por NaCl. *Arnaldoa*, 14 (2), 251- 258.
- Condon, A. G., Richards, R. A., Rebetzke, G. J., and Farquhar, G. D. (2004).** Breeding for high water-use efficiency. *Journal of Experimental Botany*, 55(407), 2447-2460.
- Dalla Costa, L., Delle Vedove, G., Gianquinto, G., Giovanardi, R., and Peressotti, A. (1997).** Yield, water use efficiency and nitrogen uptake in potato: influence of drought stress. *Potato Research*, 40(1), 19-34.

- Deblonde, P. M. K., and Ledent, J. F. (2001).** Effects of moderate drought conditions on green leaf number, stem height, leaf length and tuber yield of potato cultivars. *European Journal of Agronomy*, 14(1), 31-41.
- Dobriyal, P., Qureshi, A., Badola, R., and Hussain, S. A. (2012).** A review of the methods available for estimating soil moisture and its implications for water resource management. *Journal of Hydrology*, 458, 110-117.
- Doorenbos, J., and Pruitt, W.O. (1977).** Crop water requirements irrigation and drainage, p: 24. Food and Agricultural Organization of the United Nations, Rome, Italy.
- Fabeiro, C., de Santa Olalla, F. M., and de Juan, J. A. (2001).** Yield and size of deficit irrigated potatoes. *Agricultural Water Management*, 48(3), 255-266.
- FAO (2003a).** Agricultura 21. Enfoques. Revista Gestión Moderna del Riego. Departamento de Agricultura. FAO, Roma. 1- 2.
- FAO (2003b).** Descubrir el potencial del agua para la agricultura. <http://www.fao.org/docrep/006/y4525s/y4525s00.HTM> (Último acceso septiembre 2015).
- Fernández, R.J. (2010).** Control versus realismo en estudios ecofisiológicos: opciones de diseño y procedimientos en experimentos de sequía, Capítulo 8, *In: Técnicas de Medición en Ecofisiología Vegetal*. Fernández, M.E. and Gyenge, J.E. (Eds). INTA Argentina, 13–24.
- Gil, H. M., Bota, J., Llompарт, J. C., Flexas, J., and León, J. G. (2007).** Eficiencia en el uso del agua por las plantas. *Investigaciones Geográficas*, (43), 63-84.
- González, L., and González-Vilar, M. (2001).** Determination of relative water content. *In: Handbook of plant ecophysiology techniques*. Manuel J. Reigosa Roger (Ed.). Springer Netherlands, 207-212.

- Heuer, B., and Nadler, A. (1995).** Growth and development of potatoes under salinity and water deficit. *Australian Journal of Agricultural Research*, 46(7), 1477-1486.
- IPCC (2013).** Fifth assessment report, WG1 AR5. <http://www.ipcc.ch/report/ar5/wg1/> (Último acceso junio 1015).
- IPCC (2015).** Carbon Dioxide: Projected emissions and concentrations. http://www.ipcc-data.org/observ/ddc_co2.html, (Último acceso noviembre 2015).
- Jeffery, R.A. (1995).** Physiology of crop response to drought. *In: Potato ecology and modeling of crops under conditions limiting growth*, Haverkort, A.J. and MacKerron D.K.L. (Eds.). Wageningen Academic Publishers, The Netherlands, 61–74.
- Knipp, G., and Honermeier, B. (2006).** Effect of water stress on proline accumulation of genetically modified potatoes (*Solanum tuberosum* L.) generating fructans. *Journal of Plant Physiology*, 163(4), 392-397.
- Lahlou, O., Ouattar, S., and Ledent, J. F. (2003).** The effect of drought and cultivar on growth parameters, yield and yield components of potato. *Agronomie*, 23(3), 257-268.
- Liu, F., Jensen, C. R., Shahanzari, A., Andersen, M. N., and Jacobsen, S. E. (2005).** ABA regulated stomatal control and photosynthetic water use efficiency of potato (*Solanum tuberosum* L.) during progressive soil drying. *Plant Science*, 168(3), 831-836.
- Liu, F., Shahnazari, A., Andersen, M. N., Jacobsen, S. E., and Jensen, C. R. (2006).** Physiological responses of potato (*Solanum tuberosum* L.) to partial root-zone drying: ABA signalling, leaf gas exchange, and water use efficiency. *Journal of Experimental Botany*, 57(14), 3727-3735.

- Mane, S.P., Robinet, C.V., Ulanov, A., Schafleitner, R., Tincopa, L., Gaudin, A., Nomberto, G., Alvarado, C., Solis, C., Bolivar, LA., Blas, R., Ortega, O., Solis, J., Panta, A., Rivera, C., Samolski, I., Carbajulca, D.H., Bonierbale, M., Pati, A., Heath, L.S., Bohnert, H.J., and Grene, R. (2008).** Molecular and physiological adaptation to prolonged drought stress in the leaves of two Andean potato genotypes. *Functional Plant Biology*, 35(8), 669-688. doi: 10.1071/FP07293.
- Martin, E. C. (2010).** Métodos para medir la humedad del suelo para la programación del riego cuándo? Extensión Cooperativa de La Universidad de Arizona, EE.UU. 1-8. <http://extension.arizona.edu/pubs/az1220s.pdf>.
- Martínez, C. A., and Moreno, U. (1992).** Expresiones fisiológicas de resistencia a la sequía en dos variedades de papa sometidas a estrés hídrico en condiciones de campo. *Revista Brasileira de Fisiología Vegetal*, 4(1), 33-38.
- Martínez, J., Sánchez-Pérez, J. M., and Cammeraat, L. H. (1994).** La medida de la humedad del suelo mediante el método TDR (Time Domain Reflectometry): Estado del arte y ejemplos de aplicación. *In: Investigación en Zona Saturada*, I. Morell Evangelista (Ed.). Universitat Jaume I. Col.lecció Summa. Castellò, 17-27.
- Martinez, E. M., Cancela, J. J., Cuesta, T. S., and Neira, X. X. (2011).** Review. Use of psychrometers in field measurements of plant material: accuracy and handling difficulties. *Spanish Journal of Agricultural Research*, 9(1), 313-328.
- Mendez, L., and Inostroza, F. (2009).** Manual de Papas para la Araucanía. Serie: Boletín INIA-Instituto de Investigaciones Agropecuarias. ISSN0717-4829, (Nº194), 57-69.
- Nagaz, K., Masmoudi, M.M., and Mechlia, N.B. (2007).** Soil salinity and yield of drip-irrigated potato under different irrigation regimes with saline water in arid conditions of Southern Tunisia. *Journal of Agronomy*, 6, 324-330.

- Pastuszka, T., Krzyszczak, J., Slawinski, C., and Lamorski, K. (2014).** Effect of Time-Domain Reflectometry probe location on soil moisture measurement during wetting and drying processes. *Measurement*, 49, 182-186.
- Rashidi, M., and Gholami, M. (2008).** Review of crop water productivity values for tomato, potato, melon, watermelon and cantaloupe in Iran. *International Journal of Agriculture and Biology*, 10, 432-436.
- Shahnazari, A., Liu, F., Andersen, M. N., Jacobsen, S. E., and Jensen, C. R. (2007).** Effects of partial root-zone drying on yield, tuber size and water use efficiency in potato under field conditions. *Field Crops Research*, 100(1), 117-124.
- Solomon, K. F., and Labuschagne, M. T. (2003).** Variation in water use and transpiration efficiency among durum wheat genotypes grown under moisture stress and non-stress conditions. *The Journal of Agricultural Science*, 141(01), 31-41.
- Tuberosa, R. (2012).** Phenotyping for drought tolerance of crops in the genomics era. *Frontiers in Physiology*, 3(3), 347.
- Turner, N. C., and Long, M. J. (1980).** Errors arising from rapid water loss in the measurement of leaf water potential by the pressure chamber technique. *Australian Journal of Plant Physiology*, 7(5), 527-537.
- Walker, J. P., Willgoose, G. R., and Kalma, J. D. (2004).** *In situ* measurement of soil moisture: a comparison of techniques. *Journal of Hydrology*, 293(1), 85-99.
- Weisz, R., Kaminski, J., and Smilowitz, Z. (1994).** Water deficit effects on potato leaf growth and transpiration: utilizing fraction extractable soil water for comparison with other crops. *American Potato Journal*, 71(12), 829-840.