

# Equilibrio en el potencial hídrico previo al amanecer entre hojas de frijol común bajo déficit hídrico edáfico

Marcos Galván-Tovar  
Josué Kohashi-Shibata  
Cándido López-Castañeda

Colegio de Postgraduados, Campus Montecillo, México

Jorge Alberto Acosta-Gallegos

Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias, México

Ángel Martínez-Garza†  
Antonio García-Esteva

Colegio de Postgraduados, Campus Montecillo, México

*El objetivo del presente estudio fue determinar si antes del amanecer se presenta un equilibrio hídrico en las hojas de la planta de frijol (*Phaseolus vulgaris* L.) bajo déficit hídrico edáfico. Las plantas se cultivaron en invernadero, en macetas con suelo franco-arenoso, a las cuales se aplicaron los tratamientos de suspensión de riego (SR) y riego (R). Se registraron: el potencial hídrico en las hojas del tallo principal previo al amanecer ( $\Psi_{\text{hpa}}$ ), las tasas de evapotranspiración y transpiración, la conductancia estomática, el progreso de la condición de marchitez permanente (CMP) en hojas a diferente altura del tallo principal, el porcentaje de humedad del suelo y el déficit de presión de vapor (DPV). En SR y R, se alcanzó un equilibrio en el  $\Psi_{\text{hpa}}$  (entre 4:30 y 6:30 h) de las hojas, a pesar de cierta evapotranspiración, transpiración, conductancia estomática y DPV durante la noche. El  $\Psi_{\text{hpa}}$  estuvo determinado por la humedad del suelo y, debido a la estrecha relación que guardan ambas variables, dicho  $\Psi_{\text{hpa}}$  podría servir como indicador de la disponibilidad de agua en el suelo. En SR, cuando el  $\Psi_{\text{hpa}}$  se redujo desde -0.5 hasta -1.1 MPa, las tasas de transpiración y de evapotranspiración disminuyeron, indicando que el agua disponible en el suelo comenzó a ser insuficiente. Al inicio de la CMP de la tercera hoja compuesta se concluyó el experimento y coincidió con el  $\Psi_{\text{hpa}}$  de -1.5 MPa. Consecuentemente, el  $\Psi_{\text{hpa}}$  es un buen estimador cuantitativo del estrés hídrico en la planta.*

**Palabras clave:** *Phaseolus vulgaris*, equilibrio en el potencial hídrico previo al amanecer, transpiración, evapotranspiración, humedad del suelo, déficit hídrico, porcentaje de marchitez permanente, condición de marchitez permanente.

## Introducción

Las plantas integran en todo momento los factores edáficos y atmosféricos que afectan su condición hídrica (Kramer y Boyer, 1995; Sellin, 1996) y perciben la humedad del suelo directamente (Davies y Zang, 1991; Gowing *et al.*, 1990; Sharp y Davies, 1993). Sin embargo, un suelo que se está secando presenta una heterogeneidad en su potencial hídrico debido a que la humedad en el perfil de dicho suelo presenta diferentes patrones de

distribución tanto vertical como horizontalmente (Slatyer, 1967) y diferentes características físicas (Or y Wraith, 2000). Durante la noche, el efecto de los factores atmosféricos en plantas  $C_3$  y  $C_4$  se minimiza, ya que la pérdida de agua por transpiración disminuye debido al cierre de los estomas y al abatimiento del déficit de presión de vapor (DPV) de la atmósfera (Sellin, 1996), lo cual propicia la rehidratación gradual de la planta. Slatyer (1967) propuso un modelo teórico que considera las relaciones hídricas entre el suelo y la planta, indicando que “al ama-

necer de cualquier día, cuando los gradientes internos en la planta y en el suelo han sido más o menos eliminados por el periodo de equilibrio durante la noche, puede esperarse que el potencial hídrico del suelo sea aproximadamente igual al potencial hídrico de la planta, aun cuando los niveles reales de potencial hídrico del suelo y de la planta declinen diariamente”.

El potencial hídrico de la planta previo al amanecer ha sido ampliamente utilizado para estimar el potencial hídrico del suelo (Améglio *et al.*, 1999; Boyer, 1995; Richter, 1997) y, en consecuencia, la humedad disponible del mismo (Le Roux y Bariac, 1998; Sala *et al.*, 1981; Sellin, 1996), con base en el supuesto de que el potencial hídrico de la planta se equilibra con el de los estratos del suelo más húmedos (Gowing *et al.*, 1990; Hinckley *et al.*, 1978; Ritchie y Hinckley, 1975; Richter, 1997). Améglio y Archer (1996) indicaron que el empleo del  $\Psi_{hpa}$  como un indicador de la disponibilidad de agua en el suelo está basado en los siguientes supuestos: “a) la rehidratación de las hojas ocurre con suficiente rapidez para que el potencial hídrico de la planta previo al amanecer se iguale al de la interfaz suelo-raíz, b) existe una relación entre la proporción de raíces a varias profundidades y el equilibrio final del contenido hídrico en el perfil del suelo, y c) la heterogeneidad lateral del contenido de humedad en el suelo no evita el uso de la masa del suelo como una variable apropiada para explicar el estado hídrico de la planta”. Es posible considerar la capacidad del sistema radical para abastecer de agua al vástago como la sumatoria de las capacidades parciales de las raíces individuales activas situadas en microrregiones con diferente contenido de humedad en el perfil del suelo. Sin embargo, las raíces no están uniformemente distribuidas en dicho perfil y no todas tienen la misma capacidad de absorción de agua (Wang y Smith, 2004) y tampoco ha sido posible conocer *in situ* la localización de las raíces activas. De ahí la utilidad de emplear el  $\Psi_{hpa}$  como indicador de la disponibilidad de agua en el suelo que está en contacto con las raíces activas.

En diferentes especies se ha tratado de verificar la existencia de un equilibrio entre el potencial hídrico de la planta ( $\Psi_{pl}$ ) (del tallo o de una hoja) con el potencial hídrico del suelo ( $\Psi_{suelo}$ ), antes del amanecer (Améglio *et al.*, 1999; Donovan *et al.*, 1999, 2001, 2003; Sellin, 1999). Sin embargo, se ha encontrado un desequilibrio entre el  $\Psi_{pl}$  previo al amanecer y el  $\Psi_{suelo}$  (definido como la diferencia entre el  $\Psi_{suelo}$  que rodea a las raíces y el  $\Psi_{pl}$  previo al amanecer), incluso bajo condiciones de buena humedad del suelo (Donovan *et al.*, 2001). Estos autores también mencionan que diferentes mecanismos contribuyen simultáneamente al desequilibrio en arbustos del desierto estudiados en su ambiente natural. Atribuyeron tal

desequilibrio a una baja conductividad hidráulica suelo-raíz, a la transpiración nocturna, a la heterogeneidad en la humedad del suelo y a los solutos apoplásticos en los espacios intercelulares de las hojas. Además, Donovan *et al.* (2003) señalaron, tanto para *Chrysotamus* (Asteraceae) como para *Sarcobatus* (Chenopodiaceae), que el  $\Psi_{pl}$  previo al amanecer no reflejó la condición hídrica del suelo y que, puesto que hubo diferencias entre especies, el  $\Psi_{pl}$  no puede ser usado para inferir diferencias ecológicas en el acceso a la humedad del suelo, profundidad de enraizamiento y estrés por déficit hídrico edáfico. Duff *et al.* (1997) también consignaron una variación interespecífica en el  $\Psi_{pl}$  previo al amanecer. Por otro lado, para árboles, Sellin (1996, 1999) encontró que el  $\Psi$  máximo se registró una o dos horas después del amanecer, al cual llamó potencial hídrico base ( $\Psi_b$ ). En contraste, para plantas herbáceas de estepa y gramíneas de sabana (algodón, soya, plántulas de cebada, trigo, maíz y girasol), Donovan *et al.* (2001) reportaron que “sí se alcanzó el equilibrio” entre el  $\Psi_{pl}$  previo al amanecer y el  $\Psi_{suelo}$ , considerando como equilibrio diferencias menores a 0.5 MPa. Havranek y Benecke (1978) encontraron que el  $\Psi$  de equilibrio de plántulas de coníferas sin transpiración llegó a ser cercano al  $\Psi_{suelo}$ , pero ligeramente menor en suelo húmedo; en cambio, en suelo muy seco, las plántulas tuvieron un  $\Psi$  más alto que el del suelo. Los resultados anteriores, aparentemente contradictorios, no permiten una interpretación definitiva del  $\Psi_{pl}$  previo al amanecer, debido a que diferentes autores han empleado diversas especies en experimentos de campo o en recipientes de diferente volumen, factores que influyen en el desarrollo del sistema radical. Por otra parte, la velocidad de secado del suelo influye también en el desarrollo de la raíz (Ontiveros-Cortés *et al.*, 2004).

El déficit hídrico en la planta es consecuencia de una disminución de su contenido de agua y ocurre cuando la pérdida de agua por transpiración excede a la de absorción por la raíz (Slatyer, 1967). La planta ejerce cierto control sobre la transpiración mediante el grado de apertura estomática (Mansfield y Davies, 1981; Passioura, 2002). Cuando se presenta un déficit hídrico en el suelo, puede manifestarse en la planta una marchitez temporal y si el déficit continúa, deviene en marchitez permanente (Knight, 1965). En el presente trabajo denominaremos a este último evento *condición de marchitez permanente (CMP)*. La marchitez permanente en la hoja y, por extensión, en la planta, se caracteriza porque, al inicio, la hoja permanece flácida aun al amanecer, y en el caso del frijol, se dobla en sus bordes (Galván *et al.*, 2003). Estos síntomas se agudizan en días subsecuentes. Sin embargo, dentro de ciertos límites, al aplicar agua al suelo, la planta recupera rápidamente su turgencia (Mohr y

Schopfer, 1995). No hay trabajos en frijol que relacionen el progreso de la marchitez de la hoja con su  $\Psi$ . A dicho progreso en la marchitez, Knight (1965) lo denomina estadio o grado de marchitez fisiológica de las hojas. Laker *et al.* (1987) encontraron que el  $\Psi$  previo al amanecer en maíz es un buen indicador del inicio del estrés hídrico en la planta, apreciable a simple vista bajo condiciones moderadas, pero no bajo condiciones de alta demanda evaporativa en campo. Améglío *et al.* (1999) y Sellin (1996) señalaron que el  $\Psi_b$  de la planta es indicativo del estrés hídrico estático causado por una baja disponibilidad de agua en el suelo.

Se ha comprobado el establecimiento de un gradiente de  $\Psi$  entre las partes de la planta durante el periodo diurno (Begg y Turner, 1976); hay pocos estudios referentes al  $\Psi$  entre las diferentes partes de la planta antes del amanecer. Sin embargo, si antes del amanecer el *gradiente interno de potenciales de agua* de la planta disminuye o llega a anularse, se establecería un equilibrio entre las partes de la planta, lo cual sería un buen indicador de la disponibilidad de agua del suelo que está en contacto con las raíces activas. Para verificar lo anterior, el objetivo del presente trabajo fue determinar en plantas de frijol bajo invernadero, si previo al amanecer se alcanza el equilibrio en el  $\Psi$  entre las diferentes hojas del tallo principal ( $\Psi_{hpa}$ ), conforme el suelo se va secando. Si esto ocurre, los  $\Psi$  entre ellas antes del amanecer podrían ser iguales o aproximadamente iguales. Adicionalmente, analizar la relación entre el  $\Psi_{hpa}$ , la transpiración, el progreso de la condición de marchitez permanente de las hojas y el contenido de humedad de la masa del suelo.

## Materiales y métodos

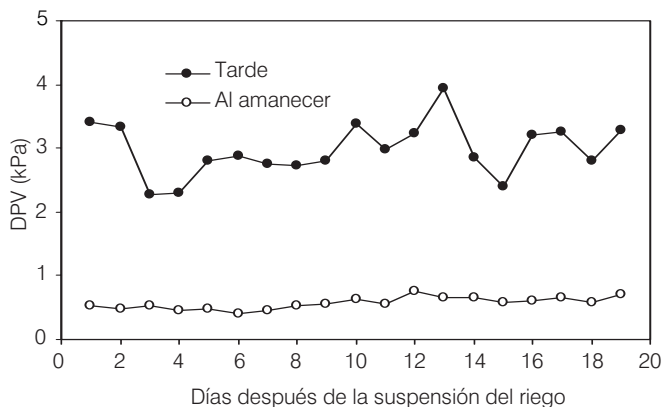
### Sitio de estudio y experimentos

El estudio se realizó en un invernadero del Colegio de Postgraduados, en Montecillo, Estado de México, México (19° 30' N, 98° 51' O y 2,250 msnm) y consistió en dos experimentos similares: uno conducido de abril a julio del 2002 (verano), y otro de octubre a diciembre de 2004 (otoño).

### Material vegetal y condiciones de crecimiento

En ambos experimentos se utilizó frijol (*Phaseolus vulgaris* L.) cultivar Bayo Madero (BM), de hábito indeterminado tipo III de guía corta (Singh *et al.*, 1991), susceptible a sequía (Acosta, 1982). Las plantas se desarrollaron en macetas de plástico de 14 cm de profundidad, 15 cm de diámetro inferior y 20 cm de diámetro superior. Cada maceta se llenó con 4.5 kg de suelo de textura franco-are-

**Ilustración 1. Déficit de presión de vapor (DPV) dentro del invernadero en el experimento de otoño, calculado con base en temperatura y humedad relativa máximas (tarde) y mínimas (al amanecer) diarias, determinadas con un higrómetro, a partir de la suspensión del riego.**



nosa, cuyo contenido de humedad al momento de llenar las macetas era de 9%. Posteriormente se aplicó un riego y se sembraron dos semillas por maceta para después dejar sólo una plántula.

En el experimento de otoño se registró diariamente dentro del invernadero la temperatura máxima y mínima, y la humedad relativa con un higrómetro (Klimatologische Messtechnik, Göttingen). Con los datos obtenidos se calculó el déficit de presión de vapor (DPV), el cual es un indicador de la demanda evaporativa de la atmósfera dentro del invernadero (ilustración 1). No se contó con datos del higrómetro durante la conducción del experimento de verano. Cada experimento (verano y otoño) se analizó por separado.

### Tratamientos y diseño experimental

Cada experimento (verano y otoño) consistió en dos tratamientos de humedad: suspensión de riego (SR) y riego (R, testigo). En el tratamiento SR, se suspendió el riego desde el inicio de la etapa V4, que ocurrió cuando la planta presentó la tercera hoja compuesta completamente desplegada (CIAT, 1982), hasta la fecha en la cual esta hoja alcanzó la CMP. Este lapso de suspensión de riego se consideró como el tiempo necesario para que dicha hoja presentara la CMP, en las plantas de SR. Cada mañana se observó el progreso de la marchitez de las hojas del tallo principal para la detección del inicio de la CMP en la tercera hoja compuesta, condición que sirvió para establecer su relación con el  $\Psi_{hpa}$  o nivel de estrés en la planta. En el tratamiento de R, se mantuvo el suelo cercano a capacidad de campo (CC) durante el

experimento, mismo que se concluyó en la fecha en que en *SR* la tercera hoja compuesta alcanzó la *CMP*. Las plantas alcanzaron una altura promedio de un metro en ambos tratamientos.

Se utilizó un diseño experimental completamente al azar con cuatro repeticiones en seis series de experimentos. La unidad experimental consistió en una planta desarrollada por maceta.

#### Potencial hídrico

Se midió el  $\Psi_{hpa}$  entre las 4:30 y 6:30 horas con la cámara de presión de Scholander (Scholander *et al.*, 1965), en las plantas de *R* y *SR*. En cada muestreo se utilizó desde la hoja simple hasta la tercera compuesta en seis fechas en el experimento de verano, y de la primera hasta la cuarta hojas compuestas, en siete fechas en otoño. Estas determinaciones se realizaron cada tercer día, desde la suspensión del riego hasta el inicio de la *CMP* de la tercera hoja compuesta. Los datos en bars fueron transformados a MPa.

#### Tasa transpiratoria

La tasa de transpiración y conductancia estomática se determinó en ambos tratamientos con un porómetro LI-COR 1600 (Li-Cor, Inc., Lincoln, Nebraska, Estados Unidos) a los 5, 8 y 13 días después de iniciado el tratamiento de suspensión del riego. Estas determinaciones se realizaron en la primera y tercera hojas compuestas a las 7:00, 13:00 y 20:00 horas.

#### Evapotranspiración y contenido de humedad del suelo

Solamente en el experimento de otoño se determinó el porcentaje de humedad del suelo en todas las macetas empleando el método gravimétrico, el cual permite conocer el contenido total de agua de la masa del suelo (suelo contenido en cada maceta). Se registró el peso seco del suelo de cada maceta, así como su peso a capacidad de campo como referencia para poder evaluar los cambios en su contenido de humedad a través del tiempo. Para este propósito, a partir de la suspensión del riego, se dio seguimiento al peso individual de un grupo de diez macetas (maceta+planta) por cada tratamiento, en el periodo diurno (7:00 a 19:00 h) y nocturno (19:00 a 7:00 h), a partir de la suspensión del riego hasta el final del experimento. Lo anterior, con el objeto de determinar los cambios en el contenido de humedad de la masa del suelo y relacionarlos con la dinámica de la evapotranspiración, el  $\Psi_{hpa}$  y el déficit de presión de vapor. Se despreció el peso de la planta debido a que repre-

sentó un porcentaje mínimo del peso total maceta+planta. Con la pérdida de humedad del suelo de las macetas de ambos tratamientos, se determinó el porcentaje de humedad de la masa del suelo en días sucesivos en el grupo de macetas de *R* y *SR*. Las constantes de humedad del suelo fueron 12% para capacidad de campo (*CC*) y un 6.22% para porcentaje de marchitez permanente (*PMP*). Dichas constantes se determinaron en el laboratorio de la Universidad Autónoma Chapingo.

#### Análisis estadístico

Se realizó el análisis de varianza y la prueba de comparación de medias de Tukey, usando el programa estadístico SAS (2001). Para cada experimento, los análisis se hicieron por separado a cada variable medida por muestreo.

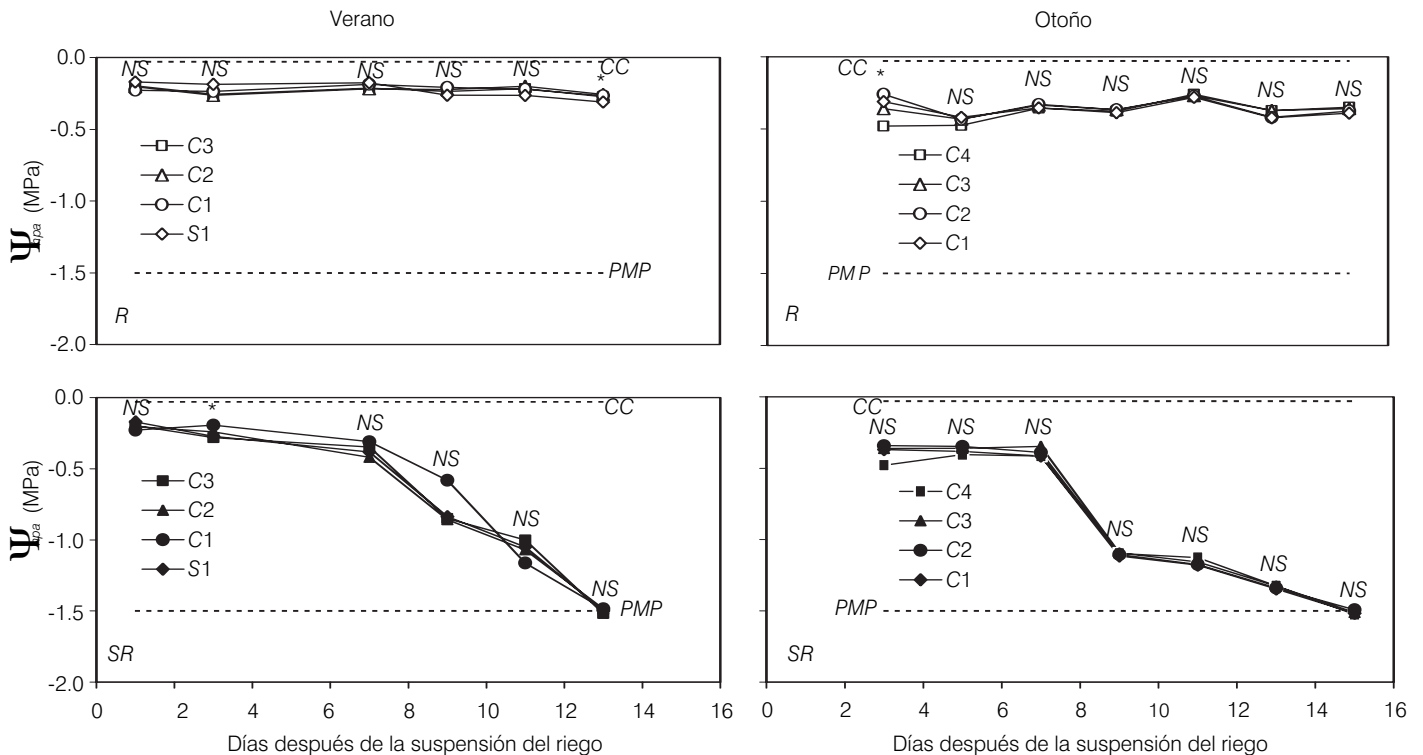
## Resultados y discusión

#### Equilibrio en el potencial hídrico de hojas

Los valores de  $\Psi_{hpa}$  en *SR* variaron de -0.22 al inicio de la suspensión del riego a -1.51 MPa al final del ciclo en verano y desde -0.35 hasta -1.53 MPa en otoño. En *R*, los valores del  $\Psi_{hpa}$  fluctuaron entre -0.17 y -0.31 MPa en verano y de -0.26 a -0.48 MPa en otoño (ilustración 2), lo cual está relacionado, entre otros factores, con el hecho de que la demanda evaporativa de la atmósfera (*DPV*) durante el lapso del tratamiento de suspensión del riego, fue baja, pero uniforme al amanecer.

El  $\Psi_{hpa}$  entre las hojas de los nudos del tallo principal no presentó diferencias significativas en *SR* y *R*, en la mayoría de los muestreos en verano y otoño. En consecuencia, se alcanzó el equilibrio en el  $\Psi_{hpa}$  entre las diferentes hojas, en el lapso de la suspensión del riego. En dicho lapso, el  $\Psi_{hpa}$  en *SR* fue disminuyendo gradualmente, manteniéndose siempre el equilibrio entre las hojas. Estos resultados están de acuerdo con los obtenidos por McElrone *et al.* (2003), quienes presentan gráficas donde se observa un equilibrio entre cinco hojas situadas a diferente altura de la planta de *Parthenocissus quinquefolia* (Vitaceae), tanto con sequía (50% de capacidad de campo) como con buena humedad en el suelo. Asimismo, Eamus y Prior (2001) encontraron en *Eucalyptus tetradonta* (Myrtaceae) que en la época húmeda se estableció un equilibrio en el  $\Psi$  a diferentes alturas en la planta, antes del amanecer, y una ligera diferencia entre alturas durante la época seca. En el presente trabajo, debido al equilibrio que se alcanzó en el  $\Psi_{hpa}$  en *R* y *SR*, se puede inferir que también se alcanzó un equilibrio en todas las partes de la planta —incluyendo las raíces— y

**Ilustración 2. Potencial hídrico previo al amanecer por hoja (S1 = simple, C1 = primera compuesta, C2 = segunda compuesta y C3 = tercera compuesta) en condiciones de riego (R) y suspensión de riego (SR) en los experimentos de verano y otoño en plantas de frijol. Las determinaciones se realizaron en diferentes fechas después de la suspensión del riego. CC = capacidad de campo, PMP = porcentaje de marchitez permanente. \* = diferencias significativas ( $P < 0.05$ ). NS = no significativo. Cada punto representa el promedio de cuatro observaciones.**



que el  $\Psi_{hpa}$  corresponde al máximo diario, al cual Sellin (1996) denominó potencial hídrico base ( $\Psi_b$ ).

El  $\Psi_{hpa}$  durante el lapso del tratamiento de suspensión del riego estuvo más relacionado con el porcentaje de humedad de la masa del suelo que con la transpiración y la conductancia estomática, mientras que los cambios en el  $\Psi_{hpa}$  de un día a otro, al disminuir la humedad del suelo, estuvieron más relacionados con la pérdida de agua por transpiración de la planta durante el periodo diurno. Dichos resultados coinciden con los reportados por Sellin (1999). Aunque el equilibrio se mantiene al disminuir el contenido de agua en el suelo, es difícil determinar en qué momento del lapso de suspensión del riego la planta deja de absorber agua del suelo (por pérdida de la conductividad hidráulica entre suelo-raíz), ya que a partir de ese momento, teóricamente, la disminución en el  $\Psi_{hpa}$  sería el resultado únicamente de la deshidratación de los tejidos de la planta.

Es probable que al eliminar la transpiración de las hojas mediante una atmósfera saturada y eliminando el gradiente de temperatura entre hoja-aire, el  $\Psi_{hpa}$  aumen-

te, como lo consignaron Donovan *et al.* (2001), al anular la transpiración de las hojas cubriéndolas con bolsas de plástico.

#### Tasa de transpiración y conductancia estomática

Las hojas no suspendieron la transpiración a las 7:00 y 20:00 h, en SR y en R, sino que solamente la minimizaron, comparada con la registrada a las 13:00 h en R (ilustración 3a). La conductancia estomática a las 20:00 h fue prácticamente nula en R y SR comparada con la de 7:00 h en R y SR, y la de 13:00 en R y SR (ilustración 3b). Estos resultados están relacionados con el hecho de que, si bien la temperatura descendió durante el periodo nocturno, no se alcanzó el punto de rocío, puesto que el DPV no alcanzó el valor de cero (ilustración 1). De todas formas, el cierre estomático no es hermético. Donovan *et al.* (2003) y Snyder *et al.* (2003) encontraron una transpiración y conductancia estomática nocturnas significativas en once de 17 especies de distintos tipos: anuales, perennes, gramíneas, arbustos y árboles. De igual forma,

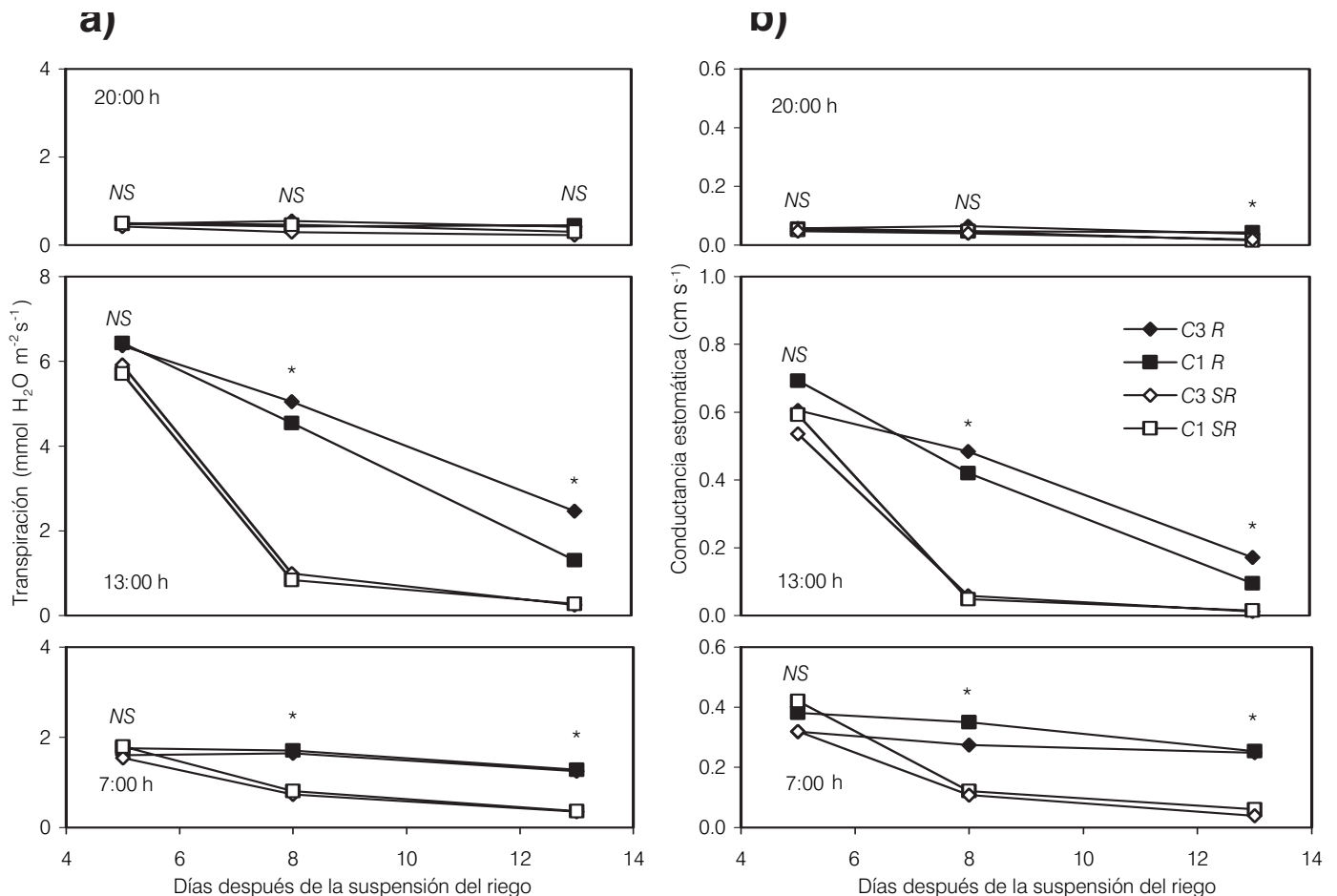
Donovan *et al.* (1999, 2001, 2003) detectaron transpiración nocturna en *Chrysothamnus* (Asteraceae) y *Sarcobatus* (Chenopodiaceae) bajo condiciones de riego.

En el presente trabajo se puede observar una similitud en los patrones de transpiración y conductancia estomática (ilustraciones 3a y 3b). Sin embargo, los valores de estas variables a las 7:00 y a las 20:00 h, y los del DPV al amanecer (ilustración 1) fueron bajos en el lapso del tratamiento de suspensión del riego, de tal manera que no afectaron el equilibrio en el  $\Psi_{hpa}$ . Esto indica que la atmósfera presentó baja demanda evaporativa, lo cual permitió que se igualaran los  $\Psi_{hpa}$  de la planta en *SR* y *R* (ilustración 2). Snyder *et al.* (2003) indicaron que para una conductancia total dada, la transpiración en la noche depende del gradiente de  $\Psi$  entre la hoja y la atmósfera. En el presente trabajo no hubo diferencias significa-

tivas entre la tasa de transpiración y la conductancia estomática de las hojas compuesta uno (C1) y compuesta tres (C3) dentro de cada tratamiento, a las 7:00, 13:00 y 20:00 horas (ilustraciones 3a y 3b).

En *SR*, la transpiración y la conductancia estomática se redujeron a las 7:00 y a las 13:00 horas, mientras que a las 20:00 horas disminuyeron tanto en *R* como en *SR*. En consecuencia, ambas variables se redujeron en ambos tratamientos, en primer lugar, por el déficit hídrico al disminuir el contenido de humedad de la masa del suelo y, en segundo lugar, por ausencia de luz en el periodo nocturno. En *R*, la transpiración de las 20:00 y las 7:00 horas fue menor que la registrada a las 13:00 horas (ilustración 3a), lo cual está relacionado con el valor del déficit de presión de vapor de la atmósfera (DPV), que fue mínimo al amanecer (7:00 horas), y con la variación de

**Ilustración 3. Tasa de transpiración (a) y conductancia estomática (b) de las hojas primera compuesta (C1) y tercera compuesta (C3) en los tratamientos de riego (R) y suspensión de riego (SR), realizadas a las 20:00, 13:00 y 7:00 horas del día, y en diferentes fechas después de la suspensión del riego. \* = diferencias significativas ( $P < 0.05$ ). NS = no significativo entre tratamientos. Cada punto representa el promedio de cuatro observaciones.**



un día a otro, que fue pequeña (0.4 a 0.7 kPa), a diferencia del DPV durante la tarde, en que alcanzó valores del orden de 2.2 a 3.9 kPa (ilustración 1). Sellin (1996) consignó que los valores de  $\Psi_b$  de un árbol son ligeramente influidos por el DPV. Sin embargo, Tardieu *et al.* (1992) indicaron que en maíz bajo condiciones de campo, la conductancia estomática presentó una relación estrecha con la concentración de ácido abscísico en xilema, pero no con el estatus hídrico actual. Al respecto, Prior *et al.* (1997) encontraron que la conductancia estomática respondió de manera más marcada a la diferencia de presión de vapor entre hoja-aire cuando los  $\Psi$  de la hoja antes del amanecer fueron moderadamente bajos (-0.5 a -1.5 MPa) que cuando fueron muy bajos (menores a -1.5 MPa) o altos (mayores a -0.5 MPa). El descenso de la conductancia estomática al final del lapso del tratamiento de suspensión del riego (entre el día ocho y el trece) a las 13:00 horas, bajo condiciones de *R*, puede ser atribuido a un incremento en el DPV por la tarde, que fue mayor durante esos días (ilustración 1).

Durante el periodo diurno también se redujo la transpiración en las plantas de *R* y *SR* a las 13:00 horas (ilustración 3a), lo cual puede deberse al cierre de estomas al aumentar el DPV (ilustración 1), ya que la tasa de transpiración no es compensada por la correspondiente absorción de agua por las raíces y se produce un déficit hídrico temporal en la planta (Galston *et al.*, 1980; Slatyer, 1967).

#### Humedad del suelo

El porcentaje de humedad en el suelo bajo condiciones de *SR*, en otoño, disminuyó gradualmente hasta alcanzar la *CC* a los seis días y el *PMP* a los catorce días de la suspensión del riego. Al final del experimento (quince días), dicho porcentaje fue de 4.9, valor que estuvo por debajo de *PMP* (6.22%), en tanto que en *R* se mantuvo cercano a *CC* (12%), con variaciones mayores que en *SR* (ilustración 4b) debido a la aplicación de riegos.

La teoría clásica de las relaciones hídricas predice que el  $\Psi$  de la planta antes del amanecer debe estar en equilibrio con el  $\Psi$  del suelo (Améglio *et al.*, 1999; Nobel, 1991; Sellin, 1996, 1999; Slatyer, 1967). En general, como se indicó anteriormente, antes del amanecer, tanto en *R* como en *SR*, se igualaron los  $\Psi$  entre las diferentes hojas de la planta, de donde se puede inferir que se igualó el  $\Psi$  en todas las partes de la planta.

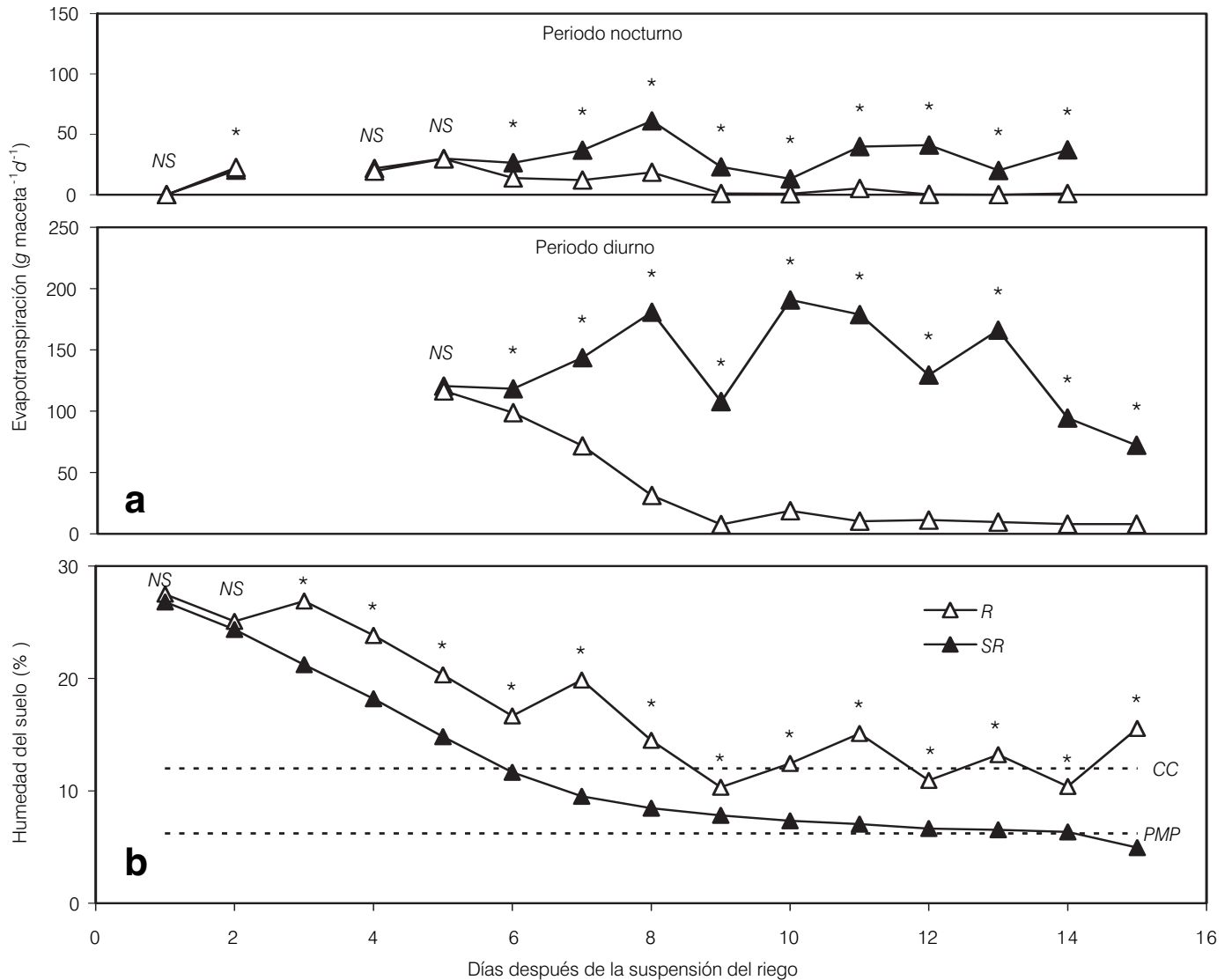
En el presente trabajo, en *R*, el  $\Psi_{hpa}$  se mantuvo estable de -0.26 a -0.5 MPa, en otoño, y de -0.18 a -0.31 MPa, en verano, incluso cuando siempre fue menor que el  $\Psi$  correspondiente al porcentaje de humedad de la masa del suelo durante todo el periodo que duró la suspensión del riego (ilustraciones 2 y 4b). Sin embargo, el

$\Psi_{hpa}$  en todos los muestreos de *R* fue siempre menor que el correspondiente  $\Psi$  de la masa del suelo a *CC* (-0.03 MPa). En *SR*, el  $\Psi_{hpa}$  disminuyó de -0.4 a -1.5 MPa en forma gradual, a partir de que el porcentaje de humedad del suelo descendió por debajo de *CC* y el  $\Psi_{hpa}$  siempre fue menor que el  $\Psi$  del suelo correspondiente a *CC* (ilustraciones 2 y 4b). Sin embargo, se observó una estrecha relación ( $R^2 = 0.90$ ) en la dinámica entre el porcentaje de humedad de la masa del suelo y el  $\Psi_{hpa}$  de *SR* (ilustración 5), a partir del momento en que la humedad del suelo es menor que *CC* (día 7) hasta aquel en que el contenido de humedad del suelo llegó al *PMP* (día 15), lapso en el que la tasa de transpiración y la de evapotranspiración llegaron a ser mínimas durante el periodo diurno y el nocturno (ilustración 4b).

Debido a lo anterior, el  $\Psi_{hpa}$ , aunque fue cercano, no se igualó al  $\Psi$  del suelo correspondiente al porcentaje de humedad de la masa del suelo. Esto también podría estar relacionado con la transpiración nocturna (Donovan *et al.*, 1999, 2001, 2003) debido a que el DPV de la atmósfera previo al amanecer permitió cierto grado de transpiración y posiblemente también sobre el valor del  $\Psi_{hpa}$  de equilibrio. Donovan *et al.* (2001) aceptaron una diferencia menor a 0.5 MPa para indicar un equilibrio entre el  $\Psi_{pl}$  y el del suelo.

En la presente investigación, el  $\Psi_{hpa}$  mantuvo su equilibrio entre hojas bajo condiciones de disminución del contenido de humedad en la masa del suelo y muy probablemente de la distribución heterogénea de dicha humedad al ir avanzando el lapso de suspensión del riego, lo cual está de acuerdo con los resultados obtenidos por Améglio *et al.* (1999) y Bréda *et al.* (1995), por lo que se deduce que el  $\Psi_{hpa}$  está determinado en mayor grado por el contenido de humedad del suelo donde se ubican las raíces activas. Améglio *et al.* (1999), Havranek y Bencke (1978), Jordan y Ritchie (1971) y Sellin (1996) encontraron que el  $\Psi_{pl}$  previo al amanecer está determinado por el  $\Psi$  de las capas de suelo más profundas y por lo tanto más húmedas. La tendencia del  $\Psi_{hpa}$  a equilibrarse con el  $\Psi$  de las zonas más húmedas del suelo puede indicar una falta de sensibilidad del  $\Psi_b$  a grandes variaciones de la humedad del suelo, lo que ha sido previamente reportado por diversos investigadores (Bréda *et al.*, 1995; Garnier y Berger, 1987; Tardieu y Katerji, 1991). Gowing *et al.* (1990) encontraron en un experimento con raíz dividida que el  $\Psi$  entre plantas no presentó diferencias significativas al aplicar sequía a una mitad de una maceta, en comparación con el testigo regado en las dos mitades, por lo que el  $\Psi_{pl}$  está determinado por las regiones más húmedas del suelo. De esta forma, el  $\Psi_{hpa}$  puede ser un buen indicador de la disponibilidad de agua en el suelo, siendo ésta limitante o insuficiente cuando el

**Ilustración 4.** Tasa de evapotranspiración de la unidad experimental (maceta+planta) durante el periodo nocturno y diurno (a), y porcentaje de humedad de la masa del suelo (b) en dos condiciones de humedad, riego (*R*) y suspensión de riego (*SR*), en otoño, obtenidos mediante el peso de la maceta. *CC* = capacidad de campo, *PMP* = porcentaje de marchitez permanente *d* = día \* = diferencias significativas ( $P < 0.05$ ). *NS* = no significativo. Cada punto representa el promedio de diez observaciones.



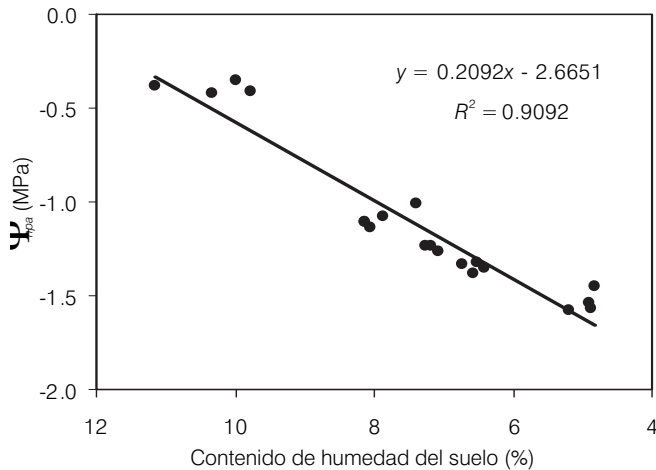
$\Psi_{hpa}$  cae por debajo del valor del  $\Psi_{hpa}$  de *R* (menor a -0.5 MPa) debido que la evapotranspiración comienza a disminuir. A partir de ese momento hay necesidad de aplicar un riego para no afectar procesos tan importantes como la fotosíntesis.

Puesto que la absorción de agua por las raíces está controlada por la tasa de transpiración (Nnyamah *et al.*, 1978), a un  $\Psi_{hpa}$  de -1.1 MPa, cuando la evapotranspiración diurna y nocturna se minimizan, el suelo sigue per-

diendo agua por evaporación. Probablemente las raíces de la planta reducen su capacidad para absorber agua del suelo al no restablecerse un gradiente de potenciales entre el suelo y las raíces. Sin embargo, es posible que también el  $\Psi_{hpa}$  y la humedad de la masa del suelo disminuyan gradualmente debido a una deshidratación de los tejidos de la planta favorecida por el cierre parcial de estomas que corresponde a una pérdida lenta de humedad del suelo, mayormente por evaporación.



**Ilustración 5. Comparación del  $\Psi_{hpa}$  (potencial hídrico de las hojas de la planta previo al amanecer) y el porcentaje de humedad del suelo en SR del día 7 al día 15 después de la suspensión del riego. Las constantes de humedad del suelo fueron de 12% para capacidad de campo (CC) y 6.22% para porcentaje de marchitez permanente (PMP).**



#### Tasa de evapotranspiración

La evapotranspiración se tradujo en una pérdida de humedad del suelo tanto en el periodo diurno como en el nocturno. Se registró un abatimiento importante de humedad durante el periodo nocturno, cuyos porcentajes fueron de 7 a 33.8% en *R* y de 0 a 25.6% en *SR*, en relación con el del periodo diurno (ilustración 4a). Es de esperarse que en *SR* sea debido a que se haya establecido un gradiente mayor en el contenido de humedad de los estratos superficiales hacia los inferiores del suelo comparado con *R*. Bréda *et al.* (1995) observaron que cuando la sequía se acentuó en los estratos superiores, la pérdida de conductividad hidráulica se tradujo en una disminución del transporte de agua hacia las raíces.

En *SR*, la tasa de evapotranspiración en los periodos diurno y nocturno disminuyó a los seis días de haber suspendido el riego, cuando se presentaron diferencias significativas entre tratamientos, y fue mínima a los nueve días. Esto significa que la pérdida rápida de agua en *R* y *SR* con humedad a CC o mayor es debida a una evapotranspiración alta que se presenta cuando no hay restricciones de humedad en el suelo. En contraste, en *SR* la evapotranspiración fue más lenta después del día seis (ilustración 4) debido, probablemente, a que conforme el suelo se fue secando, disminuyó su conductividad hidráulica (Kramer y Boyer, 1995) así como la de suelo-raíz (Nobel y Cui, 1992).

En el experimento de verano, el secado del suelo fue más rápido que en el de otoño, por lo que las plantas llegaron a la *CMP* en menor tiempo debido, sobre todo, a las bajas temperaturas en esta última estación.

Después del día nueve, la evapotranspiración fue mínima tanto en el periodo diurno como en el nocturno y a partir de ese momento la pérdida de agua en la maceta fue debida a la evaporación; la absorción de agua probablemente cesa o se vuelve mínima al ser la transpiración mínima también, tanto en el periodo diurno como en el nocturno en *SR* (ilustración 3a y 4a). Al reducirse el contenido de humedad en el suelo y, por consiguiente, la transpiración y la conductancia estomática en las hojas, se reduce la velocidad de pérdida de humedad en el suelo debida solamente a la evaporación. En consecuencia, a partir del momento en que la planta pierde la capacidad de absorber agua del suelo y se pierde la conductividad hidráulica entre raíz-suelo, el  $\Psi_{hpa}$  ya no es representativo de la condición hídrica del suelo. Sólo sería un indicador de la condición hídrica de la planta en proceso de deshidratación.

#### Estrés hídrico en la planta

En la mayoría de los muestreos en *SR*, el  $\Psi$  de las hojas necesario para que la planta alcanzara el mismo nivel de estrés previo al amanecer (esto es, el inicio de la *CMP* de la tercera hoja compuesta) fue similar (-1.5 MPa) tanto en verano como en otoño. Sin embargo, el tiempo requerido para llegar a la *CMP* fue de 13 días en verano y 15 días en otoño, debido probablemente a la menor temperatura en el día y en la noche en esta última estación, en la cual se requirió más tiempo para llegar al mismo valor de  $\Psi$  (-1.5 MPa). Esto indica que en el presente trabajo el valor del  $\Psi_{hpa}$  fue un buen estimador cuantitativo de la condición de marchitez permanente de la planta de frijol y del estrés hídrico acumulado durante un periodo de déficit hídrico. Laker *et al.* (1987) encontraron en maíz que el  $\Psi_{hpa}$  es un buen indicador del inicio del estrés hídrico de la planta, apreciable a simple vista bajo condiciones moderadas, pero no bajo condiciones de alta demanda evaporativa en campo.

En 22 especies maderables bajo condiciones de campo, Prado *et al.* (2004) encontraron que los valores del  $\Psi_b$  fueron menores en la estación seca (-0.35 a -0.9 MPa) que en la húmeda (-0.08 MPa) y Prior *et al.* (1997), en *Eucalyptus* (Myrtaceae), observaron valores de  $\Psi_b$  entre -0.5 y -1.5 MPa que indican "una etapa inicial de transición hacia un estado de severo estrés hídrico en la hoja". Es probable que en árboles sea más difícil observar síntomas obvios de marchitez, por lo cual se deben realizar mediciones directas. En contraste, en el presen-

te trabajo en frijol, estos síntomas fueron muy notorios al llegar la tercera hoja compuesta a la CMP, la cual estuvo relacionada con un valor de  $\Psi_{hpa}$  de -1.5 MPa previo al amanecer. En *Vitis vinifera*, el  $\Psi$  del tallo antes del amanecer en plantas que no presentaban transpiración resultó ser un indicador más sensible al déficit hídrico inicial que el  $\Psi$  de la hoja (Choné et al., 2001).

En el presente trabajo, el déficit hídrico comenzó en el momento en que se presentaron las diferencias en el  $\Psi$  de las hojas entre los tratamientos de R y SR, cuando la absorción de agua por las raíces no cubre plenamente la demanda por la transpiración. McElrone et al. (2003) encontraron diferencias significativas en el  $\Psi$  entre diferentes tratamientos de humedad.

#### Edad de hojas

Cuando se aplicaron los tratamientos de humedad, las diferentes hojas de una planta tenían diferente grado de desarrollo ontogénico en ambos experimentos. Sin embargo, las hojas jóvenes presentaron la capacidad de mantener su  $\Psi_{hpa}$  similar al de las hojas maduras en todos los muestreos realizados tanto en R como en SR. Esto puede estar relacionado con la inducción de bajos potenciales en tejidos en crecimiento que se presentan tanto durante la noche como bajo buenas condiciones de humedad en el suelo (Martre et al., 1999; Tang y Boyer, 2002).

#### Conclusiones

Se alcanzó el equilibrio en el potencial hídrico entre las diferentes hojas de la planta antes del amanecer en todos los muestreos realizados tanto en condiciones de riego como de suspensión de riego. En este último, el equilibrio en el potencial hídrico entre las hojas se alcanzó a pesar del progreso del déficit de humedad en el suelo, cierta transpiración nocturna, conductancia estomática y déficit de presión de vapor en la atmósfera.

El potencial hídrico de las hojas previo al amanecer no se equilibró con el potencial hídrico correspondiente a la humedad de la masa del suelo en ningún muestreo. Sin embargo, dicho potencial hídrico de la hoja podría ser usado como un indicador de la disponibilidad de agua en el suelo debido a la estrecha relación que guarda con la humedad de la masa del suelo a partir de que ésta es menor a CC. La disponibilidad de agua en el suelo comienza a ser deficitaria cuando el potencial hídrico de las hojas previo al amanecer en SR cae por debajo del valor de R (-0.5 MPa) debido a que la evapotranspiración comienza a disminuir. A partir de ese momento hay necesidad de aplicar un riego para no

afectar procesos tan importantes como la fotosíntesis.

El valor del potencial hídrico de las hojas previo al amanecer constituyó un buen estimador cuantitativo del inicio de la condición de marchitez permanente en la tercera hoja compuesta de la planta de frijol y del estrés hídrico acumulado durante un periodo de déficit hídrico.

#### Agradecimientos

Se agradece al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (Conacyt) el apoyo económico otorgado al primer autor para la realización de sus estudios doctorales.

Recibido: 02/02/2005

Aprobado: 23/06/2005

#### Referencias

- ACOSTA G., J.A. *Bayo Madero y Bayo Los Llanos, nuevas variedades de frijol para el Norte Centro de México*. Durango, México: Instituto Nacional de Investigaciones Agrícolas, Campo Experimental Valle del Guadiana. Folleto Técnico, núm. 1, 1982. 8 pp.
- AMÉGLIO, T. y ARCHER, P. Significance of pre-dawn water potential in heterogeneous soil water content distribution. *Agronomie*. Vol. 16, núm. 8, 1996, pp. 493-503.
- AMÉGLIO, T., ARCHER, P., COHEN, M., VALANCOGNE, C., DAUDET, F.A., DAYAU, S. y CRUIZIAT, P. Significance and limits in the use of predawn leaf water potential for tree irrigation. *Plant and Soil*. Vol. 207, núm. 2, 1999, pp. 155-167.
- BEGG, J.E. y TURNER, N.C. Crop water deficits. *Advances in Agronomy*. Vol. 28, 1976, pp. 161-217.
- BOYER, J.S. *Measuring the water status of plants and soils*. San Diego, Estados Unidos: Academic Press, 1995, 178 pp.
- BRÉDA, N., GRANIER, A., BARATAUD, F. y MOYNE, C. Soil water dynamics in an oak stand. I. Soil moisture, water potentials and water uptake by roots. *Plant and Soil*. Vol. 172, núm. 1, 1995, pp. 17-27.
- CHONÉ, X., VAN LEEUWIN, C., DUBOURDIEU, D. y GAUDILLÈRE, J.P. Stem water potential is a sensitive indicator of grapevine water status. *Annals of Botany*. Vol. 87, núm. 4, 2001, pp. 477-483.
- CIAT (CENTRO INTERNACIONAL DE AGRICULTURA TROPICAL). *Etapas de desarrollo de la planta de frijol común*. Cali, Colombia, 1982, 26 pp.
- DAVIES, W.J. y ZANG, J. Root signals and the regulation of growth and development of plants in drying soil. *Annual Review of Plant Physiology and Plant Molecular Biology*. Vol. 42, 1991, pp. 55-76.
- DONOVAN, L.A., GRISÉ, D.J., WEST, J.B., PAPPERT, R.A., ALDER, N.N. y RICHARDS, J.H. Predawn disequilibrium between plant and soil water potentials in two cold-desert

- shrubs. *Oecologia*. Vol. 120, núm. 2, 1991, pp. 209-217.
- DONOVAN, L.A., LINTON, M.J. y RICHARDS, J.H. Predawn plant water potential does not necessarily equilibrate with soil water potential under well-watered conditions. *Oecologia*. Vol. 129, núm. 3, 2001, pp. 328-335.
- DONOVAN, L.A., RICHARDS, J.H. y LINTON, M.J. Magnitude and mechanisms of disequilibrium between predawn plant and soil water potentials. *Ecology*. Vol. 84, núm. 2, 2003, pp. 463-470.
- DUFF, G.A., MYERS, B.A., WILLIAMS, R.J., EAMUS, D., O'GRADY A. y FORDYCE I.R. Seasonal patterns in soil moisture, vapor pressure deficit, tree canopy cover and pre-dawn water potential in a northern Australian savanna. *Australian Journal of Botany*. Vol. 45, núm. 2, 1997, pp. 211-224.
- EAMUS, D. y PRIOR, L. Ecophysiology of trees of seasonally dry tropics: Comparisons among phenologies. *Advances in Ecological Research*. Vol. 32, 2001, pp. 113-197.
- GALSTON, A.W., DAVIES, P.J. y SATTER, R.L. *The life of the green plant*. 3a. ed. Nueva Jersey: Prentice-Hall, 1980, 153 pp.
- GALVÁN-TOVAR, M., KOHASHI-SHIBATA, J., GARCÍA-ESTEVA, A., YAÑEZ-JIMÉNEZ, P. y RUIZ-POSADAS, L. Déficit hídrico en planta, acumulación de biomasa y área foliar en tres etapas vegetativas en frijol común. *Agricultura Técnica en México*. Vol. 29, núm. 2, 2003, pp. 101-111.
- GARNIER, E. y BERGER, A. The influence of drought on stomatal conductance and water potential of peach trees growing in the field. *Scientia Horticulturae*. Vol. 32, núm. 3-4, 1987, pp. 249-263.
- GOWING, D.J.G., DAVIES, W.J. y JONES, H.G. A positive root-sourced signal as an indicator of soil in apple, *Malus x domestica* Borkh. *Journal of Experimental Botany*. Vol. 41, núm. 233, 1990, pp. 1535-1540.
- HAVRANEK, W.M. y BENECKE, U. The influence of soil moisture on water potential, transpiration and photosynthesis of conifer seedlings. *Plant and Soil*. Vol. 49, núm. 1, 1978, pp. 91-103.
- HINCKLEY, T.M., LASSOIE, J.P. y RUNNING, S.W. Temporal and spatial variations in the water status of forest trees. *Forest Science Monographs*. Núm. 20, 1978, pp. 72.
- JORDAN, W.R. y RITCHIE, J.T. Influence of soil water stress on evaporation, root absorption, and internal water status of cotton. *Plant Physiology*. Vol. 48, núm. 6, 1971, pp. 783-788.
- KNIGHT, R.O. *The plant in relation to water*. Londres: Heinemann Educational Books, 1965, 147 pp.
- KRAMER, P.J. y BOYER, J.S. *Water relations of plants and soils*. California: Academic Press, 1995, 495 pp.
- LAKER, M.C., BOEDT, L.J.J. y HENSLEY, M. *Pre-dawn leaf water potential as an indicator of plant water stress- with special reference to problems encountered under conditions of high evaporative demand*. International conference on measurement of soil and plant water stats. Vol. 2. Centennial of UTAH State University. Estados Unidos, 1987, pp. 25-29.
- LE ROUX, X. y BARIAC, T. Seasonal variations in soil, grass and shrub water status in a West African humid savanna. *Oecologia*. Vol. 113, núm. 4, 1998, pp. 456-466.
- MANSFIELD, T. A. y DAVIES, W.J. Stoma and stomatal mechanisms. *The physiology and biochemistry of drought resistance in plants*. Paleg, L.G. y Aspinall, D. (editores). Sydney: Academic Press, 1981, pp. 315-346.
- MARTRE, P., TRIBOULOT, M.B. y DURAND, J.L. Measurement of a growth-induced water potential gradient in a tall fescue leaves. *New Phytologist*. Vol. 142, núm. 3, 1999, pp. 435-439.
- McELRONE, A.J., SHERALD, J.L. y FORSETH, I.N. Interactive effects of water stress and xylem-limited bacterial infection on the water relations of a host vine. *Journal of Experimental Botany*. Vol. 54, núm. 381, 2003, pp. 419-430.
- MOHR, H. y SCHOPFER, P. *Plant Physiology*. Berlin: Springer-Verlag, 1995, 481 pp.
- NNYAMAH, J.U., BLACK, T.A. y TAN, C.S. Resistance to water uptake in a Douglas fir forest. *Soil Science*. Vol. 126, núm. 2, 1978, pp. 63-76.
- NOBEL, P.S. *Physicochemical and environmental plant physiology*. California: Academic Press, 1999, 474 pp.
- NOBEL, P.S. y CUI, M.Y. Hydraulic conductances of the soil, the root-soil air gap and the root: changes for desert succulents in drying soil. *Journal of Experimental Botany*. Vol. 43, núm. 248, 1992, pp. 319-326.
- ONTIVEROS-CORTÉS, A., KOHASHI-SHIBATA, J., YAÑEZ-JIMÉNEZ, P., ACOSTA-GALLEGOS, J.A., MARTÍNEZ-VILLEGAS, E. y GARCÍA-ESTEVA, A. Bean root growth under different soil drying rates. I. Growth of the primary root. *Annual Report of the Bean Improvement Cooperative*. Vol. 47, 2004, pp. 195-196.
- OR, D. y J.M. WRAITH. Soil water content and water potential relationships. *Handbook of Soil Science*. Sumner, M. (editor). Boca Raton: CRC Press, 2000, pp. A53-A85.
- PASSIOURA, J.B. Soil conditions and plant growth. *Plant Cell and Environment*. Vol. 25, núm. 2, 2002, pp. 311-318.
- PRADO, C.H.B.A., WHENHUI, Z., ROJAS, M.H.C. y SOUZA, G.M. Seasonal leaf gas exchange and water potential in a woody cerrado species community. *Brazilian Journal of Plant Physiology*. Vol. 16, núm. 1, 2004, pp. 7-16.
- PRIOR, L.D., EAMUS, D. y DUFF, G.A. Seasonal and diurnal patterns of carbon assimilation, stomatal conductance, and leaf water potential in *Eucalyptus tetradonta* Samplings in a wet-dry savanna. *Australian Journal of Botany*. Vol. 45, núm. 2, 1997, pp. 241-258.
- RICHTER, H. Water relations of plants in the field: some comments on the measurement of selected parameters. *Journal of Experimental Botany*. 1997. Vol. 48. núm. 306. pp. 1-7.
- RITCHIE, G.A. y HINCKLEY, T.M. The pressure chamber as an instrument for ecological research. *Advances in Ecological Research*. Vol. 9, 1975, pp. 165-254.

- SALA, O.E., LAUENROTH, W.K., PARTON, W.J. y TRLICA, M.J. Water status of soil and vegetation in a shortgrass steppe. *Oecologia*. Vol. 48, núm. 3, 1981, pp. 327-331.
- SAS (SAS INSTITUTE INC). *The SAS System release 8.2 for windows*. Cary, Estados Unidos: SAS Institute. 2001.
- SCHOLANDER, P.F., HAMMEL, H.J., BRADSTREET, D. y HEMMINGSEN, E.A. Sap pressure in vascular plants. *Science*. Vol. 148, núm. 2, 1965, pp. 339-346.
- SELLIN, A. Base water potential of *Picea abies* as a characteristic of the soil water status. *Plant and Soil*. Vol. 184, núm. 2, 1996, pp. 273-280.
- SELLIN, A. Does pre-dawn water potential reflect conditions of equilibrium in plant and soil water status? *Acta Oecologica*. Vol. 20, núm. 1, 1999, pp. 51-59.
- SHARP, R.E. y DAVIES, W.J. Regulation of growth and development of plants growing with a restricted supply of water. *Plants under stress. Biochemistry, physiology and ecology and their application to plant improvement*. Jones H.G., Flowers T.J. y Jones M.B. (editores). Society for Experimental Biology Seminar Series 39. Cambridge University Press, 1993, pp. 71-93.
- SINGH, S.P., GEPTS, P. y DEBOUCK, D.G. Races of common bean (*Phaseolus vulgaris*, Fabaceae). *Economic Botany*. Vol. 45, núm. 3, 1991, pp. 379-396.
- SLATYER, R.O. *Plant water relationships*. Londres: Academic Press, 1967, 366 pp.
- SNYDER, K.A., RICHARDS, J.H. y DONOVAN, L.A. Night-time conductance in C<sub>3</sub> and C<sub>4</sub> species: do plants lose water at night? *Journal of Experimental Botany*. Vol. 54, núm. 383, 2003, pp. 861-865.
- TANG, A. C. y BOYER, J. S. Growth-induced water potentials and the growth of maize leaves. *Journal of Experimental Botany*. Vol. 53, núm. 368, 2002, pp. 489-503.
- TARDIEU, F y KATERJI, N. Plant response to the soil water reserve. Consequences of the root system environment. *Irrigation Sciences*. Vol. 12, núm. 3, 1991, pp. 145-152.
- TARDIEU, F, ZHANG, J., KATERJI, N., BETHENOD, O., PALMER, S. y DAVIES, J. Xylem ABA controls the stomatal conductance of field-grown maize subjected to soil compaction or soil drying. *Plant, cell and environment*. Vol. 15, núm. 2, 1992, pp. 193-197.
- WANG, E. y SMITH, C.J. Modelling the growth and water uptake function of plant root systems: a review. *Australian Journal of Agricultural Research*. Vol. 55, núm. 5, 2004, pp. 501-523.

#### Abstract

GALVÁN-TOVAR, M., KOHASHI-SHIBATA, J., LÓPEZ-CASTAÑEDA, C., ACOSTA-GALLEGOS, J.A., MARTÍNEZ-GARZA, A.† & GARCÍA-ESTEVA, A. Predawn water potential equilibrium of leaves in common bean under soil water deficit. Hydraulic engineering in Mexico (in Spanish). Vol. XXI, no. 2, April-June, 2006, pp. 69-81.

The objective of the present study was to determine whether a predawn water potential equilibrium could be reached in all leaves of bean (*Phaseolus vulgaris* L.) under soil water deficit. The plants were grown in a greenhouse in pots with sandy-silt soil. These pots were subjected to withholding-watering (WW) and normal watering (NW) treatments. Predawn leaf water potential ( $\Psi_{lp}$ ) in leaves of the main stem, evapotranspiration and transpiration, stomatal conductance, progress of the permanent wilting condition (PWC) of leaves at different levels of the main stem, soil water percentage and vapor pressure deficit (VPD) were registered. Leaf water potential equilibrium among leaves was reached at predawn (from 4:30 to 6:30 h) in WW and NW, notwithstanding some degree of evapotranspiration, transpiration, stomatal conductance and VPD during the night period. The  $\Psi_{lp}$  was highly influenced by soil water content. Since a close relationship was found between  $\Psi_{lp}$  and soil water content,  $\Psi_{lp}$  might be employed as an indicator of the soil water availability. In WW, when the  $\Psi_{lp}$  was reduced from -0.5 to -1.1 MPa, the rates of evapotranspiration and transpiration were minimum, indicating the onset of deficit of available soil water. The experiment was ended the date of the onset of the PWC of the third compound leaf which coincided with the value -1.5 MPa of the  $\Psi_{lp}$ . Thus,  $\Psi_{lp}$  is a good quantitative parameter for evaluating the accumulated water stress of the plant.

**Keywords:** *Phaseolus vulgaris*, predawn leaf water potential equilibrium, transpiration, evapotranspiration, soil moisture, water deficit, permanent wilting percentage, permanent wilting condition.

#### Dirección institucional de los autores:

M. en C. Marcos Galván-Tovar  
Dr. Josué Kohashi-Shibata  
Dr. Cándido López-Castañeda  
M. en C. Antonio García-Esteva

Colegio de Postgraduados,  
Km. 36.5, Carretera México-Texcoco,  
Montecillo, Estado de México, C.P. 56230,  
teléfono: +(52) (595) 9520 200, ext. 1318,  
fax: +(52) (595) 9520 247,  
mgalvant@yahoo.com,  
jkohashi@colpos.mx,  
clc@colpos.mx,  
esteva@colpos.mx

Dr. Jorge Alberto Acosta-Gallegos

Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias,  
Campo Experimental Bajío,  
Celaya, Guanajuato, C.P. 38000,  
Apartado Postal 112,  
teléfono: +(52) (461) 611 5323,  
fax: +(52) (461) 611 5431,  
jamk@prodigy.net.mx