

## RESPUESTA DEL PIMIENTO MORRÓN AL SECADO PARCIAL DE LA RAÍZ EN HIDROPONIA E INVERNADERO\*

### RESPONSE OF SWEET PEPPER TO PARTIAL ROOT DRYING IN HYDROPONIC AND GREENHOUSE

Juan Antonio Chamú-Baranda<sup>1§</sup>, Anselmo López-Ordaz<sup>2</sup>, Carlos Ramírez-Ayala<sup>1</sup>, Carlos Trejo-López<sup>2</sup> y Enrique Martínez-Villegas<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Posgrado en Hidrociencias. Colegio de Postgraduados. Carretera México-Texcoco, km 36.5. Montecillo, Texcoco, Estado de México. C. P. 56230. Tel. 01 595 9520200. Ext. 1172. (cara@colpos.mx). <sup>2</sup>Posgrado en Botánica. Colegio de Postgraduados. Tel. 01 595 9520200. Ext. 1313 y 1318. (anselmol@colpos.mx), (catre@colpos.mx), (enriquem@colpos.mx). <sup>§</sup>Autor para correspondencia: chamu.juan@colpos.mx.

#### RESUMEN

La presente investigación, se realizó con el objetivo de evaluar el efecto de dos niveles de humedad residual en el sustrato, bajo la técnica de secado parcial de la raíz sobre el crecimiento, rendimiento, relaciones hídricas e intercambio de gases de plantas de pimiento morrón (*Capsicum annuum* L.) Cannon F<sub>1</sub>. El experimento se estableció en 2009, en el *Campus* Montecillo del Colegio de Postgraduados en Ciencias Agrícolas, México. Los tratamientos se distribuyeron bajo un diseño completamente al azar con cuatro repeticiones y fueron: 1) SPR80-80, con raíz dividida, y humedad residual del sustrato en ambos recipientes  $\geq 80\%$ ; 2) SPR80-30, con raíz dividida, y humedad residual del sustrato en uno de los recipientes  $\geq 80\%$  y el otro  $\geq 30\%$  con ciclos de alternancia; y 3) testigo, con sistema radical completo, y humedad residual del sustrato  $\geq 80\%$ . La fertilización se realizó a través del sistema de riego por goteo, con solución nutritiva de Steiner (1984) a un potencial osmótico de -0.046 MPa. Durante el periodo experimental, se midieron variables relacionadas con el crecimiento, rendimiento, relaciones hídricas, intercambio de gases y calidad del fruto sometiéndose al análisis de varianza y prueba de Tukey al 5% de probabilidad. Los resultados obtenidos muestran que las plantas bajo SPR80-

#### ABSTRACT

This study was carried out with the purpose of evaluating the effect of two levels of residual humidity on the substrate, using the technique of partially drying the root, on growth, yield, water relations and gas exchange for sweet pepper plants (*Capsicum annuum* L.) Cannon F<sub>1</sub>. The experiment was carried out in 2009, in the Montecillo *Campus* of the Colegio de Postgraduados en Ciencias Agrícolas, Mexico. Treatments were distributed under a design completely at random, with four repetitions as follows: 1) SPR80-80, with a split root and residual humidity of the substrate in both containers  $\geq 80\%$ ; 2) SPR80-30, with a split root and residual humidity of the substrate in one of the containers  $\geq 80\%$  and the other  $\geq 30\%$  with alternance cycles; and 3) control, with a complete root system, and a residual humidity of the substrate  $\geq 80\%$ . Fertilization was performed through drip irrigation, with Steiner solution (1984) at an osmotic potential of -0.046 MPa. During the experimental period, variables related to growth, yield, water relations, gas exchange and fruit quality were measured, undergoing variance analysis and the Tukey test at 5% probability. Results show that plants under

\* Recibido: agosto de 2010  
Aceptado: febrero de 2011

30, tuvieron una eficiencia en el uso del agua y fertilizantes 24% mayor, que el tratamiento testigo, además de aumentar los sólidos solubles totales sin alterar significativamente el crecimiento y rendimiento de las plantas.

**Palabras clave:** *Capsicum annuum* L., eficiencia en el uso del agua, intercambio de gases, relaciones hídricas, sistema de raíz dividida.

## INTRODUCCIÓN

El 85% del agua dulce del mundo (186.7 millones de m<sup>3</sup>) se usa en el riego de tierras agrícolas (Van Schilfhaarde, 1994). Siendo la agricultura el mayor usuario de agua, la escasez y mala distribución de este recurso es un factor que limita la producción mundial (Postel, 1998) y como consecuencia existen grandes áreas terrestres sujetas a periodos de sequía, las cuales podrían aumentar como resultado del cambio climático global (Solomon y Cramer, 1993; Petit *et al.*, 1999). En México las prácticas de riego pueden afectar el ambiente debido al consumo de las reservas acuíferas superficiales y subterráneas, como en la zona norte del país y el Valle de México (CNA, 2005). Debido a lo expuesto anteriormente, es necesario desarrollar y adoptar prácticas con altos niveles de eficiencia en el uso del agua (Debaeke y Aboudrare, 2004).

Al analizar la reacción de las plantas al déficit hídrico, lo primero que se observa es el cierre de los estomas, mecanismo aparentemente simple y destinado sólo a evitar la caída del potencial hídrico, pero que engloba una serie de ajustes fisiológicos y metabólicos colaterales que incluyen, entre otros, la disminución de la fotosíntesis y alteraciones en el transporte y distribución de fotosintatos, hechos que tienen trascendencia significativa en el funcionamiento normal de la planta (Hanson y Hitz, 1982; Bohnert *et al.*, 1995).

Las raíces reconocen cambios pequeños de humedad en el suelo, los que activan una serie de señales químicas (Davies y Zhang, 1991), como la producción de ácido abscísico (ABA) que son transportadas a través del sistema vascular y por algún mecanismo, aún desconocido, regulan el crecimiento e intercambio de gases del vástago; los cuales son procesos fundamentales para regular la pérdida de agua por transpiración a través de estomas (Gowing *et al.*, 1990; Khalil y Grace, 1993; Davies *et al.*, 2002). En torno a este panorama, se ha encontrado que mediante cambios en las

PDR80-30 were 24% more water and fertilizer efficient than the control treatment, and increased soluble solids without altering the growth and of the plants in a significant manner.

**Key words:** *Capsicum annuum* L., gas exchange, split root system, water efficiency, water relations.

## INTRODUCTION

Eighty five percent of the world's fresh water (186.7 million m<sup>3</sup>) is used to irrigate fields (Van Schilfhaarde, 1994). Because agriculture is the largest user of water, scarcity and improper distribution of this resource is a factor that limits world food production (Postel, 1998), and consequently, large areas in the world are vulnerable to periods of drought, which could increase as a result of global climate change (Solomon and Cramer, 1993; Petit *et al.*, 1999). In Mexico, irrigation practices can affect the environment due to the use of surface and underground, such as in the north of the country and in the Valley of Mexico (CNA, 2005). Consequently, it is necessary to develop and adopt highly efficient practices in water use (Debaeke and Aboudrare, 2004).

When analyzing the reaction of plants to water scarcity, the first fact that stands out is the closing of the stomata, which is a seemingly simple mechanism, with the sole purpose of avoiding a reduction in hydric potential, but includes a series of physiological and metabolic collateral adjustments, that include, amongst others the reduction of photosynthesis and alterations in the transportation and distribution of photosynthates, which have a significant relevance in the plant's normal functions (Hanson and Hitz, 1982; Bohnert *et al.*, 1995).

Roots recognize small changes in the humidity of the soil, which activate a series of chemical signals (Davies and Zhang, 1991), such as the production of abscisic acid (ABA), which are carried through the vascular system and by a still unknown mechanism, regulate the growth and exchange of gases of the shoot. These are crucial processes for the regulation of water loss by transpiration through the stomata (Gowing *et al.*, 1990; Khalil and Grace, 1993; Davies *et al.*, 2002). Given this outlook, it has been found that by changes in the

técnicas de riego, es posible manipular la conductancia estomática y mejorar la eficiencia del uso del agua (Loveys *et al.*, 2000).

A través de varias investigaciones se ha encontrado que el déficit hídrico regulado (DHR) y el secado parcial de la raíz (SPR), son dos técnicas de riego que permiten un ahorro significativo de agua. El DHR involucra aplicar menos agua al cultivo que la evapotranspiración (ET). En contraste, el SPR consiste en que la mitad del sistema radical (SR) sea regada, mientras que simultáneamente el riego es suspendido en la otra mitad del sistema hasta cierto nivel de abatimiento de agua en el suelo; al siguiente riego, éste se aplica al lado del SR en proceso de secado y así sucesivamente, durante toda la estación de crecimiento del cultivo (Loveys *et al.*, 2000; Stoll *et al.*, 2000; Kang *et al.*, 2001). Con esta técnica se pretende ahorrar 50% del agua que se aplicaría al tomar como referencia la ET, o el estado del agua en el suelo.

Al optimizar el sistema, el comportamiento estomático, el estado hídrico del vástago y el crecimiento foliar pueden ser regulados reflejando finalmente un incremento significativo en la eficiencia en el uso del agua (EUA) (Davies *et al.*, 2002). Se estima que el SPR podría mantener el rendimiento similar a plantas bien regadas (Loveys *et al.*, 2000). Basado en que el potencial hídrico de plantas bajo SPR se equilibra con la parte de la rizósfera que se encuentra en el suelo húmedo (Hsiao, 1990) y por lo tanto, sea similar a plantas con riego completo.

El SPR ha sido utilizada por muchos investigadores en el mundo, con resultados positivos en diversos cultivares; por ejemplo, en peral, esta técnica mejoró tanto la EUA como el rendimiento (Kang *et al.*, 2002); en tanto que en durazno, el SPR y riego comercial produjeron el mismo rendimiento y calidad de fruto (Goldhamer *et al.*, 2002). Sin embargo, en algunas investigaciones se ha encontrado que uno de los problemas relacionados con SPR en tomate, es el desarrollo de pudrición apical del fruto (Adams y Ho, 1992; Obreza *et al.*, 1996). Estos mismos autores llegaron a la conclusión que este desorden fisiológico, se induce probablemente por un lento transporte de calcio y su baja acumulación en la parte distal del fruto (Bangerth, 1979).

Con base a lo anterior, se nota que no todos los cultivos responden de manera similar al uso del secado parcial de la raíz; por tal razón, es necesario validar esta tecnología en una amplia gama de cultivares, para conocer las respuestas específicas para cada genotipo y ambiente en que se desarrollen.

irrigation techniques, it is possible to manipulate stomatic conductance and improve the efficiency of water use (Loveys *et al.*, 2000).

In the course of several investigations it has been found that the regulated water deficit (DHR) and the partial drying of the root (SPR), are two irrigation techniques that help save water significantly. DHR involves applying less water to the crop than evapotranspiration (ET). In contrast, SPR consists of irrigating half of the radicle system (SR), while suspending irrigation on the other half of the system until water drops to a certain level. The next time, the side of the SR in process of drying is irrigated, and so on, until the end of the crop's growth season (Loveys *et al.*, 2000; Stoll *et al.*, 2000; Kang *et al.*, 2001). The purpose of this technique is to save 50% of the water that would be applied when taking ET or the state of the water in the soil, as a reference.

When optimizing the system, stomatic behavior, the hydric status of the shoot and foliar growth may be regulated, to finally reflect a significant increase in the water use efficiency (EUA) (Davies *et al.*, 2002). It is estimated that the SPR could maintain a similar yield to those for well-watered plants (Loveys *et al.*, 2000). This is based on the water potential of plants under SPR balancing with the part of the rhizosphere found in the humid soil (Hsiao, 1990) and therefore, being similar to plants under full irrigation.

SPR has been used by many researchers worldwide, with positive results in diverse cultivars; for example, in pear trees, this technique improved both EUA and yield (Kang *et al.*, 2002), whereas in peach trees, SPR and commercial irrigation produced the same yield and fruit quality (Goldhamer *et al.*, 2002). However, studies have found that one of the problems related to SPR in tomato is the apical rotting of the fruit (Adams and Ho, 1992; Obreza *et al.*, 1996). These authors have concluded that this physiological disorder may be induced by a slow calcium transport and its low accumulation in the distal part of the fruit (Bangerth, 1979).

Based on this, it is evident that not all cultivations respond in similar ways to the partial root drying, which is why this technology must be validated in a wide array of cultivars to know the specific responses for each genotype and environment in which they are developed.

## MATERIALES Y MÉTODOS

El experimento se llevó a cabo en condiciones de hidroponía e invernadero, ubicado en el *Campus* Montecillo del Colegio de Postgraduados en Ciencias Agrícolas, México, a 2 250 msnm, 19° 21' latitud norte y 98° 54' longitud oeste, en el ciclo verano-otoño de 2009.

### Material vegetal

Se utilizaron plantas provenientes de semilla de chile morrón (*Capsicum annuum* L.) Cannon F<sub>1</sub>, de crecimiento indeterminado, trasplantadas el 28 de abril de 2008; poda de rejuvenecimiento el 27 de mayo de 2009; inicio de los tratamientos el 01 de octubre de 2009 y final del experimento el 15 de noviembre del mismo año.

### Manejo del experimento

Durante el trasplante para los tratamientos con SPR, la raíz se dividió longitudinalmente en dos partes iguales con una navaja de un sólo filo, desde arriba del cuello de la raíz hasta su ápice. Posteriormente, cada sección de la raíz de cada planta se trasplantó en dos bolsas de plástico de 25\*30 cm, una para cada sección de la raíz. Esto nos permitió manejar condiciones de humedad distintas entre los compartimentos.

Un grupo de plantas se mantuvo con el sistema radical completo, las cuales fueron consideradas como plantas testigo, y trasplantadas en una bolsa plástica de 50\*60 cm. Se establecieron 3.2 plantas m<sup>-2</sup>, cada planta bajo el SPR y el testigo creció en un volumen de roca volcánica porosa (tezontle) de 18 L con el 90% de su granulometría  $\geq 2$  mm y 10% restante entre 0.84 y 0.074 mm,  $\rho_a = 0.97$  g cm<sup>-3</sup>, retención de humedad de 2.2 L. Las plantas fueron podadas a una altura de 60 cm aproximadamente y se dirigieron a tres tallos, en donde se realizaron podas de hojas senescentes y yemas vegetativas axilares cada 8 días para mantenerlas en óptimas condiciones.

Al inicio del amarre del primer fruto (27 de julio de 2009), las plantas fueron sostenidas con hilo rafia atada a alambres colocados en la parte superior y a lo largo de la hilera de plantas. Desde la antesis de las primeras flores, las plantas se movieron para favorecer la polinización aproximadamente a las 13 h de cada día. La prevención y control de plagas y enfermedades se realizó aplicando aspersiones de productos químicos disponibles en el mercado.

## MATERIALS AND METHODS

The experiment was carried out conditions of hydroponics and in a greenhouse located in the Montecillo *Campus* of the Colegio de Postgraduados in Ciencias Agrícolas, Mexico, at 2 250 masl, 19° 21' Latitude North and 98° 54' Longitude West, in the 2009 summer-autumn cycle.

### Plant material

Sweet pepper (*Capsicum annuum* L.) plants were used Cannon F<sub>1</sub>, of undetermined growth, grafted on April 28<sup>th</sup>. 2008; rejuvenating trim: May 27<sup>th</sup>. 2009; start of treatments: October 1<sup>st</sup>. 2009; end of experiment: November 15<sup>th</sup>. 2009.

### Management of the experiment

During the transplant of the treatments with SPR, the root was split longitudinally into two equal parts using a single-bladed scalpel, from the top of the neck of the root to its apex. Each section of the root was then transplanted in two plastic bags measuring 25\*30 cm, one for each section of the root. This helped us manage different humidity conditions between compartments.

A group of plants kept its complete radicle system, and were considered control plants. They were then transplanted in a 50\*60 cm plastic bag; 3.2 plants were planted m<sup>-2</sup>, each one under SPR, and the control grew in a volume of porous volcanic rock (tezontle) of 18 L with 90% of its granulometry  $\geq 2$  mm and the remaining 10%, between 0.84 and 0.074 mm,  $\rho_a = 0.97$  g cm<sup>-3</sup>, with a humidity retention of 2.2 L. Plants were trimmed at an approximate height of 60 cm and were aimed at three shoots, where old leaves were trimmed, along with axillary leaf buds every eight days to keep them in optimal conditions.

At the beginning of the first fruit settlement (July 27<sup>th</sup>. 2009), plants were held with ramie yarn, tied to wires on the top and along the row of plants. From the anthesis of the first flowers, the plants were moved to favor pollination at approximately 13 h every day. Plague and disease prevention and control was performed by spraying chemical products, available in the market.

Irrigation was by dripping on each individual plant, using two emitters placed on each of the two compartments with roots on plants under SPR, and two emitters on plants with

El riego se realizó por goteo a cada planta, mediante dos emisores colocado sobre cada uno de los dos compartimentos con raíz en las plantas bajo SPR, y dos emisores en las plantas con el sistema radical completo (testigo); los emisores se colocaron cerca del tallo con un gasto de 4 y 8 L h<sup>-1</sup> para plantas bajo SPR y testigo, respectivamente. Al inicio, las plantas se regaron a capacidad de campo, para permitir su establecimiento. Desde la poda de rejuvenecimiento hasta el final del experimento, la fertilización se realizó con una solución nutritiva universal de Steiner (1984), con un potencial osmótico de -0.046 MPa aplicada continuamente al agua de riego.

### **Contenido de humedad y aplicación de los tratamientos de humedad residual en el sustrato**

Durante el periodo experimental se midió diariamente el contenido de agua del sustrato (ocho plantas por tratamiento), utilizándose un reflectómetro de tiempo (Field Scout TDR 300 probe, model 6430FS, Spectrum® Technologies, Inc.). En este sistema el contenido de agua se deriva indirectamente de la medición del tiempo que tarda en viajar un pulso de energía electromagnética en el suelo (Parchomchuk *et al.*, 1997).

Los valores obtenidos se convirtieron a un contenido de humedad ( $\theta_v$ ), mediante los valores de calibración realizada para el sustrato utilizado (tezontle). El concepto de secado parcial de la raíz, involucra aplicar agua a la mitad del sistema radical mientras que la otra mitad es expuesta a un abatimiento de la humedad del suelo previamente establecido. Al siguiente turno, el riego se cambió hacia la parte de la raíz (suelo) que se dejó secar y así sucesivamente durante el desarrollo del cultivo (Stoll *et al.*, 2000).

Este fue el caso durante el proceso de esta investigación para el tratamiento SPR80-30, en donde por periodos de 15 días a la mitad del sistema radical de las plantas se le permitió llegar a 30% de humedad aprovechable residual (HAR), mientras que la otra mitad se mantuvo a 80% de la HAR (Figura 1a), a los 15 días siguientes los niveles de HAR se alternaron y así sucesivamente. Para poder mantener el nivel de 30% HAR a la mitad del sistema radical de las plantas, se estimó diariamente el contenido de humedad del sustrato de cuatro plantas por tratamiento con el reflectómetro (TDR), para conocer el porcentaje de humedad aprovechable que contenía el sustrato y aproximadamente cada tercer día se llegó a tal abatimiento y fue entonces que se dio riego, mientras que para el lado con 80% de HAR los riegos fueron

complete root systems (control); emitters were placed near the stem, with a use of 4 and 8 L h<sup>-1</sup> for plants under SPR and control. Initially, plants were irrigated at field capacity, to allow their establishment. From the rejuvenation trimming up to the end of the experiment, fertilization was carried using Steiner's universal nutrition solution (1984), with an osmotic potential of -0.046 MPa applied continuously to the irrigation water.

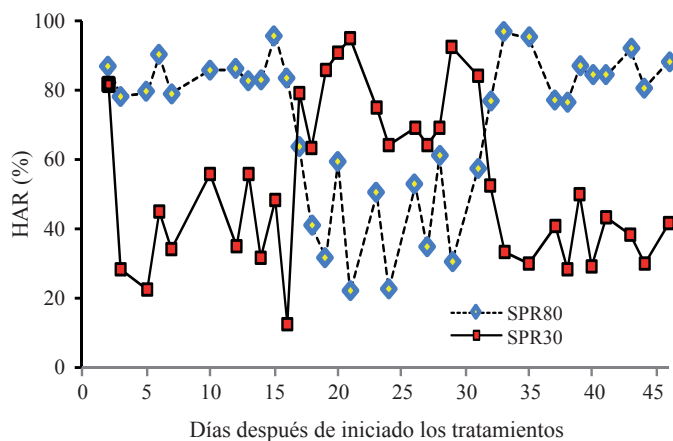
### **Humidity content and application of the residual humidity treatments in the substrate**

During the experimental period, the substrate water content was measured (eight plants per treatment), using a time reflectometer (Field Scout TDR 300 probe, model 6430FS, Spectrum® Technologies, Inc.). In this system, the water content derives indirectly from the measurement of time taken for an energy pulse of electromagnetic energy to travel in the soil (Parchomchuk *et al.*, 1997).

The values obtained were converted to a humidity content ( $\theta_v$ ), using the values of calibration performed for the substrate used (tezontle). The concept of the partial drying of the root involves applying water to half of the root system, while the other half is exposed to a previously established decrease in the soil humidity. At the next shift, the irrigation was changed to the part of the root (soil) that was dried, and so on, during the development cycle of the crop (Stoll *et al.*, 2000).

This was the case during the research process for treatment SPR80-30, in which, for 15 day periods, half of the radicle systems of plants were allowed to reach 30% of the residual usable humidity (HAR), while the other half was kept at 80% HAR (Figure 1a), and during the following 15 days, HAR levels were altered, and so on. To maintain the level of 30% HAR in half of the radicle system, the humidity content of the substrate of four plants was calculated per treatment with the reflectometer (TDR), in order to obtain the percentage of usable humidity contained by the substrate, and approximately every third day, such a reduction in water was reached. It was then that irrigation took place, while irrigation was on a daily basis for the side with 80% HAR, depending on the existing weather conditions. The roots of plants of the other two treatments, SPR80-80 and the control, during the experimental period, increased to a level of 80% HAR (Figure 1b); for this purpose, substrates were irrigated on a daily basis.

diariamente, según las condiciones ambientales existentes. Para las plantas de los otros dos tratamientos, SPR80-80 y testigo, durante el periodo experimental, sus raíces crecieron a un nivel de HAR 80% (Figura 1b) para ello, los riegos se aplicaron diariamente al sustrato.



**Figura 1. Humedad aprovechable residual (HAR) en el sustrato, a) crecimiento de raíces de las plantas bajo SPR80-30 alternado cada 15 días; y b) SPR80-80 y testigo.**

**Figure 1. Residual usable humidity (HAR) in the substrate, a) growth of roots of plants under SPR80-30 alternated every 15 days; and b) SPR80-80 and control.**

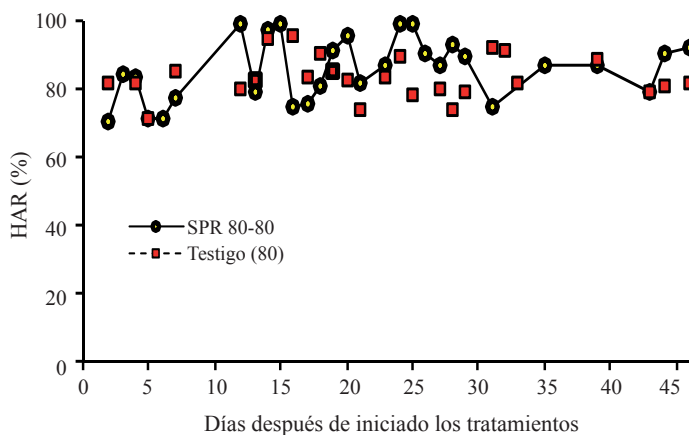
### Tratamientos y diseño experimental

Se establecieron tres tratamientos de HAR (Figura 2) en el sustrato: 1) SPR80-80 con raíz dividida, en donde se dejó que la HAR del sustrato en ambos recipientes llegara al 80% para aplicar el riego; 2) SPR80-30 con raíz dividida, en donde se dejó que la HAR del sustrato en uno de los recipientes llegara al 80% y el otro al 30% para aplicar el riego, 15 días después el riego se invirtió permitiendo que el lado con déficit de humedad recibiera riego y el otro lado comenzara a secarse y así sucesivamente; y 3) testigo 80% con el sistema radical completo, donde se permitió que la HAR del sustrato llegara hasta 80% y entonces se le aplicó riego.

Los niveles de HAR fijados fueron obtenidos de la relación entre lecturas de humedad del sustrato y contenido de humedad conocidos. Se utilizó un diseño experimental completamente al azar con cuatro repeticiones. Cada planta consistió en una unidad experimental.

### Treatments and experimental design

Three treatments were established for HAR (Figure 2) in the substrate: 1) SPR80-80 with a split root, in which the HAR of the substrate in both containers was allowed

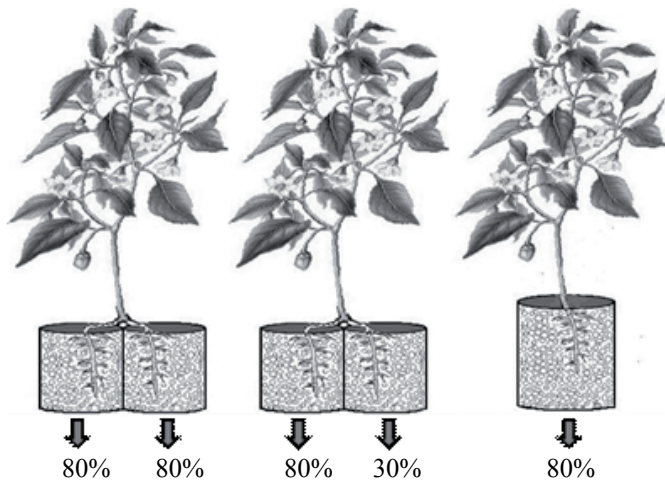


to reach 80% to irrigate; 2) SPR80-30 with a split root, in which the HAR of the substrate in both containers was allowed to reach 80%, and the other at 30% to irrigate. Fifteen days later, irrigation was reverted, allowing the side with a humidity deficit to receive water and the other side to begin drying, and so on; and 3) control 80% with a complete root system, in which the HAR of the substrate was allowed to reach 80% and was then irrigated.

The fixed levels of HAR were calculated from the relation between readings of the known humidity of the substrate and humidity content. A complete random experimental design was used, with four repetitions. Each plant consisted of one experimental unit.

### Water relations

The total water potential of the leaf ( $\Psi_{leaf}$ ), was determined in the youngest and most expanded leaves of four plants per treatment, using a Scholander (Soil



**Figura 2. Tratamientos de humedad aprovechable residual en el sustrato con raíz dividida (80-80%; 80-30%) y tradicional (80%).**

**Figure 2. Treatments of usable residual humidity in the substrate with split roots (80-80%; 80-30%) and traditional (80%).**

### Relaciones hídricas

El potencial de agua total de la hoja ( $\Psi_{\text{hoja}}$ ), se determinó en la hoja más joven y completamente expandida de cuatro plantas por tratamiento, con una bomba de presión tipo Scholander (Soil Moisture Equipment Corp., Santa Bárbara, California, USA). Para ello la hoja se separó de la planta e inmediatamente se introdujo en la cámara de medición de presión, dejando un segmento de peciolo fuera, posteriormente se aplicó lentamente presión neumática, generada con gas nitrógeno, hasta observarse en el corte del peciolo fuera de la cámara, la primera gota de savia de los haces vasculares indicó el balance de presión; en ese momento se tomó la lectura del manómetro y se expresó en MPa. Las determinaciones se realizaron entre las 12:00 y 12:40 h.

### Intercambio de gases

La tasa de asimilación de  $\text{CO}_2$  (A) en  $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ , la conductancia estomática ( $g_s$ ) en  $\text{mmol m}^{-2} \text{s}^{-1}$  y la tasa transpiratoria (E) en  $\text{mmol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ; se midieron en  $2.5 \text{ cm}^2$  de área foliar en la hoja más joven y completamente expandida de cuatro plantas por tratamiento, entre las 12:45 y 13:00 h, las medidas se realizaron *in situ* a los 46 días después de iniciado los tratamientos (DDIT) con un sistema abierto y portátil de análisis de gases en el espectro infrarrojo (CIRAS-1, PP-SYSTEMS). Las lecturas se tomaron cuando

Moisture Equipment Corp., Santa Bárbara, California, USA) pressure pump. For this purpose, the leaves were separated from the plants and immediately introduced in the chamber for the measurement of pressure, leaving a section of the petiole outside. Later, pneumatic pressure was slowly applied, generated with nitrogen gas, until, in the section of the petiole outside the chamber, the first drop of sap was observed, indicating the pressure balance. At that moment, a reading was taken from the manometer and expressed in MPa. The determinations were carried out between 12:00 and 12:40 h.

### Gas exchange

The  $\text{CO}_2$  assimilation rate (A) in  $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ , stomatic conductance ( $g_s$ ) in  $\text{mmol m}^{-2} \text{s}^{-1}$  and the rate of transpiration (E) in  $\text{mmol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ , were measured in  $2.5 \text{ cm}^2$  of the foliar area in the youngest and most expanded leaves from four plants per treatment, between 12:45 and 13:00 h: Measurements were taken *in situ* 46 days after starting the treatments (DDIT) with an open and portable gas analysis system in the infrared spectrum (CIRAS-1, PP-SYSTEMS). Readings were taken when the flow of  $\text{CO}_2$  was stable to 360 ppm inside the measuring chamber. The temperature in the measuring chamber was  $22.5^\circ\text{C}$ . The photosynthetically active radiation varied between 432 and  $461 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ , during the first and last reading. The gas exchange was determined in neighboring leaves used in the determination of  $\Psi_{\text{leaf}}$ .

### Área foliar y distribución de la materia fresca y seca

At 46 DDIT, four plants per treatment were cut from the neck of the root and separated into different organs (root, stem, leaf and fruit). In order to find the distribution of fresh matter, they were weighed in an Esnova TH-11 electronic scale with a 1g precision. The foliar area of the detached leaves was determined using a foliar area integrator (LI-COR, Inc. Lincoln, Nebraska USA, Model LI-3100) expressed in  $\text{m}^2$  per plant. Para conocer la materia seca de los diferentes órganos, éstos se secaron en una estufa con aire forzado a  $70^\circ\text{C}$  hasta peso constante y se pesaron en una balanza electrónica.

### Fruit quality

The harvest of fruits was carried out during physiological ripeness, where five fruits were chosen per treatment and their firmness was established (kg f), along with the content

el flujo de CO<sub>2</sub> era estable en 360 ppm dentro de la cámara de medición. La temperatura en la cámara de medición fue de 22.5 °C. La radiación fotosintéticamente activa varió desde 432 hasta 461 μmol m<sup>-2</sup> s<sup>-1</sup>, durante la primera lectura y la última. La determinación del intercambio gaseoso se hizo en hojas vecinas a las usadas en la determinación del Ψ<sub>hoja</sub>.

### Área foliar y distribución de la materia fresca y seca

A los 46 DDIT, cuatro plantas por tratamiento fueron cortadas desde el cuello de la raíz y se separaron en sus diferentes órganos (raíz, tallo, hoja y fruto), para conocer la distribución de la materia fresca, éstos se pesaron en una balanza electrónica con precisión de 1g marca Esnova modelo TH-11. A las hojas desprendidas se les determinó su área foliar con un integrador de área foliar (LI-COR, Inc. Lincoln, Nebraska USA, Modelo LI-3100) expresándose en m<sup>2</sup> por planta. Para conocer la materia seca de los diferentes órganos, éstos se secaron en una estufa con aire forzado a 70 °C hasta peso constante y se pesaron en una balanza electrónica.

### Calidad del fruto

La cosecha de los frutos se realizó a la madurez fisiológica seleccionándose cinco frutos por tratamiento y se determinó su firmeza (kg f), contenido de sólidos solubles (°Brix) y pH, a los 46 DDIT. La firmeza de cada fruto se determinó en dos sitios opuestos de la parte media de cada fruto, con un penetrómetro equipado con un puntal cónico de 0.8 mm de diámetro con escala de 0.1 hasta 32% de fuerza. Los sólidos solubles totales se determinaron con un refractómetro digital, marca ATAGO, con escala de 0 hasta 32%, siguiendo la metodología propuesta por la AOAC (1990). Para la determinación del pH, se trituraron 10 g de pulpa con 50 mL de agua destilada, se filtró para eliminar los restos de tejido vegetal, y en una alícuota de 20 mL se determinó el pH con un potenciómetro.

### Eficiencia en el uso del agua

La eficiencia del uso del agua (EUA), se calculó con base en la producción de materia fresca y seca del fruto y total por planta y el agua evapotranspirada de acuerdo con la siguiente relación.

$$EUA = \frac{\text{gramo de materia seca de fruto o total por planta}}{\text{gramo de agua evapotranspirada}}$$

of soluble solids (°Bx) and pH, at 46 DDIT. The firmness of each fruit was determined in two opposite sides of the middle section of each fruit, using a penetrometer with a 0.8 mm in diameter conical tip with a scale of 0.1 to 32% strength. The total soluble solids were measured using a digital ATAGO refractometer, with a scale of 0 to 32%, following the methodology suggested by AOAC (1990). To measure the pH, 10 g of pulp were crushed with 50 mL of distilled water, the remains of plant tissue were filtered away, and the pH was measured using a potentiometer in a 20 mL aliquot.

### Water use efficiency

The water use efficiency (EUA) was calculated based on the production of fresh and dry matter of the fruit and the total per plant, and the water evapotranspired, according to the following relation:

$$EUA = \frac{\text{gram of dry matter of fruit or total per plant}}{\text{gram of water evapotranspired}}$$

### Statistical analysis

A variance analysis was performed on the evaluated variables according to the complete random design, using the GLM procedure of the SAS 8.2 statistical package (SAS, 1998) and Tukey's test for the comparison of averages Tukey, with a significance level of 5%.

## RESULTS AND DISCUSSION

At the end of the experiment (46 DDIT), the evapotranspired volume (L) per plant was 22% significantly less ( $p \leq 0.05$ ) and 20% significantly higher ( $p \leq 0.05$ ) in treatment SPR80-30 and SPR80-80, respectively, in comparison to the control (Table 1). That is, plants under treatment SPR80-30 grew with 18 and 34.6 L less of water than the plants under the control treatment and SPR80-80, respectively.

### Gas exchange and hydric relations

In response to the lower amount of water applied to each plant in treatments SPR80-30 and control, the total water potential of the leaf (Ψ<sub>leaf</sub>), dropped significantly by 22 and



**Análisis estadístico**

Se realizó un análisis de varianza a las variables evaluadas de acuerdo al diseño completamente al azar, con el procedimiento GLM del paquete estadístico SAS versión 8.2 (SAS, 1998) y prueba de comparación de medias Tukey, con un nivel de significancia de 5%.

**RESULTADOS Y DISCUSIÓN**

Al final del experimento (46 DDIT), el volumen evapotranspirado (L) por planta fue 22% significativamente menor ( $p \leq 0.05$ ) y 20% significativamente superior ( $p \leq 0.05$ ) en el tratamiento SPR80-30 y SPR80-80, respectivamente, comparado al testigo (Cuadro 1); es decir, las plantas del tratamiento SPR80-30 crecieron con 18 y 34.6 L menor cantidad de agua que las plantas bajo el tratamiento testigo y SPR80-80, respectivamente.

20% respectivamente, in comparison to plants under SRP80-80 at 46 DDIT (Table 1), consistent with results found in chili peppers (*Capsicum* sp.) (Dorji *et al.*, 2005) and in tomatoes (Zegbe *et al.*, 2006), 117, 141 and 161 days after plantation (DDS); these authors concluded that this phenomenon could be due to two types of water demand: a) related to fruit elongation; and b) due to the environment. In this respect, the tendency to reduce the  $\Psi_{leaf}$  could be due partly to solar radiation, as reported Behboudian *et al.* (1994), who observed that cloudy days hide episodes of water deficits in plants, whereas the opposite occurs on clear days.

In this study, the active photosynthetic radiation ( $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1} \pm \text{standard deviation}$ ) was, on average,  $396 \pm 22.8$ ,  $497 \pm 41.4$  and  $557 \pm 17$ , for treatments SPR80-80, SPR80-30 and control, respectively at 46 DDIT during the readings, where it is clear that the  $\Psi_{leaf}$  decreased in treatments SPR80-30 and control, due to the highly significant increase in the HAR. It would be

**Cuadro 1. Tratamientos de humedad aprovechable residual, con sistema de raíz dividida y secado parcial de la raíz, sobre las variables de estudio en pimiento morrón bajo hidroponía e invernadero, a 46 DDIT.**

**Table 1. Treatments of residual usable humidity, with a split root system and partial root drying, on the study variables in sweet peppers under hydroponic and in greenhouse, at 46 DDIT.**

Variables	Tratamientos			Significancia
	80-80	80-30	80	
Volumen evapotranspirado (L pl <sup>-1</sup> )	99.13 a	64.57 b	82.57 ab	*
Relaciones hídricas ( $\Psi_a$ , MPa)	-0.74 ± 0.03 a	-0.90 ± 0.04 b	-0.89 ± 0.05 b	*
Intercambio de gases				
Conductancia estomática (mmol m <sup>-2</sup> s <sup>-1</sup> )	124 ± 6.73 b	205 19.91 a	191 ± 22.1 ab	*
Tasa de fijación de CO <sub>2</sub> (μmol m <sup>-2</sup> s <sup>-1</sup> )	7.1 ± 0.36 b	8.6 ± 0.59 a	8.5 ± 0.51 ab	*
Transpiración (mmol m <sup>-2</sup> s <sup>-1</sup> )	3.2 ± 0.11 b	4.5 0.31 a	4.5 ± 0.26 a	*
Área foliar por planta (m <sup>2</sup> )	0.275 ± 0.04 a	0.241 ± 0.03 a	0.294 ± 0.03 a	NS
Materia fresca (g pl <sup>-1</sup> )				
Raíz	146 ± 26.4 a	151 ± 10.4 a	146 ± 23.5 a	NS
Tallo	235 ± 21.8 a	197 ± 16.7 a	227 ± 12 a	NS
Hoja	153 ± 18.1 a	140 ± 21.6 a	173 ± 18.8 a	NS
Fruto	1518 ± 149.5 a	1553 ± 193.3 a	1788 ± 133.4 a	NS
Total	2051 ± 149.1 a	2042 ± 237.1 a	2333 ± 164.7 a	NS
Materia seca (g pl <sup>-1</sup> ) de:				
Raíz	20 ± 4 a	20 ± 2.5 a	22 ± 2.3 a	NS
Tallo	53 ± 7.7 a	44 ± 3.7 a	52 ± 1.8 a	NS
Hoja	27 ± 3.1 a	24 3 a	29 ± 3 a	NS
Fruto	97 ± 12.1 a	106 ± 13.5 a	109 ± 8.98 a	NS
Total	197 ± 13.3 a	193 ± 21.7 a	211 ± 14.1 a	NS

SST= sólidos solubles totales; pl= planta; DDIT= días después de iniciados los tratamientos; EUA= eficiencia del uso de agua; NS= no significativo; \*= significativo a  $p \leq 0.05$ ; \*\*= altamente significativo a  $p \leq 0.01$ .

**Cuadro 1. Tratamientos de humedad aprovechable residual, con sistema de raíz dividida y secado parcial de la raíz, sobre las variables de estudio en pimiento morrón bajo hidroponía e invernadero, a 46 DDIT (Continuación).**

**Table 1. Treatments of residual usable humidity, with a split root system and partial root drying, on the study variables in sweet peppers under hydroponic and in greenhouse, at 46 DDIT (Continuation).**

Variables	Tratamientos			Significancia
	80-80	80-30	80	
Calidad del fruto				
Firmeza (kg f)	0.92 ± 0.04 a	1.01 ± 0.04 a	0.90 ± 0.03 a	NS
pH	4.9 ± 0.09 a	4.8 ± 0.15 a	4.9 ± 0.19 a	NS
SST (°Brix)	8.2 ± 0.22 a	7.8 ± 0.25 a	7.0 ± 0.19 b	**
EUA de materia seca de fruto por planta	0.00098 ± 0.0001 a	0.00164 0.0002 a	0.00132 ± 0.0001 a	NS
EUA de materia seca total por planta	0.00198 ± 0.0001 a	0.00298 0.0003 a	0.00255 ± 0.0002 a	NS

SST= sólidos solubles totales; DDIT= días después de iniciados los tratamientos; EUA= eficiencia del uso de agua; NS= no significativo; \*= significativo a  $p \leq 0.05$ ; \*\*= altamente significativo a  $p \leq 0.01$ .

### Intercambio de gases y relaciones hídricas

En respuesta a la menor cantidad de agua aplicada por planta en los tratamientos SPR80-30 y testigo, el potencial de agua total de la hoja ( $\Psi_{\text{hoja}}$ ), disminuyó significativamente en 22 y 20% respectivamente, comparado a las plantas bajo SRP80-80 a 46 DDIT (Cuadro 1), consistente con los resultados encontrados en Chile (*Capsicum* sp.) (Dorji *et al.*, 2005) y en tomate (Zegbe *et al.*, 2006), a 117, 141 y 161 días después de la siembra (DDS); quienes concluyeron que este fenómeno puede deberse a dos tipos de demanda por agua: a) asociada con la elongación del fruto; y b) debido a la atmósfera. Al respecto, la tendencia a disminuir el  $\Psi_{\text{hoja}}$  podría explicarse, en parte, debido a la radiación solar existente como reportado por Behboudian *et al.* (1994), quienes observaron que los días nublados enmascaran episodios deficitarios de agua en las plantas, mientras que lo opuesto ocurre en días despejados.

En la presente investigación, la radiación fotosintéticamente activa ( $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1} \pm$  desviación estándar) fue en promedio  $396 \pm 22.8$ ,  $497 \pm 41.4$  y  $557 \pm 17$ , para los tratamientos SPR80-80, SPR80-30 y testigo, respectivamente a 46 DDIT durante la toma de las lecturas, donde claramente se nota que la disminución del  $\Psi_{\text{hoja}}$  en los tratamientos SPR80-30 y testigo, se debe al aumento altamente significativo de la HAR. Resultaría difícil que este comportamiento de disminución del  $\Psi_{\text{hoja}}$  se tuviese bajo condiciones controladas de luz como han reportado varios autores (Dry y Loveys, 1998; Sobeih *et al.*, 2004).

El efecto de los niveles de HAR entre los tratamientos tuvo influencia significativa ( $p \leq 0.05$ ) sobre la conductancia estomática (Cuadro 1). En consecuencia, la tasa transpiratoria

difficult for this behavior of the reduction of  $\Psi_{\text{leaf}}$ , was under controlled conditions of light, as reported by various authors (Dry and Loveys, 1998; Sobeih *et al.*, 2004).

The effect of the levels of HAR between treatments has a significant influence ( $p \leq 0.05$ ) on the stomatic conductance (Table 1). Consequently, the rates of transpiration and  $\text{CO}_2$  assimilation increased, presenting an increase in stomatic conductance of 65 and 54% in treatments SPR80-30 and control, respectively, in comparison with SPR80-80. This correlates positively with the highest transpiration and  $\text{CO}_2$  assimilation. Such a reduction in the stomatic conductance in plants under SPR80-80 influenced the gas exchange, consistent with reports by Gowing *et al.* (1990) and Davies *et al.* (2002).

As we can observe, in general terms, stomata are not sensitive to changes in  $\Psi_{\text{leaf}}$  until it crosses a certain threshold. For this experiment, this reduction did not cross the critical threshold for  $\Psi_{\text{leaf}}$  ( $< -1 \text{MPa}$ ) which would, in theory, induce the closure of the stomata (Duniway, 1971). The wide evidence shows that the closure of the stomata is due to hormonal signals (ABA) that travels from the roots in conditions of water stress to the shoot (Bacon *et al.*, 1998; Sobeih *et al.*, 2004). However, although this study did not measure the content of ABA in plants from roots under water stress, it is assumable that the humid side kept the plant under good water stress, due to the significant increase of the stomatic conductance (SPR80-30).

y la de asimilación de CO<sub>2</sub> se incrementaron. Observándose un aumento en la conductancia estomática de 65 y 54% en los tratamientos SPR80-30 y testigo, respectivamente comparado con el SPR80-80, correlacionándose positivamente con la mayor transpiración y fijación de CO<sub>2</sub>; tal reducción en la conductancia estomática en plantas bajo SPR80-80, influyó en el intercambio gaseoso, consistente con lo reportado por Gowing *et al.* (1990) y Davies *et al.* (2002).

Como podemos observar en forma general los estomas no son sensibles a los cambios en el  $\Psi_{\text{hoja}}$  hasta que exceda un cierto umbral, para el presente experimento, esta reducción no rebasó el umbral crítico del  $\Psi_{\text{hoja}}$  (< -1 MPa) que teóricamente induciría el cierre estomático (Duniway, 1971). La amplia evidencia muestra que el cierre del estoma se debe por las señales hormonales (ABA) que viaja desde las raíces en condiciones de estrés hídrico hasta el vástago (Bacon *et al.*, 1998; Sobeih *et al.*, 2004). Sin embargo, aunque en esta investigación no se midió el contenido de ABA en la planta proveniente de las raíces bajo estrés hídrico, es de suponerse que el lado húmedo mantuvo un buen estatus hídrico a las plantas, por aumentar significativamente su conductancia estomática (SPR80-30).

**Área foliar y distribución de la materia fresca y seca**

La inhibición del crecimiento de la hoja es una de las respuestas más tempranas de la planta al estrés hídrico disminuyendo las pérdidas de agua de la misma (Shulze, 1986; Chaves *et al.*, 2002). El área foliar por planta (m<sup>2</sup>) tuvo una reducción no significativa de 18 y 7% en plantas bajo SPR80-30 y SPR80-80, respectivamente, comparado al testigo. Otros autores (Davies *et al.*, 2000; López *et al.*, 2008) reportaron resultados similares a los encontrados en la presente investigación.

La distribución de la materia fresca y seca entre la raíz, tallo, hoja y fruto fue similar entre los tratamientos (Cuadro 1). Sin embargo, bajo SPR80-80 y SPR80-30 el rendimiento fresco se redujo en 15 y 13%, respectivamente, comparado al tratamiento testigo en referente a materia fresca del fruto por planta. A pesar de ello, la materia seca total del fruto por planta fue similar al testigo. Esto indica que el movimiento del agua en el fruto, puede haber disminuido con el desarrollo progresivo del déficit hídrico sin afectar la translocación de la materia seca en el fruto (Dorji *et al.*, 2005).

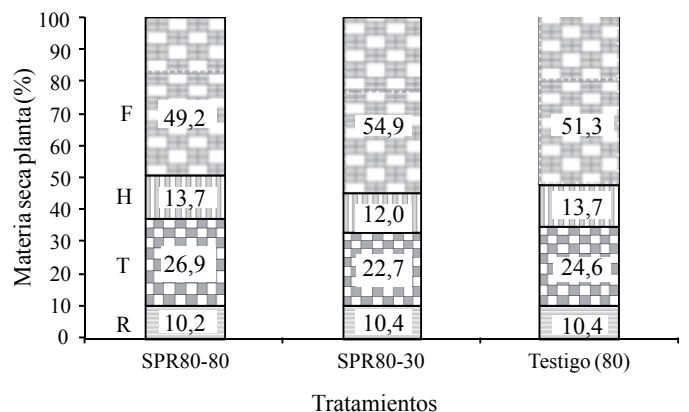
En la Figura 3, podemos observar que aunque, la proporción de materia seca traslocada al fruto fue similar independientemente de los tratamientos, el fruto de plantas

**Foliar area and distribution of the fresh and dry matter**

The leaf’s growth inhibition is one of the plant’s earliest responses to water stress, reducing the plant’s water losses (Shulze, 1986; Chaves *et al.*, 2002). The foliar area per plant (m<sup>2</sup>) has a non-significant reduction of 18 and 7% in plants under SPR80-30 and SPR80-80, respectively, in comparison to the control. Other authors (Davies *et al.*, 2000; López *et al.*, 2008) reported similar results to those obtained in this study.

The distribution of the fresh and dry matter between the root, stem, leaf and fruit was similar between treatments (Table 1). However, under SPR80-80 and SPR80-30, the fresh yield was reduced by 15 and 13%, respectively, in comparison to the control treatment, in reference to the fresh matter of fruits per plant. Despite this, the total dry matter of the fruit per plant was similar to the control, indicating that the water movement in the fruit could have dropped with the eventual increase of the water deficit, without affecting the translocation of the dry matter in the fruit (Dorji *et al.*, 2005).

Figure 3 shows that although the proportion of dry matter translocated to the fruit was similar, regardless of the treatments, the fruits of plants under SPR80-30 accounted for 55% of the total dry matter of the plant, which is higher than 51 and 49% of the control and SPR80-80 treatments that received more water per plant. These results are higher than, and similar to, those found in chilies (39 and 55%) under SPR (Cantore *et al.*, 2000; Dorji *et al.*, 2005).



**Figura 3. Distribución de la materia seca por planta en respuesta al secado parcial de la raíz.** Raíz (R), tallo (T), hoja (H), y fruto (F).

**Figure 3. Distribution of the dry mass per plant in response to the partial root drying.** Root (R), stem (T), leaf (H), fruit (F).

bajo SPR80-30 representó 55% de la materia seca total de la planta, que es más alto a 51 y 49% de los tratamientos testigo y SPR80-80, que recibieron mayor cantidad de agua por planta. Estos resultados son superiores y similares a los encontrados en Chile (39 y 55%) bajo SPR (Cantore *et al.*, 2000; Dorji *et al.*, 2005).

### Calidad del fruto

Uno de los beneficios del riego reducido es el incremento en la calidad de los frutos (Behboudian y Mills, 1997). En el presente estudio, aún cuando las plantas bajo SPR80-30 recibieron menor cantidad de agua, 22% en comparación con el testigo, la calidad del fruto en términos de firmeza y pH, fue estadísticamente igual entre los tratamientos. Sin embargo, la concentración de sólidos solubles totales aumentó significativamente ( $p \leq 0.01$ ) en 17% bajo los tratamientos de SPR en comparación al testigo (Cuadro 1). Resultados similares fueron encontrados en tomate (Stikic *et al.*, 2003; López *et al.*, 2008), durazno (Goldhamer *et al.*, 2002), manzano (Zegbe *et al.*, 2007). El incremento de alguno de los parámetros de calidad de los frutos podría aumentar la vida de anaquel y por lo tanto, el valor económico de los mismos (López *et al.*, 2008).

### Eficiencia en el uso del agua

El efecto de los tratamientos tuvo un efecto no significativo en la EUA (Cuadro 1). Sin embargo, la EUA de materia seca de fruto de plantas bajo SPR80-30, fue 24 y 67% superior en comparación con los tratamientos testigo y SPR80-80 respectivamente. Resultados similares fueron encontrados en manzano (Einhorn y Caspari, 2004; Leib *et al.*, 2006), peral (Kang *et al.*, 2002), frambuesa (Grant *et al.*, 2004), tomate (Topcu *et al.*, 2007).

### CONCLUSION

El tratamiento SPR80-30 produjo un incremento en la eficiencia en el uso del agua y fertilizantes, comparado con el tratamiento testigo; además de mejorar la calidad de los frutos, sin alterar significativamente, el crecimiento y rendimiento de plantas de pimiento morrón en condiciones de hidroponía e invernadero.

### Fruit quality

One of the benefits of reduced risk is the increase in the quality of the fruits (Behboudian and Mills, 1997). In this study, although plants under SPR80-30 received less water, 22% in comparison to the control, the quality of the fruit, in terms of firmness and pH, was statistically equal between treatments. However, the concentration of total soluble solids increased significantly ( $p \leq 0.01$ ) in 17% under SPR treatments in comparison to the control (Table 1). Similar results were obtained in tomatoes (Stikic *et al.*, 2003; López *et al.*, 2008), peaches (Goldhamer *et al.*, 2002), and apples (Zegbe *et al.*, 2007). The increase in some of the quality parameters of the fruits could increase their shelf lives and therefore their economic value (López *et al.*, 2008).

### Water use efficiency

The effect of the treatments had a non-significant effect on EUA (Table 1). However, the EUA of the dry matter of fruits fell under SPR80-30, was 24 and 67% higher than the control and SPR80-80 respectively. Similar results were found in apple (Einhorn and Caspari, 2004; Leib *et al.*, 2006), pear (Kang *et al.*, 2002), raspberry trees (Grant *et al.*, 2004) and tomato plants (Topcu *et al.*, 2007).

### CONCLUSION

Treatment SPR80-30 produced an increase in the water and fertilizer use efficiency, in comparison to the control treatment; as well as improving the quality of the fruits, without altering the growth and yield of sweet pepper plants significantly in conditions of hydroponic and in greenhouse.

*End of the English version*



### LITERATURA CITADA

- Adams, P. and Ho, L. C. 1992. The susceptibility of modern tomato cultivars to blossom-end rot in relation to salinity. *J. Hortic. Sci.* 67:827-839.
- Association of Official Agricultural Chemist (AOAC). 1990. Official methods of analysis of AOAC international. Fruits and fruit products. 829-830 pp.

- Bacon, M. A.; Wilkinson, S. and Davies, W. J. 1998. pH-regulated leaf cell expansion in drought plants is abscisic acid dependent. *Plant Physiol.* 114:1507-1515.
- Bangerth, F. 1979. Calcium-related physiological disorders of plants. *Ann. Rev. Phytopathol.* 17:97-122.
- Behboudian, M. H.; Lawes, G. S. and Griffiths, K. M. 1994. The influence of water deficit on water relations, photosynthesis and fruit growth in Asian pear (*Pyrus serotina* Rehd.). *Sci. Hortic.* 60:89-99.
- Behboudian, M. H. and Mills, T. M. 1997. Deficit irrigation in deciduous orchards. *Hortic. Rev.* 21:105-131.
- Bohnert, H. J.; Nelson, D. E. and Jeensen, R. G. 1995. Adaptations to environmental stresses. *Plant Cell* 7:1099-1111.
- Cantore, V.; Boari, F. and Caliandro, A. 2000. Effect of split-root-system water stress on physiological and morphological aspects of pepper (*Capsicum annuum* L.). *Acta Hortic.* 537:321-328.
- Chaves, M. M.; Pereira, J. S.; Maroco, J.; Rodrigues, M. L.; Ricardo, C. P. P. and Osorio, M. L. 2002. How plants cope with water stress in the field. Photosynthesis and growth. *Ann. Bot.* 89:907-916.
- Comisión Nacional del Agua (CNA). 2005. Estadísticas del agua en México. Comisión Nacional del Agua. México. 23-34 pp.
- Davies, W. J. and Zhang, J. 1991. Root signals and the regulation of growth and development of plants in drying soil. *Ann. Rev. Plant Physiol. and Plant Mol. Biol.* 42:55-76.
- Davies, W. J.; Bacon, M. A.; Thompson, D. S.; Sobeih, W. and Rodriguez, L. G. 2000. Regulation of leaf and fruit growth in plants growing in drying soil: exploitation of the plants chemical signaling system and hydraulic architecture to increase the efficiency of water use in agriculture. *J. Exp. Bot.* 51:1617-1626.
- Davies, W. J.; Wilkinson, S. and Loveys, B. R. 2002. Stomatal control by chemical signaling and the exploitation of this mechanism to increase water use efficiency in agriculture. *New Phytol.* 153:449-460.
- Debaeke, P. and Aboudrare, A. 2004. Adaptation of crop management to water limited environments. *Europ. J. Agron.* 21:433-446.
- Dorji, K.; Behboudian, M. H. and Zegbe-Domínguez, J. A. 2005. Water relations, growth, yield and fruit quality of hot pepper under deficit irrigation and partial rootzone drying. *Sci. Hortic.* 104:137-149.
- Dry, P. R. and Loveys, B. R. 1998. Factors influencing grapevine vigour and the potential for control with partial rootzone drying. *Aust. J. Grape Wine Res.* 4:140-148.
- Duniway, J. M. 1971. Water relations of *Fusarium* wilt in tomato. *Physiol. Plant Pathol.* 1:537-546.
- Einhorn, T. and Caspari, H. W. 2004. Partial rootzone drying and deficit irrigation of 'Gala' apples in a semi-arid climate. *Acta Hortic.* 664:197-204.
- Goldhamer, D. A.; Salinas, M.; Crisosto, C.; Day, K. R.; Soler, M. and Moriana, A. 2002. Effects of regulated deficit irrigation and partial rootzone drying on late harvest peach tree performance. *Acta Hortic.* 592:343-350.
- Gowing, D. J. G.; Davies, W. J. and Jones, H. G. 1990. A positive rootsourced as an indicator of soil drying in apple, *Malus x domestica* Borkh. *J. Exp. Bot.* 41(233):1535-1540.
- Grant, O. M.; Stoll, M. and Jones, H. G. 2004. Partial rootzone drying does not affect fruit yield of raspberries. *J. Hortic. Sci. Biotech.* 79:125-130.
- Hanson, A. and Hitz, W. 1982. Metabolic responses of mesophytes to plant water deficits. *Ann. Rev. Plant Physiol.* 33:163-203.
- Hsiao, T. C. 1990. Plant-atmosphere interactions, evapotranspiration, and irrigation scheduling. *Acta Hortic.* 278:55-66.
- Kang, S.; Zhang, L.; Hu, X.; Li, Z. and Jerie, P. 2001. An improved water use efficiency for hot pepper grown under controlled alternate drip irrigation on partial roots. *Sci. Hortic.* 89:257-267.
- Kang, S.; Hu, X.; Goodwin, I. and Jerie, P. 2002. Soil water distribution, water use, and yield response to partial root zone drying under shallow groundwater table condition in a pear orchard. *Sci. Hortic.* 92:277-291.
- Khalil, A. and Grace, J. 1993. Does xylem sap ABA control the stomatal behavior of water stressed sycamore (*Acer pseudoplatanus* L.) seedlings? *J. Exp. Bot.* 44:1127-1134.
- Leib, B. G.; Caspari, H. W.; Redulla, C. A.; Andrews, P. K. and Jabro, J. J. 2006. Partial rootzone drying and deficit irrigation of 'Fuji' apples in a semiarid climate. *Irrig. Sci.* 24:85-99.
- López, O. A.; Trejo, L. C.; Peña, V. C. B.; Ramírez, A. C.; Tijerina, Ch. L. y Carrillo, S. J. A. 2008. Secado parcial de la raíz de jitomate: efectos en la fisiología de la planta y calidad de fruto. *Agric. Téc. Méx.* 34:297-302.

- Loveys, B. R.; Stoll, M.; Dry, P. R. and McCarthy, M. G. 2000. Using plant physiology to improve the water use efficiency of horticultural crops. *Acta Hort.* 537:187-197.
- Obreza, T. A.; Pitts, D. J.; McGovern, R. J. and Speen, T. H. 1996. Deficit irrigation of micro-irrigated tomato affects yield, fruit quality, and disease severity. *J. Prod. Agric.* 2:270-275.
- Parcchomchuk, P.; Tan, C. S. and Berard, R. G. 1997. Practical use of time domain reflectometry for monitoring soil water content in microirrigated orchards. *Hort. Technol.* 7:17-22.
- Petit, J. R.; Jouzel, J.; Raynaud, D.; Barkov, N. I.; Barnola, J. M. and Basile, I. 1999. Climate and atmospheric history of the past 420 000 years from the Vostok ice core, Antarctica. *Nature.* 399:429-436.
- Postel, S. L. 1998. Water for food production: will there be enough in 2025?. *BioScience.* 48:629-637.
- Shulze, E. D. 1986. Carbon dioxide and water vapour exchange in response to drought in the atmosphere and in the soil. *Ann. Rev. Plant Physiol.* 37:247-274.
- Steiner, A. A. 1984. The universal solution. I.S.O.S.C. Proceedings 6<sup>th</sup> International Congress on Soilles Culture. 633-649 pp.
- Sobeih, W. Y.; Dodd, I. C.; Bacon, M. A.; Grierson, D. and Davies, W. J. 2004. Long-distance signals regulating stomatal conductance and leaf growth in tomato (*Lycopersicon esculentum* Mill.) plants subjected to partial root-zone drying. *J. Exp. Bot.* 55:2353-2363.
- Solomon, A. M. and Cramer, W. 1993. Biospheric implications of global environmental change. En: A. M. Solomon y H. H. Shugart (eds) *Vegetation dynamics and global change*. London, UK: Chapman & Hall. 25-52 pp.
- Stikic, R.; Popovic, S.; Srdic, M.; Savic, D.; Jovanovic, Z.; Prokic, L. J. and Zdravkovic, J. 2003. Partial root-zone drying (PRD): a new technique for growing plants that saves water and improves the quality of fruit. *Bulgarian. J. Plant Physiol. Special Issue*:164-171 pp.
- Stoll, M.; Loveys, B. and Dry, P. 2000. Hormonal changes induced by partial rootzone drying of irrigate grapevine. *J. Exp. Bot.* 51:1627-1634.
- Topcu, S.; Kirda, C.; Dasgan, Y.; Kaman, H.; Cetil, M. and Yazici, A. 2007. Yield response and N-fertilizer recovery of tomato grown under deficit irrigation. *Europ. J. Agron.* 26:64-70.
- Van Schilfhaarde, J. 1994. Irrigation - a blessing or a curse. *Agric. Water Manag.* 25:203-219.
- Zegbe, J. A.; Behboudian, M. H. and Clothier, B. E. 2006. Responses of 'Petopride' processing tomato to partial rootzone drying at different phenological stages. *Irrigation Universidad de Massey, Palmerston North. Nueva Zelandia. Science.* 24:203-210.
- Zegbe, A. J.; Behboudian, M. H.; Lang, A. y Clothier, B. E. 2007. Respuesta del manzano "Pacific Rose<sup>TM</sup>" al riego parcial de la raíz. *Revista Chapingo. Serie Horticultura.* 13(1):43-48.