

EL RIEGO PARCIAL DE LA RAÍZ INCREMENTA LA PRODUCTIVIDAD DEL AGUA EN MANZANO EN UN AMBIENTE SEMI-ÁRIDO

J. A. Zegbe¹; A. Serna-Pérez

Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias.
Campo Experimental Zacatecas. Apartado Postal Núm. 18,
Calera de V. R., Zacatecas, C. P. 98500, MÉXICO.
Correo-e: jzegbe@zacatecas.inifap.gob.mx (¹Autor responsable)

RESUMEN

La sobre explotación de los acuíferos en el centro y norte de México requiere estrategias eficientes en la aplicación, ahorro y conservación del agua (oro azul) para la sustentabilidad de los cultivos hortícolas como el manzano. Así, el objetivo de este estudio fue comparar el riego comercial (RC) con el riego parcial de la raíz (RPR) en relación al rendimiento y calidad del fruto a la cosecha. Se hizo énfasis en la productividad del agua (PA), en las relaciones hídricas, nutrición del árbol y en el comportamiento del fruto en postcosecha. Los tratamientos fueron: RC como testigo y el RPR. La PA se mejoró significativamente por el uso del RPR y resultó en un ahorro de 2.9 megalitros de agua de riego por hectárea. El rendimiento, componentes del rendimiento, crecimiento vegetativo, tamaño y calidad de la fruta a la cosecha no fueron modificados por los tratamientos de riego. La madera podada fue menor en árboles con RPR. El potencial hídrico, conductancia estomática y transpiración fueron menores en árboles con RPR que en árboles con RC. Excepto por calcio y boro, la concentración del resto de los nutrimentos fue similar entre tratamientos. Después de 18 días en almacenamiento, la calidad de la fruta fue igual entre tratamientos, pero la pérdida de peso de la fruta tendió a incrementarse en la fruta con RPR. En conclusión, el RPR es una estrategia de ahorro de agua de riego para la producción sustentable en manzano, principalmente para regiones donde el recurso hídrico es limitado.

PALABRAS CLAVE ADICIONALES: *Malus x sylvestris* (L.) Mill. var *domestica* (Borkh.) Mansf, riego reducido, relaciones hídricas, nutrición, precosecha, postcosecha.

PARTIAL ROOTZONE DRYING IMPROVES WATER PRODUCTIVITY OF APPLES IN A SEMI-ARID ENVIRONMENT

ABSTRACT

The aquifer over exploitation in the central and northern part of Mexico requires efficient strategies in the application, savings, and conservation of water (blue gold) for the sustainability of horticultural crops like apple. So, the objective of this study was to compare the commercial irrigation (CI) with partial rootzone drying (PRD) in relation to the yield and fruit quality at harvest, and water productivity (WP). Emphasis was placed on water productivity, water relationships, tree nutrition, and postharvest performance of fruit. The treatments were: CI as control and PRD. Water productivity was significantly improved by the use of PRD and resulted in a water savings of 2.9 megalitres of water per hectare. Yield, yield components, vegetative growth, fruit size, and fruit quality were not modified by the irrigation treatments. Pruning weight was the lowest in PRD trees. Tree water status, stomatal conductance, and transpiration were lower in PRD trees than in RC trees. Except for calcium and boron, the concentration of the remainder nutrients was similar between treatments. After 18-day in storage, fruit quality was the same between treatments, but fruit water loss tended to increase in PRD fruit. In conclusion, PRD is a water-saving irrigation strategy for the sustainable apple production, mainly for areas where water resource is limited.

ADDITIONAL KEY WORDS: *Malus x sylvestris* (L.) Mill. var *domestica* (Borkh.) Mansf, reduced irrigation, water relations, nutrition, preharvest, postharvest.

INTRODUCCIÓN

Aparte de la contaminación y calentamiento global, México, enfrenta un incremento poblacional constante, por lo que la disponibilidad de agua por habitante cada vez es menor. El uso del 85 % del agua del subsuelo para actividades agrícolas y la pérdida del 57 % de ésta debido a infraestructura hidráulica y métodos de riego ineficientes; han impactado en la sobreexplotación del 23 % de los acuíferos ubicados en las regiones semiáridas y áridas del centro y norte del país (CNA, 2008). Lo anterior advierte un fuerte impacto socioeconómico, político y ambiental debido a la reducción de más del 30 % del recurso hídrico para el 2025 (Rosegrant y Cai, 2002). Por lo tanto, es urgente el desarrollo de estrategias apropiadas para el ahorro y conservación del agua (oro azul) del subsuelo para promover sistemas agrícolas y humanos sustentables, lo cual puede lograrse a través de sistemas de riego apropiados a la situación actual (Postel, 2003).

El manzano requiere de riego para alcanzar altos rendimientos y calidad de fruta, pero como el suministro de agua se ha convertido en un factor limitante en las principales áreas de producción, la explotación de este cultivo debe orientarse en términos de productividad del agua (PA; Passioura, 2006). Este último término se define como la cantidad de agua realmente usada por el cultivo (incluyendo la lluvia; Pereira *et al.* (2002). Sin embargo, la PA depende de la herencia genética del cultivo y de nuevas estrategias en la aplicación del riego, entre otros factores no menos importantes (Passioura, 2006).

El cultivo del manzano ha sido mundialmente investigado bajo el concepto de déficit hídrico regulado (DHR) (Behboudian y Mills, 1997). No obstante que el DHR mejora la calidad de la fruta, esta alternativa puede afectar negativamente el rendimiento y el tamaño del fruto (Leib *et al.*, 2005). En cambio, el riego parcial de la raíz (RPR) ha resultado ser una mejor estrategia de riego al incrementar significativamente la eficiencia en el uso del agua y ahorrar entre el 42 y 50 % del agua de riego sin detrimento en el rendimiento o en la calidad del fruto del manzano cultivado en regiones húmedas de Nueva Zelanda (van Hooijdonk *et al.*, 2007; Zegbe y Behboudian, 2008). Sin embargo, poca atención se ha dado a esta técnica de riego en las zonas semiáridas de Norte América (Leib *et al.*, 2005; Zegbe *et al.*, 2006). Los estudios de estos últimos autores incluyen aquellos relacionados con láminas de riego aplicadas, contenido del agua en el suelo, rendimiento, componentes del rendimiento y calidad del fruto a la cosecha.

Por otro lado, aspectos como PA, relaciones hídricas (Zegbe *et al.*, 2006), nutrición (Nakajima *et al.*, 2004) y postcosecha (Leib *et al.*, 2005) han sido insipientemente estudiados en manzano bajo RPR cultivado en una región semiárida. Por tanto, el objetivo de esta investigación fue comparar el riego comercial con el RPR en relación al rendimiento y calidad del fruto a la cosecha, haciendo

énfasis en la PA, relaciones hídricas, nutrición del árbol y comportamiento del fruto en postcosecha. Se hipotetizó que el RPR podría afectar negativamente los parámetros arriba indicados debido a que la más alta demanda evaporativa (marzo a junio) coincide con la floración, amarre de fruto y primer crecimiento rápido del fruto. Lo opuesto sucede en áreas húmedas, en donde se ha generado la mayor cantidad de información para manzano bajo RPR.

MATERIALES Y MÉTODOS

Sitio experimental y material genético

El experimento se condujo durante la estación de crecimiento de 2008 en el Campo Experimental Zacatecas (22° 54' N, 102° 39' O); con altitud de 2,197 m, temperatura media anual de 14.6 °C y precipitación media anual de 416 mm, de la cual el 75 % ocurre durante el verano, particularmente de junio a septiembre. La evaporación del tanque evaporímetro promedio anual es de 1,609 mm, las mayores diferencias entre la lluvia y la evaporación se registran de diciembre a mayo. El suelo es franco arenoso con pH de 7.5 y un contenido de materia orgánica de 0.57 %. El huerto consiste de árboles de manzano cv. Golden Delicious de 32 años de edad sobre el portainjerto M7, plantados a 5.0 x 3.5 m y conducidos a líder central. Los cultivares Jonathan y Starking están intercalados como polinizadores. Excepto por el riego, los árboles fueron manejados con prácticas comerciales de producción que incluyeron: poda de fructificación (21 de enero), dos aplicaciones de estimulantes de la brotación de yemas reproductivas y vegetativas (10 y 24 de marzo), raleo de fruta (30 de mayo), fertirrigación y control de organismos dañinos. El manejo del suelo entre hileras consistió en mantener pasto nativo en un área de 4 m que se segó periódicamente.

Tratamientos y diseño experimental

Los tratamientos fueron: riego comercial donde se aplicaron las láminas de riego requeridas para el desarrollo óptimo de los árboles (RC, testigo) y RPR, en este último se aplicó el 50 % del agua suministrada en RC. El experimento se condujo en un diseño experimental completamente aleatorio, donde diez parcelas con cuatro árboles cada una fueron seleccionadas y asignadas al azar a dos tratamientos de riego (cinco parcelas por tratamiento). La información experimental se obtuvo de los dos árboles centrales de cada parcela experimental.

Control y aplicación del riego

Para aplicar el RPR la tubería principal se dividió en dos líneas paralelas, una para cada lado de la hilera de árboles y separadas a 50 cm del tronco. Se instalaron diez goteros (cinco por cada lado de la hilera de árboles) que emitieron 40 litros·hora⁻¹·árbol⁻¹. El riego, en ambos lados

del RPR, se controló manualmente con válvulas de paso, pero el riego general del huerto fue automático. Los árboles con RC recibieron el riego en ambos lados del árbol, mientras que aquellos con RPR recibieron el riego en un solo lado del árbol. En RPR el agua se aplicó alternadamente de un lado al otro lado de los árboles semanalmente o cuando el contenido del agua en el suelo, en promedio, se ubicó cercano al punto de marchitez permanente (PMP). La capacidad de campo ($CC = 0.26 \text{ cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$) y PMP ($0.15 \text{ cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$) se determinaron en el laboratorio a partir de muestras alteradas del suelo del sitio de estudio. En cada ocasión la lámina de riego por aplicar se estimó mediante balance hídrico (Brady y Weil, 2000), a partir de la evapotranspiración del cultivo y lluvias efectivas acumuladas entre las fechas del riego anterior y la actual. La evapotranspiración del cultivo se obtuvo a partir de la evaporación acumulada en tanque evaporímetro tipo A, corregido por coeficientes de cultivo (Zegbe *et al.*, 2005). La precipitación efectiva se estimó mediante la ecuación: $P_e = (PP-10) * 0.8$ (Quiñones, 1997); donde P_e es la precipitación efectiva en mm y PP es la precipitación pluvial en mm. La lámina de riego se corrigió por la eficiencia de aplicación del sistema de irrigación (95 %).

Variables de respuesta

Relaciones hídricas. A los 66, 93 y 112 días después de floración completa (DDFC), en cuatro hojas maduras y expuestas a la radiación solar por parcela se determinó el potencial hídrico de la hoja (Ψ_{hoja}) entre las 05:00 y 06:00 horas y entre las 12:00 y 13:00 horas con una bomba de presión (Soil Moisture Equipment Corp., Santa Bárbara, CA, USA). En cuatro hojas vecinas a las usadas para el Ψ_H se determinó la conductancia estomática (g_s) y transpiración (E) con un porómetro de punto de equilibrio (modelo LI-160, Li-Cor Inc., NE, USA) calibrado a las condiciones local y equipado con sensor cuántico.

Rendimiento y componentes del rendimiento. A la cosecha (26 de agosto, 139 DDFC), la fruta se pesó y se determinó el número de frutos por árbol. Posteriormente, se midió el perímetro de tronco de cada árbol a 20 cm arriba del injerto para estimar la sección transversal del tronco (cm^2), y así derivar la eficiencia de rendimiento por árbol ($\text{kg} \cdot \text{cm}^{-2}$). La eficiencia en el uso del agua, en términos de productividad del agua ($\text{kg} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{mm}^{-1}$ de agua aplicada), se calculó dividiendo el rendimiento por hectárea por mm de agua consumidos y calculados a través del balance hídrico acumulado.

Crecimiento de fruto, longitud brote y madera podada. La curva característica del crecimiento del fruto se determinó a través del diámetro ecuatorial como sigue: se marcaron cinco frutos y cinco brotes por árbol elegidos en la parte media, periférica y más externa de cada árbol. El diámetro ecuatorial (mm) de cada fruto fue medido semanalmente con un vernier digital (Digimatic, Modelo 50-

321, Mitutoyo, Co., Japón) a partir del 7 de mayo (28 DDFC) hasta el 19 de agosto (132 DDFC). La longitud de los brotes se midió con una regla metálica, después de las observaciones del crecimiento del fruto. La poda de los árboles se realizó después de la defoliación (18 de noviembre).

Concentración de nutrimentos en hojas. Se tomaron 30 hojas maduras de la parte media de brotes elegidos al azar y de la parte media de cada árbol para hacer una mezcla compuesta de 60 hojas por parcela. Las muestras se colectaron en las etapas fenológicas de crecimiento rápido del fruto (66 DDFC), fase final de la elongación del fruto (93 DDFC) y una semana antes de cosecha (112 DDFC). En cada ocasión, las hojas se lavaron con agua destilada, se secaron a $65 \text{ }^\circ\text{C}$ por 48 h y se determinó la concentración de N, P, K, Ca, Mg, Mn, Zn, Fe, y Cu según Medina y Chávez (1999). La interpretación de la concentración de nutrientes en las hojas se basó en la concentración e intervalos de adecuancia según Westwood (1993).

Calidad a la cosecha

Peso y firmeza del fruto. La calidad de fruta se evaluó en 30 frutos uniformes en tamaño, color y sanidad. El peso individual de cada fruto se cuantificó en una balanza analítica (CY-CG 510, Citizen, USA). Después en cada fruto, la firmeza ($N = \text{newtons}$) se determinó en dos sitios opuestos de la parte media de cada fruto con un penetrómetro equipado con una punta de 11.1 mm de diámetro (modelo FT 327, Wagner Instruments, Greenwich, CT, USA).

Concentración de sólidos solubles totales. De ambas perforaciones hechas con el penetrómetro se tomaron y mezclaron algunas gotas de jugo, con ello se determinó la concentración de sólidos solubles totales usando un refractómetro digital con compensación automática por temperatura (Modelo PR-32 α , Atago, Co. Ltd., Tokyo, Japón).

Concentración de materia seca del fruto. Esta variable se determinó con base en peso fresco del fruto ($\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$ de peso fresco) tomando una muestra compuesta de 25 g del mesocarpio fresco (excluyendo la epidermis), la cual se llevó a peso seco constante en estufa por 15 días a $60 \text{ }^\circ\text{C}$. La muestra compuesta se hizo con mesocarpio de tres frutos.

Postcosecha

Pérdida de peso del fruto y calidad del fruto. La pérdida de peso del fruto durante el almacenamiento se determinó con el peso individual de cada fruto, el cual se registró cada dos días por 18 días. Después, cada fruto se utilizó para evaluar la calidad de la fruta como se indicó previamente. La temperatura y humedad relativa de

almacenamiento fueron monitoreadas cada dos horas con un registrador programable (Data Logger Modelo 42276, ExTech, Instruments, MA, USA).

Análisis estadístico

La información fue analizada en un modelo lineal completamente al azar con el procedimiento ANOVA del sistema de análisis estadístico SAS (SAS Institute, Cary, NC, USA). Antes del análisis, las variables expresadas en porcentaje o discretas fueron transformadas a arco-seno y a la raíz cuadrada de su valor, respectivamente. Los valores medios por tratamiento, de las variables transformadas, se indicaron después de su retransformación. La diferencia mínima significativa de Fisher ($P \leq 0.05$) se utilizó como criterio en la comparación de medias de tratamiento.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Uso consuntivo del cultivo

La evapotranspiración de referencia (ET_o) acumulada fue mayor a las láminas de riego aplicadas con el RC y con el RPR sin considerar y considerando la lluvia efectiva (Cuadro 1). Esto en parte, se debió a la presencia de lluvia, la cual fue efectiva a partir de los 41 DDFC y por el resto de la estación de crecimiento del cultivo; y en consecuencia a la baja demanda hídrica del cultivo, la cual es alta en años normales en los dos primeros tercios del desarrollo del cultivo. El uso consuntivo del cultivo considerando y sin considerar la lluvia efectiva coincide relativamente con los indicados por Leib *et al.* (2005) para manzano cv. 'Fuji' cultivado en un clima semi-árido. La importancia de considerar o no considerar la lluvia efectiva en el balance hídrico radica en la estimación real del ahorro y productividad del agua. Es decir, en este experimento, el ahorro de agua fue aproximadamente de 50 y 40 % considerando y sin considerar la lluvia efectiva, respectivamente. Estos valores son aproximados a los indicados por Leib *et al.* (2005).

Potencial hídrico

La fisiología asociada al RPR indica que las raíces de árboles bajo RPR sintetizan ácido abscísico, el cual actúa

CUADRO 1. Evapotranspiración de referencia del cultivo (ET_o), láminas de riego (Lr) aplicada al cultivo sin considerar eventos lluviosos (Lr-sll) y considerando la lluvia efectiva (Lr-clle) para el riego comercial y riego parcial de la raíz aplicados a árboles de manzano cv. Golden Delicious.

Tratamientos de riego	ET _o (mm)	Lr-sll (mm)	Lr-clle (mm)
Riego comercial	889.2	586.9	740.4
Riego parcial de la raíz	889.2	293.4	447.0

El riego parcial...

en la parte aérea induciendo un cierre estomático parcial. Por consiguiente, la tasa transpiratoria también se reduce manteniendo así el potencial hídrico de la hoja (Ψ_{hoja}) similar a árboles con riego comercial, mejorando así el ahorro del agua aplicada (Davies *et al.*, 2002). Sin embargo, en las tres ocasiones en que el Ψ_{hoja} se evaluó al mediodía, éste fue significativamente más bajo en los árboles expuestos al RPR en relación a árboles con RC, pero en promedio el Ψ_{hoja} fue reducido al amanecer y al mediodía (Cuadro 2). Lo anterior coincidió, en promedio, con una ligera reducción de la conductancia estomática, misma que redujo significativamente la tasa transpiratoria en 13.5 %, (Cuadro 3). Por lo tanto, aquí se indica que la actividad estomática está regulada por el Ψ_{hoja} (Steudle, 2001); contrario a lo propuesto por otros autores (Davies *et al.* 2002; Kudoyarova *et al.*, 2007; Dodd *et al.*, 2008). La teoría propuesta alrededor del RPR quizá sea válida para condiciones controladas (Davies *et al.* 2002) o para regiones húmedas (Zegbe y Behboudian., 2008), pero no para zonas semi-áridas, donde el déficit de presión de vapor es más alto que en regiones húmedas (Leib *et al.*, 2005; Zegbe *et al.*, 2006).

Rendimiento y componentes del rendimiento

Resultados previos indican que el RPR mantiene los procesos fisiológicos de la planta de manera similar a plantas que han sido adecuadamente irrigadas (Stoll *et al.*, 2000; Davies *et al.*, 2002), por lo que, el rendimiento no debería disminuir, y por tanto, la eficiencia hídrica mejoraría significativamente (Davies *et al.*, 2002). En contraste, el Cuadro 2 y 3 indican que la aplicación del RPR redujo tanto el Ψ_{hoja} como la g_s y E . Sin embargo, esto no se reflejó en el rendimiento ni en los componentes de rendimiento, porque el número de frutos, el rendimiento, área transversal del tronco, eficiencia productiva y el crecimiento acumulado del fruto fueron estadísticamente iguales entre los árboles testigo y aquellos sometidos al RPR (Cuadro 4, Figura 1). La deficiente acumulación de frío (176 unidades frío) obligó a una doble aplicación de estimulantes (Tidiazuron + aceite mineral) de la brotación (10 y 24 de marzo). Sin embargo, esta estrategia no logró incrementar el rendimiento, y por consiguiente éste se ubicó por debajo de una producción comercial (25 t·ha⁻¹). Por otro lado, la longitud final del brote de árboles bajo RPR se redujo en promedio 33 % con respecto al crecimiento promedio final del brote de árboles con RC (Cuadro 4). Si bien, en esta variable no fue estadísticamente diferente entre RC y RPR, su efecto si se reflejó en el peso de la madera podada, siendo ésta significativamente menor en árboles bajo RPR (Cuadro 4). Esto último demuestra que el manzano es sensitivo a cambios en el Ψ_{hoja} al reducir el crecimiento de los árboles, como previamente se demostró en vid (du Toit *et al.*, 2003). El aspecto benéfico de este último efecto, entre otros, es que al disminuir la cantidad de madera, se disminuye el tiempo y costo de la poda para el siguiente ciclo reproductivo (Zegbe y Behboudian, 2008).

CUADRO 2. Potencial hídrico de hoja de manzano cv. Golden Delicious en función de de tratamientos de riego (TR). Riego comercial (RC) y riego parcial de la raíz (RPR). Valores promedio de 20 observaciones por tratamiento.

TR	Días después de floración completa							
	66		93		112		Promedio	
	Horas del día		Horas del día		Horas del día		Horas del día	
	06:00	12:00	06:00	12:00	06:00	12:00	06:00	12:00
RC	-0.40 a ²	-1.76 a	-0.32 a	-1.11 a	-0.28 a	-1.60 a	-0.34 a	-1.49 a
RPR	-0.50 a	-1.95 b	-0.49 b	-1.36 b	-0.34 a	-1.78 b	-0.44 b	-1.69 b
DMS	-0.10	-0.05	-0.07	-0.18	-0.08	-0.09	-0.05	-0.09
CV	-21.9	-4.4	-12.7	-7.6	-18.1	-7.5	-26.3	-18.4

²Promedios de tratamiento dentro de columnas con la misma letra no son diferentes a una $P \leq 0.05$ de acuerdo con la diferencia mínima significativa (DMS) de Fisher. Coeficiente de variación (CV, %).

CUADRO 3. Efecto del riego comercial (RC) y el riego parcial de la raíz (RPR) en algunas respuestas fisiológicas del manzano cv. Golden Delicious. Conductancia estomática (g_s , $cm \cdot s^{-1}$), transpiración (E , $\mu g \cdot cm^{-2} \cdot s^{-1}$), humedad relativa (HR, % \pm desviación estándar, DE), flujo de fotones fotosintéticos (FFF, $mmol \cdot m^{-2} \cdot s^{-1} \pm$ DE). Valores promedio de 20 observaciones por tratamiento.

TR	Días después de floración completa							
	66		93		112		Promedio	
	g_s	E	g_s	E	g_s	E	g_s	E
RC	1.13 a ²	13.3 a	1.01 a	8.8 a	1.28 a	14.4 a	1.13 a	13.3 a
RPR	0.97 a	11.5 b	0.89 a	8.0 a	1.13 a	12.7 a	0.96 a	11.5 b
DMS	0.2	1.7	0.02	1.1	0.24	2.6	0.18	1.7
CV	19.6	28.6	17.9	13.5	13.5	11.4	19.6	28.6
HR	22.7 \pm 1.8		39.7 \pm 3.0		31.1 \pm 1.3		31.2 \pm 7.3	
FFF	1,259 \pm 319		375.3 \pm 106		1,236 \pm 171		957 \pm 466	

²Promedios de tratamiento dentro de columnas con la misma letra no son diferentes a una $P \leq 0.05$ de acuerdo con la diferencia mínima significativa (DMS) de Fisher. Coeficiente de variación (CV, %).

CUADRO 4. Efecto del riego comercial (RC) y el riego parcial de la raíz (RPR) en el rendimiento y algunas variables de eficiencia productiva de manzano cv. Golden Delicious. Valores promedio de 25 determinaciones para el crecimiento final del brote y 10 determinaciones para el resto de las variables de respuesta.

Variables de respuesta	Tratamientos de riego			
	RC	RPR	DMS	CV
Número de frutos por árbol	174 a ²	165 a	32.9	9.1
Rendimiento ($kg \cdot \text{árbol}^{-1}$)	9.6 a	9.3 a	1.7	8.1
Área transversal del tronco (ATT, cm^2)	364.7 a	336.7 a	101.5	13.5
Eficiencia productiva ($g \cdot ATT \cdot cm^{-2}$)	27.2 a	28.0 a	3.0	5.4
Productividad hídrica ($kg \cdot ha^{-1} \cdot mm^{-1}$)	7.5 b	11.9 a	1.6	8.2
Crecimiento final del brote (cm)	21.6 a	14.5 a	10.3	34.3
Madera podada ($kg \cdot \text{árbol}^{-1}$)	3.2 a	2.0 b	1.1	33.8

²Promedios de tratamiento dentro de filas con la misma letra no son diferentes a una $P \leq 0.05$ de acuerdo con la diferencia mínima significativa (DMS) de Fisher. Coeficiente de variación (CV, %).

La productividad del agua, en términos de $kg \cdot ha^{-1} \cdot mm^{-1}$ de agua consumida por el cultivo (incluyendo la lluvia efectiva) mejoró significativamente ($P \leq 0.0001$) en árboles bajo RPR en 59 %; mientras que el ahorro de agua aplicada fue aproximadamente de 50 %, ambos parámetros en comparación con árboles bajo RC. Lo anterior indica que el ahorro de agua, por el uso del RPR, para producir un rendimiento similar al RC fue de 2.9 megalitros por

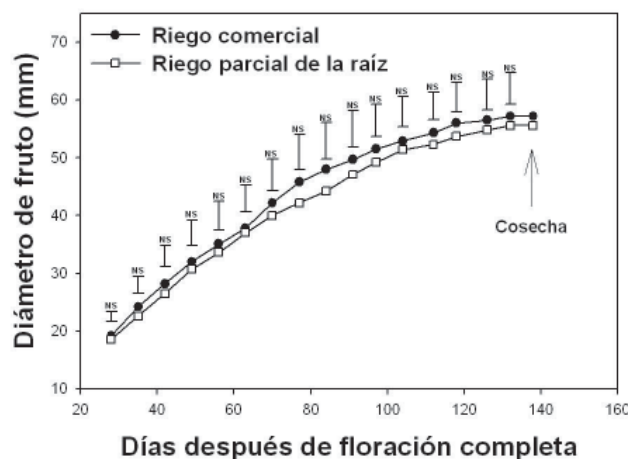


FIGURA 1. Crecimiento acumulado del fruto del manzano 'Golden Delicious' expuesto a tratamientos de riego. Cada punto representa el promedio de 25 determinaciones. Las barras verticales representa la diferencia mínima significativa de Fisher y NS indica diferencias no significativas a una $P \leq 0.05$.

hectárea. Este valor resultó 33 % menor al indicado para un huerto de manzano cv Fuji cultivado con RPR en un clima semi-árido en el estado de Washington, Estados Unidos (Leib *et al.*, 2005). Este ahorro de agua es inferior al 50 % obtenido por Stoll *et al.* (2000) y Davies *et al.* (2002), con la diferencia de que los resultados de estos dos autores

se obtuvieron en condiciones controladas, donde la evapotranspiración es menor a la que se presenta en climas secos. Así, independientemente del clima y suelo, los resultados obtenidos en este ensayo confirman parcialmente los resultados encontrados en manzano cultivado en ambientes húmedos de Nueva Zelanda (Van Hooijdonk *et al.*, 2007; Zegbe *et al.*, 2007), donde el ahorro de agua del 50 % estuvo asociado con rendimientos similares entre RC y RPR. Por otro lado, según Kang *et al.* (2002), Caspari *et al.* (2004) y Leib *et al.* (2005), el rendimiento puede o tiende a incrementarse con el RPR. Es probable que este comportamiento sea debido a floraciones tardías, las cuales son frecuentes cuando los árboles han sido previamente sometidos a déficit hídrico. En el presente experimento no se observó incremento alguno en el rendimiento, ni en otros experimentos con manzano bajo RPR (Van Hooijdonk *et al.*, 2007; Zegbe *et al.*, 2007; Zegbe y Behboudian, 2008).

Concentración de nutrimentos en hojas

Excepto por la concentración de Ca y B, el resto de los nutrimentos se mantuvieron estadísticamente sin cambios entre los tratamientos (Cuadro 5). Sin embargo, dentro de los macronutrientes, la concentración de P y K tendió a incrementarse en hojas con RC, mientras que la concentración de Fe, Zn, Mn y Cu tendió a reducirse en estas mismas. Por otro lado, la concentración de Ca y B se encontró significativamente alta y baja, respectivamente, en hojas con RPR. La alta concentración de Ca estuvo asociada a un sinergismo ($r = 0.57$; $P = 0.026$); mientras

que la baja concentración de B pudo deberse a un antagonismo ($r = -0.48$; $P = 0.0697$) ambos con la concentración de Mn. Independientemente de los tratamientos, la concentración de cada uno de los nutrimentos se encontró entre normal y por encima de lo normal de acuerdo a los intervalos indicados por Westwood (1993). Por lo tanto, a diferencia del déficit hídrico (Nakajima *et al.*, 2004), se concluye que el RPR, no promueve déficit nutrimental. Esto puede tener dos posibilidades. La primera está asociada con la forma de adicionar los nutrimentos al suelo. En este ensayo, el programa de fertilización para árboles con RPR está fraccionado proporcionalmente a la cantidad de agua que se aplica a cada lado del sistema radical. De esta forma, al final del ciclo, el fertilizante queda aplicado en cantidades iguales a árboles con RC, lo cual explicaría la ausencia de deficiencias en árboles con RPR. Esta forma de aplicar el fertilizante, dio resultados similares para N en maíz bajo RPR (Hu *et al.*, 2009). La segunda alternativa está asociada con el movimiento del agua a través de la raíz del lado húmedo al lado seco, lo cual puede contribuir significativamente en la nutrición del árbol. La redistribución del agua dentro de la raíz ha sido plenamente desmostrada por Stoll *et al.* (2000) y Smart *et al.* (2005); mientras que el posible beneficio para la nutrición de la planta por este mecanismo ha quedado para futuras investigaciones.

Cosecha y postcosecha

El peso medio del fruto, firmeza, concentración de sólidos solubles y la concentración de materia del fruto

CUADRO 5. Efecto de tratamientos de riego (Tr) en la concentración nutrimental en hojas de manzano cv. Golden Delicious bajo riego comercial (RC) y riego parcial de la raíz (RPR). Valores promedio de 15 muestras compuestas por tratamiento.

Tr	Macronutrientes (%)					Micronutrientes (mm·kg ⁻¹)				
	N	P	K	Ca	Mg	Fe	Zn	Mn	Cu	B
RC	2.26 a ²	0.21 a	1.46 a	0.95 b	0.34 a	111.5 a	10.3 a	37.9 a	4.1 a	57.7 a
RPR	2.35 a	0.19 a	1.31 a	1.16 a	0.39 a	122.1 a	11.1 a	43.4 a	4.3 a	55.0 b
DMS	0.17	0.03	0.17	0.08	0.07	1.8	13.9	9.0	0.8	12.1
CV	9.1	17.3	6.1	16.7	9.4	24.5	16.6	9.9	34.2	9.3

²Promedios de tratamiento dentro de columnas con la misma letra no son diferentes a una $P \leq 0.05$ de acuerdo con la diferencia mínima significativa (DMS) de Fisher. Coeficiente de variación (CV, %).

CUADRO 6. Efecto de tratamientos de riego (TR) en algunas variables de calidad de fruto del manzano cv. Golden Delicious a la cosecha (CA) y después del almacenamiento (DA) a 23 °C y 51 % de humedad relativa. Riego completo (RC) y el riego parcial de la raíz (RPR). Peso medio del fruto (PMF), sólidos solubles totales (SST), concentración de materia seca del fruto (CMS) y peso fresco (PF). Valores promedio de 30 determinaciones por tratamiento.

TR	PMF (gramos)		Firmeza (Newtons)		SST (%)		CMS (mg·g ⁻¹ ·PF)	
	CA	DA	CA	DA	CA	DA	CA	DA
RC	92.1 a	98.4 a	84.9 a	65.8 a	15.3 a	17.8 a	185.5 a	194.5 a
RPR	87.8 a	93.9 a	87.1 a	60.0 a	16.3 a	17.8 a	193.0 a	196.7 a
DMS	16.2	9.7	9.0	6.6	1.1	1.3	11.5	15.2
CV (%)	15.1	15.1	9.3	18.4	7.0	6.5	3.4	6.7

²Promedios de tratamiento dentro de columnas con la misma letra no son diferentes a una $P \leq 0.05$ de acuerdo con la diferencia mínima significativa (DMS) de Fisher. Coeficiente de variación (CV).

CONCLUSIONES

La productividad del agua se incrementó en 59 % y se ahorró 50 % del agua con el riego parcial de la raíz; además, no influyó negativamente en el rendimiento, componentes del rendimiento, ni en la nutrición de los árboles; pero redujo el crecimiento del árbol en términos de longitud de brote y madera podada. La calidad del fruto, en términos de tamaño de fruto, firmeza, concentración de sólidos solubles totales y concentración de materia seca de los frutos, fue similar entre tratamientos a la cosecha y 18 días después en almacenamiento. Los frutos expuestos al riego parcial de la raíz tendieron a incrementar la pérdida de peso, lo cual merece mayor atención. Finalmente, el riego parcial de la raíz es una técnica potencialmente útil para la producción sustentable del manzano en el centro y norte de México, donde el agua ya es una limitante para la producción de éste y otros cultivos de importancia socioeconómica.

AGRADECIMIENTOS

Esta investigación fue parcialmente financiada por el Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología-Sistema Nacional de Investigadores, al través del proyecto con Núm. de Ref.:52538-Z. Se agradece la valiosa ayuda técnica del Sr. Pedro Hernández Castañón y la de Jorge Omar Zegbe.

LITERATURA CITADA

- BEHBOUDIAN, M. H.; MILLS, T. M. 1997. Deficit irrigation in deciduous orchards. *Horticultural Reviews* 21: 105-131.
- BRADY, N. C.; WEIL, R. R. 2000. *Elements of the Nature and Properties of Soil*. Prentice-Hall, Inc. New Jersey, USA. 559 p.
- CASPARI, H. W.; NEAL, S.; ALSPACH, P. 2004. Partial rootzone drying-A new deficit irrigation strategy for apple? *Acta Horticulturae* 646: 93-100.
- CNA (Comisión Nacional del Agua). 2008. *Estadísticas del Agua en México 2008*. Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales (ed.). México, D.F. 233 p.
- DAVIES, W. J.; WILKINSON, S.; LOVEYS, B. 2002. Stomatal control by chemical signalling and the exploitation of the mechanism to increase water use efficiency in agriculture. *New Phytologist* 153(3): 449-460.
- DODD, I. C.; EGEE, G.; DAVIES, W. J. 2008. Abscisic acid signaling when soil moisture is heterogeneous: decreased photoperiod sap flow from drying limits abscisic acid export to the shoots. *Plant, Cell & Environment* 31(9): 1263-1274.
- DU TOIT, G.; DRY, P.; LOVEYS, B. 2003. A preliminary investigation on partial rootzone drying (PRD) effects on grapevine performance, nitrogen assimilation and berry composition. *South African Journal Enology & Viticulture* 24(2): 43-54.
- HU, T.; KANG, S.; LI, F.; ZHANG, J. 2009. Effects of partial root-zone irrigation on the nitrogen absorption and utilization of maize. *Agricultural Water Management* 96(2): 208-214.
- KANG, S.; HU, X.; GOODWIN, I.; 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. *Scientia Horticulturae* 92(3-4): 277-291.

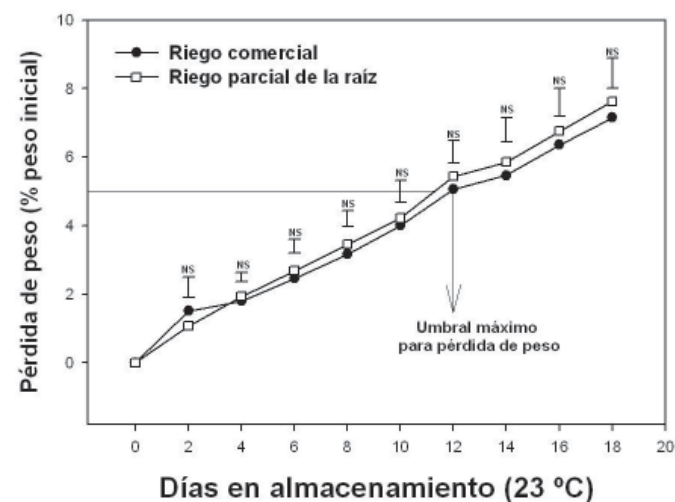


FIGURA 2. Pérdida de peso del fruto acumulado, en porcentaje del peso inicial, durante almacenamiento por 18 días a 23 °C y 51 % de humedad relativa de frutos 'Golden Delicious' sometidos a tratamientos de riego. Cada punto representa el promedio de 30 determinaciones. Las barras verticales representa la diferencia mínima significativa de Fisher y NS indica diferencias no significativas a una $P \leq 0.05$.

- KUDOYAROVA, G. R.; VYSOTSKAYA, L. B.; CHERKOZYANOVA, A.; DODD, I. C. 2007. Effect of partial rootzone drying on the concentration of zeatin-type cytokinins in tomato (*Solanum lycopersicom* L.) xylem sap and leaves. *Journal of Experimental Botany* 58(2): 161-168.
- LEIB, B. G.; CASPARI, H. W.; REDULLA, C. A.; ANDREWS, P. K.; JABRO, J. J. 2005. Partial rootzone drying and deficit irrigation of 'Fuji' apples in a semi-arid climate. *Irrigation Science* 24(2): 85-99.
- MEDINA M., MA. C.; CHÁVEZ G, J. F. J. 1999. Efecto del abastecimiento foliar del zinc sobre el balance nutrimental del nogal pecanero. *Terra* 17(4): 293-298.
- MPELASOKA, B. S.; BEHBOUDIAN, M. H.; GREEN, S. R. 2001a. Water use, yield and fruit quality of lysimeter-grown apple trees: response to deficit irrigation and to crop load. *Irrigation Science* 20(3): 107-113.
- MPELASOKA, B. S.; BEHBOUDIAN, M. H.; GANESH, S. 2001b. Fruit quality attributes and their interrelationships of 'Braeburn' apple in response to deficit irrigation and to crop load. *Gartenbauwissenschaft* 66(5): 247-253.
- MÜLLER, I.; FELLMAN, J. K. 2007. Pre-harvest application of soybean oil alters epicuticular wax crystallization patterns and resistance to weight loss in 'Golden Delicious' apples during storage. *Journal of Horticultural Science & Biotechnology* 82(2): 207-216.
- NAKAJIMA, H.; BEHBOUDIAN, M. H.; GREVEN, M.; ZEGBE-DOMÍNGUEZ, J. A. 2004. Mineral content of grape, olive, apple, and tomato under reduced irrigation. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science* 167(1): 91-92.
- PASSIOURA, J. 2006. Increasing crop productivity when water is scarce—from breeding to field management. *Agricultural Water Management* 80 (1-3): 176-196
- PEREIRA, L. S.; OWEIS, T.; ZAIRI, A. 2002. Irrigation management under water scarcity. *Agricultural Water Management* 57(3): 175-206.
- POSTEL, S. L. 2003. Securing water for people, crops, and ecosystems: New mindset and new priorities. *Natural Resources Forum* 27(2): 89-98.
- QUIÑONES, P. H. E. 1997. Necesidades Hídricas de los Cultivos. *In: Manual para Diseño de Zonas de Riego Pequeñas*. Instituto Mexicano de Tecnología del Agua, Jiutepec, Morelos, México. pp: 13-174.
- ROSEGRANT, M. W.; CAI, X. 2002. Global water demand and supply projections part 2: Results and prospects to 2025. *Water International* 27(2): 170-182.
- SMART, D. R.; CARLISLE, E.; GOEBEL, M.; NÚÑEZ, B. A. 2005. Transverse hydraulic redistribution by a grapevine Plant, *Cell & Environment* 28(2): 157-166.
- STEUDLE, E. 2001. The cohesion-tension mechanism and the acquisition of water by plant roots. *Annual Review of Plant Physiology and Plant Molecular Biology* 52: 847-875.
- STOLL, M.; LOVEYS, B.; DRY, P. 2000. Hormonal changes induced by partial rootzone drying of irrigated grapevine. *Journal Experimental Botany* 51(350): 1627-1634.
- VAN HOOIJDONK, B. M.; DORJI, K.; BEHBOUDIAN, M. H. 2007. Fruit quality of 'Pacific Rose™' apple grown under partial rootzone drying and deficit irrigation. *Journal Food, Agriculture & Environment* 5(3-4): 173-178.
- WESTWOOD, M. N. 1993. *Temperate Zone Pomology - Physiology and Culture*. Timber Press, Portland, Oregon, USA. 535 p.
- ZEGBE-DOMÍNGUEZ, J. A.; COBARRUBIAS J., M.; RUMAYOR R., A. F., REVELEST, L. R.; MEDINA G. G. 2005. Practicas culturales para producir durazno criollo en Zacatecas. Centro de Investigación Regional Norte Centro. Campo Experimental Zacatecas. Publicación Especial Núm. 15. 76 p.
- ZEGBE-DOMÍNGUEZ, J. A.; SERNA P., A.; BRAVO L., A. G. 2006. Riego parcial de la raíz en manzano 'Golden Delicious' en una zona semiárida. *Revista Fitotecnia Mexicana* 29(2): 69-73.
- ZEGBE, J. A.; BEHBOUDIAN, M. H.; LANG, A.; CLOTHIER, B. E. 2007. Respuesta del manzano cv. 'Pacific Rose™' al riego parcial de la raíz. *Revista Chapingo serie Horticultura* 13(1): 43-48.
- ZEGBE, J. A.; BEHBOUDIAN, M. H. 2008. Plant water status, CO₂ assimilation, yield, and fruit quality of 'Pacific Rose' apple under partial rootzone drying. *Advances in Horticultural Science* 22(1): 27-32.
- ZEGBE, J. A.; BEHBOUDIAN, M. H.; CLOTHIER, B. E.; LANG, A. 2008. Postharvest performance of cv. Pacific Rose™ apple grown under partial rootzone drying. *HortScience* 43(3): 952-954.