



III CONGRESO NACIONAL DE RIEGO Y DRENAJE COMIIR 2017

Puebla, Pue., del 28 al 30 de noviembre de 2017

BALANCE HÍDRICO MEDIANTE TÉCNICAS TURBULENTAS Y SENSORES DE HUMEDAD EN NOGAL (*Carya illinoensis*) EN LA COSTA DE HERMOSILLO, SONORA

Cruz-Bautista Fidencio^{1*}; Rodríguez Julio Cesar¹; Watts Christopher²; Bautista-Olivas Ana L¹.

¹Departamento de Agricultura y Ganadería. Universidad de Sonora, Hermosillo Son. México.

Correo electrónico: fidencio.cruz@unison.mx

²Departamento de Física. Universidad de Sonora, Hermosillo, Son. México

Resumen

Este artículo aborda la aplicación del balance hídrico para estimar la demanda de agua del nogal pecanero en la Costa de Hermosillo, Sonora. Se utilizó la técnica de covarianza turbulenta (Eddy Covariance) para la estimación la evapotranspiración del cultivo (ET_c). Se emplearon sensores de reflectometría de dominio de tiempo (TDR) para medir humedad del suelo y la percolación profunda. También se usaron medidores de volumen para cuantificar la cantidad de agua aplicada al cultivo, mediante riego por goteo. Los resultados obtenidos muestran que se aplican láminas de agua que exceden entre 700 a 1000 mm a la demanda real del cultivo, estimada con la ET_c. De este volumen aplicado, se pierde por percolación profunda entre 360 y 420 mm, quedando en forma almacenada y disponible para el cultivo únicamente de 400 a 700 mm de agua. Como resultado del análisis de los componentes del balance hídrico y la fenología que presenta el nogal pecanero para ésta región, se propone un calendario de riego con el cual es posible reducir entre un 20 a 30 % las láminas de riego aplicadas actualmente.

Palabras clave adicionales: Covarianza turbulenta, Evapotranspiración, Riego por goteo.



Introducción

Sonora esta entre los cinco estados sobresaliente en México por su desarrollo económico, basado principalmente en la agricultura y la ganadería. Sin embargo, la producción agrícola en zonas áridas y semiáridas de Sonora como la Costa de Hermosillo está condicionada por la disponibilidad del agua para el riego. Por ello, en Sonora se extraen alrededor de 2600 millones $\text{m}^3 \text{año}^{-1}$, de los cuales el 90% se usa en la agricultura (UNISON, 2011). Donde los frutales, y en particular el nogal son los principales consumidores del agua en esta región. Pues en la mayoría de los casos existe una tendencia general a sobre regar, aplicándose láminas de agua de hasta 2.0 m por año. Dado que en algunos casos la aplicación, frecuencia y volúmenes de riego se realiza fundamentado en experiencias anteriores y observaciones empíricas. En este sentido, es de vital importancia estimar y conocer el consumo real de agua para el nogal. Pues este cultivo representa una fuente de ingresos por su valor económico y por la demanda de mano de obra que genera en esta región (Rodríguez *et al.*, 2010).

Por ello, es necesario redoblar esfuerzos hacia una mayor eficiencia en el aprovechamiento del agua, toda vez que las restricciones en las dotaciones de este recurso son cada vez mayores. Además de disminuir el impacto en el deterioro del medio ambiente y la preservación de los acuíferos de la región.

Por lo tanto, es importante determinar el momento oportuno y la lámina de agua por aplicar en cada riego mediante técnicas integrales como es el concepto de balance hídrico (BH). Pues la determinación del BH permite entender el proceso de transferencia del agua en el sistema suelo-planta-atmósfera (Allen, 2003; Rodríguez *et al.*, 2010). En otras palabras, para mejorar la eficiencia del uso del agua en el nogal es necesario evaluar su consumo diario mediante técnicas como el contenido de humedad del suelo o la evapotranspiración del cultivo (ETc). Pues resulta que la ETc es un componente fundamental del BH y un factor clave en la interacción entre la cubierta vegetal y la atmósfera. En este razonamiento, Sammis *et al.*, (2004) y Bawazir y King (2004) midieron la evapotranspiración en huertas de nogal y determinaron una ETc estacional y anual de alrededor de 1300 y 1450 mm respectivamente. Pero las dificultades para la medición de la ETc y el resto de los componentes de la ecuación de BH se incrementan por la complejidad de los procesos que intervienen en el sistema suelo-planta-atmósfera. Sin embargo, la comprensión del BH y la cuantificación de los términos que lo constituyen permitirá caracterizar los procesos de transferencia hídrica, que a su vez permitirán la mejora y optimización del riego (Er-Raki *et al.*, 2006; Ghiberto *et al.*, 2011).

Debido a lo anterior y con la finalidad de ofrecer un soporte operacional en el proceso de toma de decisiones de cuándo y cuánto regar, el objetivo en este trabajo fue estimar el balance hídrico en nogal pacanero durante los ciclos 2009, 2010 y 2017 en la Costa de Hermosillo, Sonora.



Materiales y métodos

Este trabajo se ha estado realizando en una huerta de nogal pecanero con una superficie de 60 ha (600 x 1000 m) en el predio Viñas de la Costa de Hermosillo (28° 55' 25", -111° 17' 59") (Figura 1). El sistema de plantación de nogal es 6 m entre planta y 12 m entre líneas y fue plantado entre 1999-2000. En este sitio se tiene instalada una torre micro-meteorológica de 12 m de altura. En la parte aérea de la torre se tienen sensores para medir radiación neta (R_n), temperatura (T) y humedad del aire. También se tiene instalado un medidor de dióxido de carbono (CO_2) y vapor de agua (H_2O), modelo EC150 y un anemómetro sónico CSAT3 (Campbell Utah, USA). Los cuales miden el CO_2 , vapor de agua, flujos de calor sensible (H) y calor latente (LE).

Los datos de H y LE se registran y almacenan a una frecuencia de 10Hz en un datalogger CR1000 (CampbellSci, USA). Los datos de R_n , T y humedad del aire se muestrean a cada 30 s y se almacenan los promedios cada 30 min en un datalogger CR10X (CampbellSci, USA). En el suelo se instalaron sensores de reflectometría de dominio de tiempo (TDR) para medir humedad y temperatura a un perfil de 0 a -1.0 m. También se instaló un sensor para medir percolación a 1.2 m de profundidad. Estos sensores se conectaron a un Datalogger CR510x Campbell. La medición del contenido de agua en el suelo se realizó a intervalo de 0.1 Hz, almacenando valores promedios a cada 30 min.

El sistema de riego es por goteo con manguera tipo RAM, con un gasto por gotero de $2.6 Lh^{-1}$ espaciados a 0.75 m y con una presión de $1.5 kg cm^{-1}$. Las líneas de riego están espaciadas a 2.0 m, dos líneas en cada lado del tallo del nogal. Donde la primera línea de riego se ubica a 2 m del tallo y la segunda a 1.5 m de la primera., dando un promedio de seis goteros por árbol.

Así mismo, se han instalado medidores de volumen en varias líneas de riego para cuantificar la cantidad de agua aplicada.

Balance hídrico

La aplicación del balance hídrico para estimar las entradas y salidas de agua en el nogal para un intervalo de tiempo Δt , considerando una capa de suelo de espesor z_r , limitada en la parte superior por la superficie del suelo y el límite inferior a la profundidad z_r , donde ya no existan raíces, se resolvió con la expresión (Pereira *et al.*, 2010):

$$\theta_i = \theta_{i-1} + \frac{(P_i - Q_{ri}) + I_{ni} - ET_{ci} - DP_i + GW_i}{1000z_{ri}} \quad (1)$$

donde: θ_i , es el contenido de agua del suelo en la zona radical ($mm mm^{-1}$) en el día i ; θ_{i-1} , es el contenido de agua del suelo en la zona radical ($mm mm^{-1}$) en el día $i-1$; P_i , es la precipitación en el día i (mm); Q_{ri} , es la escorrentía superficial en el día i

(mm); I_{ri} , es la lámina de riego en el día i (mm), o la cantidad de agua de riego que realmente se infiltra para su almacenamiento en la zona radical; ET_{ci} , es la evapotranspiración del cultivo en el día i (mm); DP_i , es la percolación en el día i (mm), y GW_i , es el flujo acumulado de ascensión capilar en el día i (mm).

La variación de la reserva de agua en el suelo en el intervalo Δt es función del contenido de humedad (θ) del mismo, el cuál varía en profundidad (z) y en el tiempo (t). El balance hídrico en la zona radicular del nogal para un intervalo de tiempo Δt , considerando las entradas y salidas de agua se realizó a escala mensual, sumando los datos a escala diaria.



Figura 1. Sitio experimental de Nogal pecanero en huerta Viñas de la Costa en la Costa de Hermosillo, Sonora.

Evapotranspiración

La cuantificación de la evapotranspiración del cultivo (ET_c) se realizó mediante la técnica de covarianza turbulenta (EC, Eddy Covariance) y con el programa ECPACK (Van Dijk *et al.*, 2003). Para lo cual se realizaron correcciones por temperatura y dirección de vientos a los datos de flujo de calor sensible (H), calor latente (LE) y dióxido de carbono (CO_2) colectados por el sensor EC150 y el CSAT3.



El cálculo de flujos mediante EC se obtuvo con la siguiente ecuación:

$$F = \rho_a \overline{e'q'} \quad (2)$$

donde; F es el flujo de LE (Wm^{-2}), H (Wm^{-2}) y CO_2 ($\text{mg m}^{-2} \text{s}^{-1}$), ρ_a densidad del aire (kg m^{-3}), $\overline{e'q'}$ covarianza de las fluctuaciones de la entidad en estudio (agua, calor, dióxido de carbono, metano, etc.) y velocidad vertical del viento (m s^{-1}) respectivamente.

En el caso de la evapotranspiración de referencia (ET_o) se obtuvo mediante la aproximación de Penman-Monteith-FAO 56, (Allen *et al.*, 1998).

$$ET_o = \frac{0.408\Delta(R_n - G) + \gamma \frac{900}{T + 273} u_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0.34u_2)} \quad (3)$$

donde; ET_o es la evapotranspiración de referencia (mm día^{-1}), R_n es radiación neta ($\text{MJ m}^{-2} \text{ día}^{-1}$), G es flujo de calor del suelo ($\text{MJ m}^{-2} \text{ día}^{-1}$), T es la temperatura del aire promedio diario ($^{\circ}\text{C}$), Δ pendiente de la curva de presión a saturación a T ($\text{kPa } ^{\circ}\text{C}^{-1}$), γ constante psicrométrica ($\text{kPa } ^{\circ}\text{C}^{-1}$), e_s presión de saturación del vapor a T (kPa), e_a presión de vapor promedio diario (kPa), u velocidad de viento promedio diario a 2 m de elevación (m s^{-1}).

Análisis y discusión de resultados

El balance hídrico en la zona radical del nogal para un intervalo de tiempo Δt , considerando las entradas y salidas de agua se muestra en el Cuadro 1. En este cuadro se observa una lámina de agua por riego total de 2,020 mm para el ciclo 2009, la cual es superior en un 35% al valor de ET_c calculada para este ciclo.

En el caso de los ciclos productivos 2010 y 2017, hasta el mes de septiembre que es donde se tienen los datos completos, la lámina de riego contabilizada fue de 1928 y 1530 mm, que superan en 52 y 33% al valor de la ET_c calculada (Figura 1). Es decir que se aplican láminas de agua que exceden alrededor de 700 y 1000mm a la demanda estimada con la ET_c . De este volumen aplicado, se pierde por percolación profunda entre 360 y 420 mm, quedando en forma almacenada y disponible para el cultivo únicamente de 400 a 700 mm de agua (Tabla 1).



Tabla 1. Componentes del balance hídrico en Nogal pecanero, durante los ciclos 2009, 2010 y 2017 en la Costa de Hermosillo México.

Mes	Ciclo 2009							Ciclo 2010							Ciclo 2017
	(mm)							(mm)							(mm)
	Riego	Lluvia	Per- colación	ETc	ETo	Alm.	Kc	Riego	Lluvia	Per- colación	ETc	ETo	Alm.	Kc	Riego
Ene	0	0,0	0	11	84	-11,0	0,13	39	15,9	9	32	88	14,4	0,36	66
Feb	27	1,1	2	13	107	13,1	0,12	14	19,9	3	34	111	-3,5	0,31	24
Mar	334	0,0	28	50	151	256,4	0,33	63	0,7	14	37	178	12,1	0,21	96
Abr	134	0,0	21	92	189	21,7	0,49	213	0,6	47	98	202	69,1	0,48	218
May	296	0,0	66	156	218	73,8	0,72	260	0,1	66	154	245	39,9	0,63	186
Jun	224	13,2	52	155	189	30,6	0,82	307	0,0	52	150	236	104,6	0,64	278
Jul	223	10,3	35	223	197	-24,6	1,13	379	6,6	83	155	203	147,5	0,76	254
Ago	278	26,4	61	213	196	29,9	1,09	344	90,9	76	137	189	222,7	0,72	255
Sep	174	5,6	38	202	170	-60,7	1,19	310	7,6	68	129	163	120,8	0,79	154
Oct	104	7,0	27	99	136	-15,1	0,73	-	-	-	-	-	-	-	80
Nov	146	0,4	32	64	97	50,0	0,66	-	-	-	-	-	-	-	-
Dic	81	0,0	0	38	86	43,1	0,43	-	-	-	-	-	-	-	-
Total	2021	64,0	363	1315	1817	407,2		1928	142,3	418	925	1615	727,5		1610

Las láminas de agua aplicada en estos ciclos supera entre un 30 y 50% a lo reportado por Sammis *et al.*, (2004) y Bawazir y King, (2004), para una huerta de nogal en producción. Estas láminas superan en la misma proporción a las láminas reportadas por Valdez *et al.* (2010) para riegos presurizados en la Costa de Hermosillo.

Sin embargo, lo anterior se debe a que en la mayoría de los casos hubo un sobre riego; es decir, que los volúmenes de agua aplicados no correspondieron a la demanda real del cultivo.

Otro de los componentes importantes del balance hídrico, es la evapotranspiración real del cultivo (ETc), que muestra discrepancia con la evapotranspiración de referencia (ETo), siendo superior la ETo entre un 38 y 74 %. Sin embargo, el valor de la ETo estimado es similar a lo reportado por Valdez *et al.* (2010), pero inferior a lo estimado por Brown (2010) para la Costa de Hermosillo. En cambio, los valores de ETc obtenidos para los ciclos 2009 y 2010 muestra gran similitud con los valores de ET estacional y anual de alrededor de 1300 y 1450 mm para huertas de nogal, reportados por Sammis *et al.*, (2004) y Bawazir y King (2004).

Analizando el último componente de la ecuación de balance hídrico, que es la percolación, resulta que esta variable representa alrededor del 18 al 22 % del agua aplicada. Es decir que ésta es la proporción del agua aplicada que se pierde en la mayoría de los riegos, alcanza profundidades superiores a 1.2 m. La cual no se

aprovechada de manera eficiente por el sistema radical. De acuerdo con Sammis *et al.*, (2004), Bawazir y King (2004) y Rodríguez *et al.*, (2010) una huerta de nogal en producción puede consumir una lámina de alrededor de 1.4 m de agua por año.

En la figura 2 se muestra el comportamiento mensual del riego para los ciclos 2009, 2010 y 2017. También se muestra la ET_o y ET_c para los ciclos 2009 y 2010. En la figura 2 se observa que las láminas de agua que se aplicaron exceden entre 33 y 52 % a la demanda estimada con la ET_c , y entre 10 y 35 % a la estimada con la ET_o . Lo que superan entre 500 a 1000 mm a la ET_c y de 20 y 310 mm a la ET_o , es decir que en tres ciclos analizados hubo un sobre riego. Se observa que durante el ciclo 2010 fue cuando se aplicó la mayor cantidad de agua.

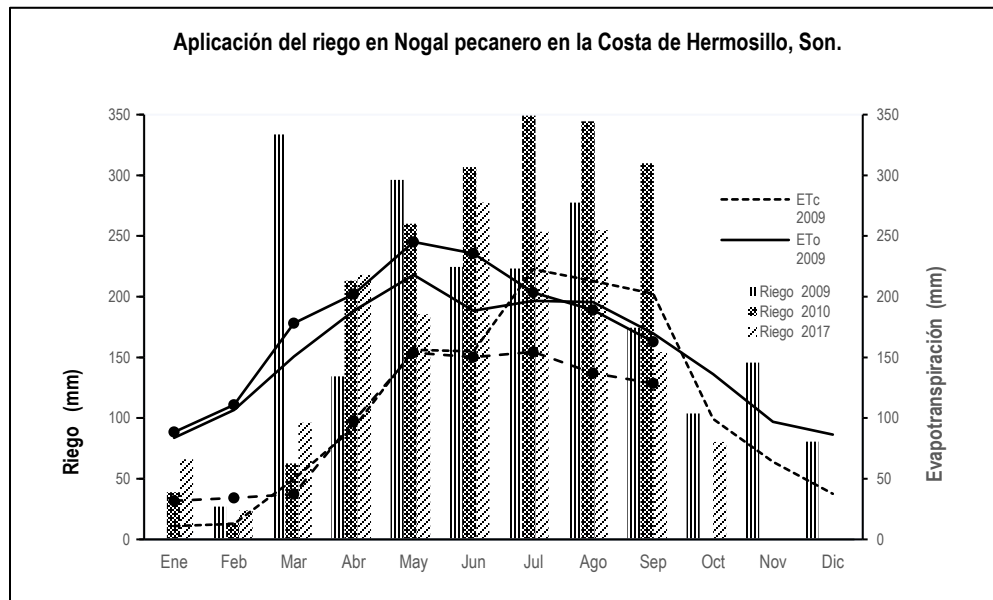


Figura 2. Distribución mensual del riego, evapotranspiración de referencia y la evapotranspiración del cultivo para Nogal pecanero en Costa de Hermosillo, durante los ciclos 2009, 2010 y 2017.

Si se analiza la tendencia del riego durante el ciclo 2009 y se extrapola para los ciclos 2010 y 2017, entonces al totalizar la cantidad de agua aplicada al término del ciclo 2010 esta sería de alrededor de 2260 y 1860 mm. También se aprecia que en el ciclo 2017 ha habido una disminución del volumen de agua aplicada de entre 8 a 18 % con respecto a los ciclos 2009 y 2010, respectivamente.

Sustentado en los resultados de este análisis y a la fenología que presenta el nogal pecanero para la Costa de Hermosillo, se propone el siguiente calendario de riego (Tabla 2).



Tabla 2. Láminas de riego propuesto para Nogal pecanero, en la Costa de Hermosillo México.

Mes	Ene	Feb	Mar	Abr (10)	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Total
Riego (mm)	30	0	0	180	170	190	240	230	220	110	80	50	1500

Este calendario considera aplicar el primer riego a partir de la primera semana de abril. Donde se sugiere aplicar una lámina de 180 mm, la cual es función de la capacidad de retención de humedad del suelo., pues en esta etapa se inicia la brotación del follaje del nogal. Los riegos subsecuentes están fundamentados en la ETc más el 10 % de la lámina correspondiente, para la formación de follaje, frutos y materia seca. Si se implementa esta calendarización y las láminas sugeridas, el uso consuntivo del nogal sería de alrededor de 1500 mm al término del ciclo productivo (Figura 3). Lo que representa un ahorro de agua de 22 a 35 % con respecto a los ciclos 2009, 2010 y 2017.

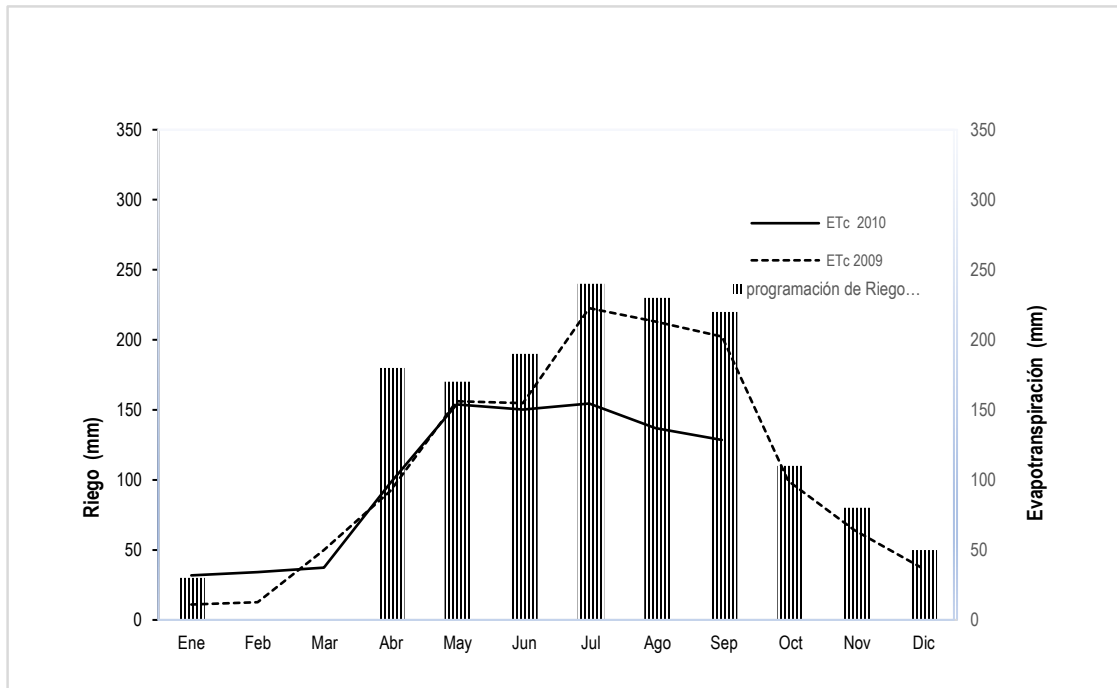


Figura 3. Propuesta de calendarización y láminas de riego para Nogal pecanero, en la Costa de Hermosillo, México.



Conclusiones

Bajo el concepto del balance hídrico (BH) es posible determinar el momento oportuno de riego y la lámina de agua a aplicar en el nogal pecanero en la Costa de Hermosillo. Pues la tecnificación del riego no se ha reflejado en una disminución de las láminas de agua aplicada a este cultivo, como se ha mostrado en este análisis.

Con la implementación del concepto de BH es posible reducir hasta en un 20 a 30 % la lámina de riego aplicada al nogal pecanero. Lo que permitirá hacer un uso eficiente del agua, sin mayor impacto en los rendimientos., toda vez que las restricciones en las dotaciones de este recurso son cada vez mayores en esta región del Estado de Sonora.

Para la estimación precisa del BH es necesario conocer y evaluar cada uno de sus componentes, particularmente la evapotranspiración y la percolación.

Se debe garantizar buena transferencia de la tecnología a los usuarios del agua, mediante acciones de capacitación. Pues en la mayoría de los casos existe una tendencia general a sobre-regar, debido a que en algunos casos la aplicación, frecuencia y volúmenes de riego se realiza fundamentado en experiencias anteriores y no en las demandas de evapotranspiración del cultivo.

Referencias bibliográficas

- Allen, R.G., Pereira L.S., Smith, M., Raes, D., Wright, J.L. 2003. The FAO-56 dual crop coefficient method for predicting evaporation from soil and application extensions. *J. Irrig. Drain. Engng. ASCE*.
- Allen R.G., Tasumi M., Morse A., Trezza R. 2005. A Landsat-based energy balance and evapotranspiration model in Western US water rights regulation and planning, *Irrigation and Drainage Systems*, 19: 251-268.
- Bawazir, A.S., J.P. King. 2004. Crop Evapotranspiration (ET) Study for Doña Ana County, New Mexico. Water Resources Research Institute, Las Cruces, NM. (Technical Completion Report)
- Brown, P.W. 2010. Pecan water use estimates for Southern Arizona and Northern Mexico. XI Simposio internacional de nogal pecanero, 9-10 Septiembre., Hermosillo, Sonora, México. 54-61pp.
- Er-Raki, M., M.Hasnaoui A., Amahmid M.Mamou. 2006. Soret effect on the boundary layer flow regime in a vertical porous enclosure subject to horizontal heat and mass fluxes. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 49 (17-18), 3111-3120



- Gardea, A. A., J. A. Orozco-Avitia, A. Romo-Chacón. 2010. Efecto del cambio climático en el cultivo del nogal pecanero. XI Simposio internacional de nogal pecanero, 9-10 Septiembre., Hermosillo, Sonora, México.45-47pp.
- Ghiberto, P.J., P.L.Libardi., A.S.Brito.,P.C.O.Trivelinb. 2011. Components of the water balance in soil with sugarcane crops. Agricultural Water Management. Vol. 102: (1), 1-7.
- Pereira, L. S., de Juan V.J.A., Picornell, B. M.R. y Tarjuelo, M.B. 2010. El Riego y sus Tecnologías. 1ª Edición en castellano. Albacete, España. 296 p.
- Rodriguez, J.C., Grageda J., Watts C.J., A. Garatuza-Payan J., Castellanos-Villegas A., Rodriguez-Casas J., Saiz J., Olavarrieta V. 2010. Water use by perennial crops on the lower Sonora watershed, Journal of Arid Environment, 74:603-610.
- Sammis, T.W., J.G. Mexal y D. Millar. 2004. Evapotranspiration of food-irrigated pecans, Agric. Water Management, 69:179-190.
- UNISON, Universidad de Sonora. 2011. Estudio sobre la Situación de la Tecnificación del Riego en el Estado de Sonora. Hermosillo, Sonora. Reporte técnico,111p
- Valdez-Gascón, B., L. J. Durón-Noriega, J. E. Ortiz-Enriquez, J. M. Ramírez-Díaz y R. Sesma-León. 2010. ahorro de agua en huertas de nogal pecanero *Carya illinoensis* (Wangenh.) K.Koch] con apoyo de monitoreo de humedad. XI Simposio internacional de nogal pecanero, 9-10 septiembre., Hermosillo, Sonora, México.83-87pp.