

Programación del riego en nogal pecanero (*Carya illinoensis*), mediante un modelo integral basado en tiempo térmico*

Irrigation scheduling in pecan (*Carya illinoensis*), through an integrated model based on thermal time

Ernesto Sifuentes Ibarra¹§, José Alfredo Samaniego Gaxiola², Antonio Anaya Salgado², Jesús Humberto Núñez Moreno³, Benjamín Valdez Gascón³, Rosario Guadalupe Gutiérrez Soto⁴, Jesús del Rosario Ruelas Islas⁴ y Jaime Macías Cervantes¹

¹Campo Experimental Valle del Fuerte-INIFAP. Carretera Internacional México-Nogales, km 1609, Juan José Ríos, Sinaloa, México. ²Campo Experimental La Laguna-INIFAP, Blvd. José Santos Valdez 1200 Pte., Col. Centro Matamoros, Coahuila. C. P. 27440. ³Campo Experimental Costa de Hermosillo-INIFAP, Pascual Encinas Félix No. 21, Col. La Manga, Hermosillo, Sonora. C. P. 83200. ⁴Escuela Superior de Agricultura del Valle del Fuerte- UAS, Calle 16 y Av. Japaraqui, Juan José Ríos, Ahome, Sinaloa, C. P. 81110. §Autor por correspondencia: sifuentes.ernesto@inifap.gob.mx.

Resumen

En los últimos años México se ha colocado entre los principales países productores de nuez en el mundo con más de 44 000 ha establecidas principalmente en las zonas de riego del norte, donde la disponibilidad de agua es escasa. La mayoría de los estudios reportan una alta demanda de agua de este cultivo superior a los 1 100 mm anuales, lo cual incrementa la competencia por este recurso, agudizándose en períodos de sequía. La programación del riego en tiempo real basada en tiempo térmico (grados día) ha tenido gran aplicación en granos y hortalizas en el estado de Sinaloa, México, permitiendo manejar escenarios de disponibilidad hídrica y manejo, con ahorros de agua de 1 600 m³ ha⁻¹ en maíz, sin reducción de rendimientos. En este estudio se adecuó y parametrizó el modelo base anterior para el cultivo de nogal pecanero adulto, en un huerto de la Comarca Lagunera de Coahuila, México, para lo cual se determinaron experimentalmente los parámetros del modelo relacionados con el coeficiente del cultivo (Kc), profundidad dinámica de raíz (Pr) y abatimiento de la humedad del suelo (f), todos en función de la acumulación de tiempo térmico. La validez del modelo se determinó mediante comparaciones entre las variables medidas y modeladas de fenología del cultivo,

Abstract

In recent years, Mexico has been placed among the main producers of walnuts in the world with more than 44 000 ha, established mainly in the irrigated areas of the north, where water availability is scarce. Most studies report a high demand for water from this excess of 1 100 mm annual crop, which increases competition for this resource, more acute in periods of drought. Irrigation scheduling in real time based on thermal time (degree day) has been widely used in grains and vegetables in the State of Sinaloa, Mexico, allowing water availability scenarios handle and use, with water savings of 1 600 m³ ha⁻¹ in maize, without reducing yield. This study was adapted, through a parameterization of the previous base model for growing pecan, in an orchard of Laguna Region of Coahuila, Mexico, for which the model parameters were determined experimentally related to the crop coefficient (Kc), dynamic root depth (Pr) and abatement of soil moisture (f), all based on the thermal time accumulation. The validity of the model was determined by comparisons between measured and modeled variables of phenology, temporal variation of the moisture content in the soil profile and yield. The model estimated a requirement irrigation of 741 mm for the sprouting starting period to

* Recibido: mayo de 2015
Aceptado: noviembre de 2015

variación temporal del contenido de humedad en el perfil de suelo y rendimiento. El modelo estimó un requerimiento de riego de 741 mm para el período de inicio de brotación a cosecha (no se consideraron riegos de pre-brotación), con una acumulación total de 2 449.54 grados día. También permitió modelar la variación de la duración de las etapas fenológicas en diferentes fechas de brotación, la cual fue superior a 20 días calendario para la mayoría de las etapas, lo cual afecta el manejo del cultivo, también fue posible generar calendarios de riego para diferentes fechas de siembra, suelos y sistemas de riego.

Palabras clave: contenido de humedad, etapas fenológicas, nuez, sistemas de riego.

Introducción

México es de los principales países productores de nogal pecanero [*Carya illinoensis* (Wangehn.) K. Koch] en el mundo, llegando a establecer más de 44 000 hectáreas (Martínez y Núñez, 2007) y su producción se encuentra en zonas áridas y semiáridas del país, por lo que el agua es el factor principal de manejo agronómico que le permite alcanzar una eficiencia fotosintética para una mayor producción (Godoy-Ávila y López-Montoya, 2000) ya que el consumo de agua del nogal es alto comparado con el de otros cultivos (Andales *et al.*, 2006; Wang *et al.*, 2007).

Los requerimientos de riego en cultivos, varían temporal y espacialmente en función del clima, manejo, fase de crecimiento y la variedad sembrada, por lo que su cálculo debe ser hecho de manera local (Ojeda *et al.*, 2006). La incorporación del concepto de días grado-crecimiento para describir los parámetros asociados a la calendarización del riego, es una alternativa factible que permitirá tener mayor control sobre el uso eficiente del agua (Barboza *et al.*, 2007).

Debido a que este cultivo requiere altas cantidades de agua para su producción, cada vez se pondrá en riesgo su permanencia, su requerimiento hídrico es muy variable con rangos de 1 170 y 1 310 mm por año para los árboles adultos por lo que se considera un cultivo de alta demanda. De acuerdo a reportes realizados para el área de Arizona USA y Hermosillo México, se encontró que la estimación anual del requerimiento hídrico del nogal pecanero fluctúa entre los rangos de 1 234 mm en Bonita, Arizona y 2 091 mm cerca de Hermosillo, Sonora; este incremento dramático

harvest (pre-sprouting irrigations were not considered) with a total degree days accumulation of 2 449.54. It also allowed to model the variation in the length of the phenological stages at different times of sprouting, which was higher than 20 calendar days for most of the stages, which affects crop management, it was also possible to generate irrigation schedules for different planting dates, soil and irrigation systems.

Keywords: irrigation systems, moisture content, nut, phenological stages.

Introduction

Mexico is one of the main producing countries of pecan [*Carya illinoensis* (Wangehn.) K. Koch] in the world, coming to establish more than 44 000 hectares (Martinez and Nuñez, 2007) and its production is in arid and semi-arid areas the country, water is the main factor of agricultural management that allows to reach a photosynthetic efficiency for higher output (Godoy-Ávila and López-Montoya, 2000) as the water consumption of the walnut is high compared to the other crops (Andales *et al.*, 2006; Wang *et al.*, 2007).

The crop irrigation requirements, temporally and spatially vary depending on the weather, management, growth phase and the variety sown, so the calculation must be done locally (Ojeda *et al.*, 2006). Incorporating the concept of grade-growth days to describe the parameters associated with irrigation scheduling is a feasible alternative that allow more control over the efficient use of water (Barboza *et al.*, 2007).

Because this crop requires large amounts of water for production, increasingly jeopardize its permanence, its water requirement varies widely ranges from 1 170 to 1 310 mm per year for adults trees, so it is considered a cultivation of high demand. According to reports made to the area of Arizona USA and Hermosillo Mexico, it was found that the annual estimated water requirement for pecan ranges from 1 234 mm in Bonita, Arizona and 2091 mm near Hermosillo, Sonora; This dramatic increase in the use of water in low-lying areas is due to the combined effects of high demand evapotranspiration (ET) and long cycles (Brown, 2010).

In Mexico, around 840 million cubic meters of water are used every year to irrigate 60 000 hectares (Godoy and Huitron, 1998). Miyamoto (1983) and Worthington *et al.*

en el uso del agua en las áreas de baja elevación es debido a los efectos combinados de alta demanda evapotranspirativa (ET) y ciclos largos. (Brown, 2010).

En México se utilizan cada año alrededor de 840 millones de metros cúbicos de agua para el riego de 60 000 hectáreas (Godoy y Huitron, 1998). Miyamoto (1983) y Worthington *et al.* (1992) encontraron que de 500 huertas, 95% fueron regadas con agua del subsuelo aplicada por inundación con eficiencia de 50%, esto ocasiona que a nivel parcelario se utilicen altos volúmenes de agua, que en el nogal exceden en 40% los requerimientos hídricos.

Los árboles de las huertas en riegos mal manejados, muestran baja producción (0.8 t ha^{-1}) y calidad (ruezo pegado, germinación de la nuez y falta llenado de fruto), que está asociado con estrés hídrico causado por una inadecuada programación de los riegos principalmente en llenado de almendra (Stein *et al.*, 1989; Herrera, 1990; Sparks, 1995c).

Aunado a lo anterior, la variabilidad climática propia de cada región cada vez más acentuada por efecto del cambio climático, está provocando alteraciones en el ciclo fenológico de los cultivos y consecuentemente en sus requerimientos hídricos (Sifuentes *et al.*, 2014). Ante esta situación se han utilizado modelos de programación integral del riego basado en tiempo térmico en granos y hortalizas en Sinaloa que han permitido acoplar las demandas hídricas de los cultivos a esta variación y afrontar periodos de baja disponibilidad hídrica (Sifuentes *et al.*, 2014). En el presente trabajo se adecuó un modelo integral basado en el concepto tiempo térmico al cultivo de nogal pecanero en la Comarca Lagunera de Coahuila, para la programación precisa del riego. autoajustable a variabilidad térmica y aplicable a cualquier fecha de trasplante o brotación, suelos, sistemas de riego y manejo.

Materiales y métodos

El estudio se realizó en una plantación localizada en el ejido Hormiguero, municipio de Matamoros de la Laguna, Coahuila, ubicada a los $25^{\circ} 41' 15''$ de latitud norte y $103^{\circ} 19' 52''$ longitud oeste. El clima es semiárido con una altura sobre el nivel medio del mar de 1 150 metros (Medina, 1998). La temperatura promedio anual es de 18 a 22 °C, presentándose las máximas en los meses de mayo a agosto, alcanzando valores superiores a 35 °C durante el día y de 18 a 20 °C durante la noche. El suelo es profundo, predominantemente franco arcillo-limoso, densidad aparente 1.23 g cm^{-3} , materia

(1992) found that 500 orchards, 95% were irrigated with groundwater applied by flooding with 50% efficiency, this causes a farm level high volumes of water, in the walnut exceed 40% water requirements used.

Trees in orchards mismanaged irrigation show low production (0.8 t ha^{-1}) and quality (glued husk, walnut germination and lack of fruit filling), which is associated with water stress caused by improper programming irrigation, mainly for almond filling (Stein *et al.*, 1989; Herrera, 1990; Sparks, 1995c).

In addition to this, the very climate variability of each ever increasing impact of climate change by region, is causing changes in the phenological cycle of the crop and, consequently their water requirements (Sifuentes *et al.*, 2014). Faced with this situation they have been using models for integrated irrigation scheduling based on thermal time in grains and vegetables in Sinaloa that have allowed coupling the water demands of crops regarding this variation and facing periods of low water availability (Sifuentes *et al.*, 2014). In this work, an integrated model concept was adapted, based on the thermal time pecan cultivation in the Laguna Region of Coahuila, for programming precise irrigation, self-adjusting to temperature variability and applicable to any transplant date or sprouting, soil, irrigation and management.

Materials and methods

The study was conducted in a plantation located in the ejido Hormiguero, Matamoros de la Laguna, Coahuila, located at $25^{\circ} 41' 15''$ north latitude and $103^{\circ} 19' 52''$ west longitude. The climate is semi-arid with a height above sea level of 1150 meters (Medina, 1998). The annual average temperature is 18-22 °C, presenting the highest in the months of May to August, and reaching values above 35 °C during the day and 18-20 °C overnight. The soil is deep, predominantly Franco clay loam, bulk density 1.23 g cm^{-3} , 1.31% organic matter and soil moisture of $0.1542 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$. A study section of 0.168 hectares with trees of 22 years old, Western variety distributed real-frame of 14 x 14 m, which resulted in the removal of trees alternately whose original distribution was 7 x 14 m was used; sprouting date was March 20, 2014.

As a source of climate information in real-time, an automated agroclimatic station was used in the Experimental Field La Laguna (CELALA) installed 10

orgánica 1.31% y humedad aprovechable de 0.1542 cm³ cm⁻³. Se utilizó una sección de estudio de 0.168 hectáreas con árboles de 22 años de edad variedad Western distribuidos en marco real de 14 x 14 m, el cual resulto de la eliminación de árboles en forma alternada cuya distribución original era de 7 x 14 m; la fecha de brotación fue el 20 de marzo de 2014.

Como fuente de información climática en tiempo real se utilizó una estación agroclimática automatizada ubicada en el Campo Experimental La Laguna (CELALA) instalada a 10 km de la parcela, la cual monitoreó en forma permanente a intervalos de 15 min las variables: temperatura del aire, humedad relativa, radiación solar, precipitación, velocidad y dirección del viento, estimando además evapotranspiración de referencia (ET_o) con la ecuación de Penman-Monteith simplificada por Allen *et al.* (2006).

El modelo base de programación del riego basado en tiempo térmico fue el generado por Ojeda *et al.* (2006), cuyos componentes se presentan en el Cuadro 1.

km of the plot, which permanently monitored at intervals of 15 min the variables: air temperature, relative humidity, solar radiation, precipitation, wind speed and direction, besides estimating reference evapotranspiration (ET) with the Penman-Monteith simplified by Allen *et al.* (2006).

The basic model for irrigation scheduling, based on thermal time model was generated by Ojeda *et al.*, (2006), whose components are presented in Table 1.

Where: K_{co} is the coefficient for the first crop phenological stage which depends essentially on the soil evaporation, K_{max} is the maximum value of K_c during development, XK_{máx} corresponds to an auxiliary variable defined by GDA when the crop has its maximum crop coefficient, α₁ is a regression parameter obtained by fitting experimental data, erfc is the complementary function of x an auxiliary variable error calculated with the following expression:

**Cuadro 1. Modelo base de programación integral del riego para cultivos anuales en Sinaloa (Ojeda *et al.* (2004).
Table 1. Basic model of comprehensive irrigation scheduling for annual crops in Sinaloa (Ojeda *et al.* (2004).**

Variable	Modelo	Parámetro
Coefficiente de cultivo	$K_c = K_{max} \operatorname{erfc}\left(\left(\frac{x - X_{K_{max}}}{\alpha_1}\right)^2\right)$ si $K_c < K_{co}$, entonces $K_c = K_{co}$	K_{max} XK_{max} α_1 K_{co}
Profundidad radical	$P_r = P_{ro} + (P_{rmax} - P_{ro}) \left\{ 1 - \exp\left[-\frac{(GDA_n)^2}{\alpha_2^2}\right] \right\}$	P_{ro} P_{rmax} α_2
Factor de abatimiento	$f_n = \alpha_3 - \alpha_4 K_{cn}$	α_3 α_4

Donde: K_{co} es el coeficiente de cultivo para la primera etapa fenológica la cual depende esencialmente de la evaporación del suelo, K_{máx} es el máximo valor de K_c durante su desarrollo, XK_{máx} corresponde a una variable auxiliar definida por los GDA cuando el cultivo tiene su máximo coeficiente de cultivo, α₁ es un parámetro de regresión obtenido mediante ajuste de datos experimentales, erfc es la función complementaria del error y x es una variable auxiliar calculada con la siguiente expresión:

$$X = \frac{GDA}{\alpha_0}$$

$$X = \frac{GDA}{\alpha_0}$$

Where: GDA are accumulated degree days from planting or emergence to a particular time or α and GDA are required to maturity. Pro and PRMAX represent the planting depth and maximum root depth respectively, the value α₂ model is adjusted empirically worth about 2/3 of GDA value where the crop reaches maximum rooting depth. The values of the parameters α₃ and α₄ for abatement factor f are calibrated considering the sensitivity to water stress and crop management practices for irrigation system.

Donde: GDA son los grados día acumulados desde la siembra o emergencia hasta un tiempo determinado y α_0 son los GDA requeridos hasta alcanzar la madurez. Pro y Prmáx representan la profundidad de siembra y profundidad máxima de la raíz respectivamente, el valor α_2 del modelo es ajustado empíricamente de un valor aproximado a 2/3 del valor GDA donde el cultivo alcanza la profundidad radical máxima. Los valores de los parámetros α_3 y α_4 para el factor de abatimiento f son calibrados considerando la sensibilidad del cultivo al estrés hídrico y las prácticas del manejo por sistema del riego.

Para la parametrización del modelo en nogal pecanero, se monitoreó la fenología a partir de la brotación de acuerdo a la metodología propuesta por Godoy *et al.* (2000), los grados día (GD) o tiempo térmico se asociaron a cada etapa calculándose de la siguiente manera (Ojeda *et al.*, 2006):

$$\begin{aligned} \text{GD} &= T_a - T_{c-\text{min}}, \text{ si } T_a < T_{c-\text{max}} \\ \text{GD} &= T_{c-\text{max}} - T_{c-\text{min}}, \text{ si } T_a \geq T_{c-\text{max}} \\ \text{GD} &= 0, \text{ si } T_a \leq T_{c-\text{min}} \end{aligned}$$

Donde: T_a es la temperatura ambiente, $T_{c-\text{min}}$ es la temperatura crítica mínima del cultivo (15 °C); $T_{c-\text{max}}$ es la temperatura crítica máxima del cultivo (40 °C) (Santamaría *et al.*, 1969).

Kmax fue tomado de Stein y Worthington (1996), mientras que la profundidad de raíz se realizó mediante muestreos directos en pozos agrológicos de 0.50 m x 1.5 m x 2 m, donde se determinó Pro y Prmáx del modelo, como se muestra en la Figura 1.

Una vez definidos los parámetros del modelo integral se elaboró una macro en lenguaje Visual Basic en una hoja de cálculo del programa Excel con fines de calibración para que estuviera en condiciones de modelar los requerimientos hídricos. El criterio de aplicación del último riego se definió considerando los grados día acumulados (GDA) y etapa fenológica además del contenido de humedad del suelo a final de madurez fisiológica para evitar estrés hídrico. Con el fin de darle validez al modelo se compararon fenología observada versus modelada, así como la variación de las humedad del suelo modelada versus medida de forma gravimétrica y con un sensor fijo 10HS de la marca Decagon Device el cual colectó datos en un Datalogger EM50, descargados a través de una computadora portátil (Figura 2).

For parameterization of the model in pecan, phenology was monitored from sprouting according to the methodology proposed by Godoy *et al.*, (2000), the day degrees (GD) or thermal time associated with each stage being calculated as follows (Ojeda *et al.*, 2006).

$$\begin{aligned} \text{GD} &= T_a - T_{c-\text{min}}, \text{ si } T_a < T_{c-\text{max}} \\ \text{GD} &= T_{c-\text{max}} - T_{c-\text{min}}, \text{ si } T_a \geq T_{c-\text{max}} \\ \text{GD} &= 0, \text{ si } T_a \leq T_{c-\text{min}} \end{aligned}$$

Where: T_a is room temperature, $T_{c-\text{min}}$ is the minimum critical temperature of the crop (15 °C); $T_{c-\text{max}}$ is the maximum critical temperature of the crop (40 °C) (Santamaría *et al.*, 1969).

Kmax was taken from Stein and Worthington (1996), while the depth of root was performed by direct sampling in agronomic wells of 0.50 m x 1.5 m x 2 m, where Pro and PRMAX model was determined, as shown in Figure 1.



Figura 1. Pozo agrológico para determinación de profundidad de raíz y parámetros del modelo integral asociados a esta.

Figure 1. Agrological well to determine root depth and the associated comprehensive model parameters.

Once the parameters of the comprehensive model were defined, a Visual Basic macro was developed in an Excel spreadsheet program for calibration to be in a position to model water requirements. The criterion for application of the last irrigation was defined considering the accumulated of degree days (GDA) and phenological stage besides the soil moisture content at the end of physiological maturity to avoid water stress. In order to validate the model, the phenology observed was compared with the modeled, as well as the modeled variation in moisture in the soil versus the variation measured gravimetrically and with a fixed mark sensor 10 HS Decagon Device which collected data in a Datalogger EM50, discharged through a laptop (Figure 2).

Se midieron también láminas de riego neta (L_n) y bruta (L_b), así como la eficiencia de aplicación de cada riego (E_a). La primera mediante la acumulación de la evapotranspiración del cultivo estimada con la macro-Excel y la segunda mediante aforo de láminas aplicadas. E_a se calculó con: $E_a = L_n / L_b$. Al final del ciclo agrícola se evaluó el rendimiento y calidad de nuez, cosechando todos y cada uno de los árboles de la sección estudiada.

Resultados y discusión

En el Cuadro 2 se presentan las etapas fenológicas observadas en el lote experimental, expresadas en función de la acumulación de calor o tiempo térmico (GDA) así como la duración de las mismas en días calendario (DDS). La madurez fisiológico se alcanzó a los 2 356.03 GDA y la cosecha a los 2 463.94 a finales del mes de octubre a los 231 días después de la brotación (DDB).

Cuadro 2. Fenología observada a partir de la brotación (20 de marzo de 2014) en la variedad Western en el Ejido Hormiguero, Matamoros, Coahuila.

Table 2. Phenology observed from sprouting (20 March 2014) in the Western variety in the Ejido Anthill, Matamoros, Coahuila.

Etapa	Clave	Días después de brotación	Grados día (etapa)	Grados día (acumulados)
Brotación	B	1	5.08	5.08
Floración masculina	FM	10	77.6	82.68
Floración femenina	FF	17	76.55	154.15
Pos polinización	PP	34	149.62	226.17
Crecimiento inicial del fruto	CIF	57	300.45	450.07
Crecimiento rápido	CRR	93	621.29	921.74
Crecimiento final de la nuez	CFN	123	674.6	1295.89
Inicio llenado de almendra	ILLA	139	840.15	1514.75
Llenado de almendra	LLA	154	857	1697.15
Llenado final	LLF	172	1 083.22	1940.22
Madurez	M	215	1 272.81	2356.03
Cosecha	C	231	1 191.13	2463.94



Figura 2. Sensor de humedad del suelo 10HS Decagon Device instalado en lote experimental para calibración del modelo integral.

Figure 2. Soil moisture sensor 10HS Decagon Device installed on experimental lot for comprehensive model calibration.

El Cuadro 3 muestra los parámetros del modelo integral de programación del riego, obtenidos experimentalmente integrados en la macro de Excel.

Also net irrigation sheets (L_n) and gross (L_b) and implementation efficiency of each irrigation (E_a) were measured. The first one through the accumulation of crop

Cuadro 3. Modelos con parámetros calibrados para la programación integral del riego en el cultivo del Nogal Pecanero adulto, en la Comarca Lagunera.

Table 3. Models with calibrated parameters for comprehensive irrigation, scheduling in growing adult Walnut Pecan in the Laguna Region.

Variable	Modelo	Parámetro
Coefficiente de cultivo	$K_c = K_{max} \operatorname{erfc}\left(\left(\frac{X - X_{K_{max}}}{\alpha_1}\right)^2\right)$ si $K_c < K_{co}$, entonces $K_c = K_{co}$	$K_{max} = 1.2, X_{K_{max}} = 0.4$ $\alpha_1 = 0.45, K_{co} = 0.4$
Profundidad radical	$P_r = P_{ro} + (P_{rmax} - P_{ro}) \left\{ 1 - \exp\left[-\frac{(GDA_n)^2}{\alpha_2^2}\right] \right\}$	$P_{r0} = 1.2, P_{rmax} = 1.2, \alpha_2 = 700$
Factor de abatimiento	$f_n = \alpha_3 - \alpha_4 K_{cn}$	$\alpha_3 = 0.7$ (gravedad), 0.5 , (aspersión), 0.2 (goteo) $\alpha_4 = 0.1$

Se encontraron valores con alto nivel de semejanza entre el contenido de humedad modelado utilizando el modelo calibrado y el contenido de humedad medido graviméricamente y con el sensor de humedad del suelo 10HS, comportamiento similar a lo encontrado por Sifuentes *et al.*, (2014) en granos y hortalizas en el norte de Sinaloa, México, lo cual se puede observar en la Figura 3. La discrepancia del segundo valor (73 DDB) se debió a que operativamente se retrasó la aplicación del riego en ese periodo.

evapotranspiration, estimated with the macro-Excel and, the second one by capacity of applied films. E_a was calculated: $E_a = L_n/L_b$. At the end of the agricultural cycle yield and nut quality was assessed, harvesting every tree of the section studied.

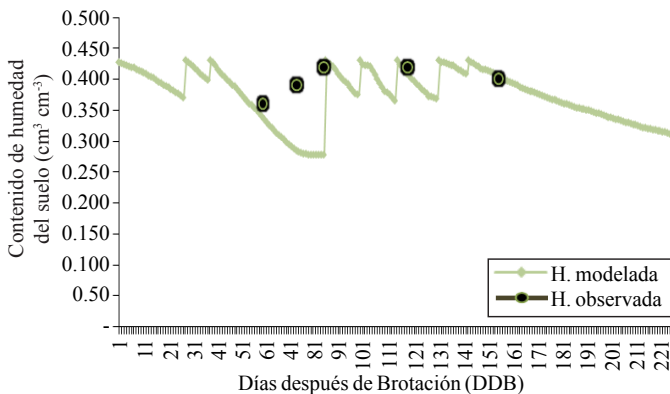


Figura 3. Comparación de la humedad volumétrica del suelo observada y modelada en la parcela estudiada.

Figure 3. Comparison of the volumetric soil moisture observed and modeled on the plot studied.

El modelo calibrado generó los requerimientos hídricos diarios y acumulados (Evapotranspiración), de la Figura 4, como una función de tiempo térmico o grados día, se encontró un requerimiento total de 741 mm, menor al

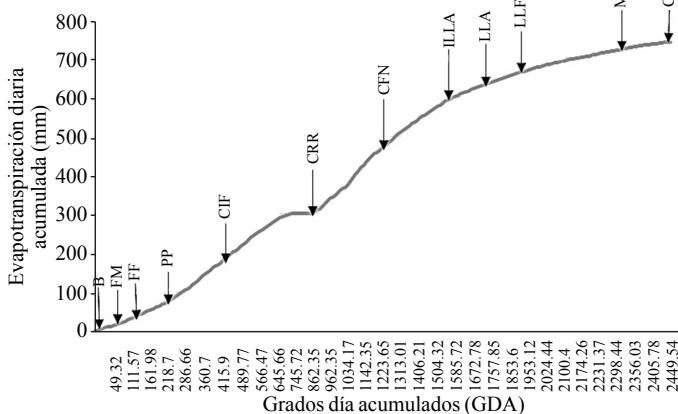
Results and discussion

In Table 2 the phenological stages observed in the test group, expressed in terms of heat accumulation or thermal time (GDA) and the length thereof in calendar days (DDS) are presented. The physiological maturity is reached at 2 356.03 GDA and harvesting at 2 463.94 at the end of October to 231 days after sprouting (DDB).

The Table 3 shows the parameters of comprehensive irrigation scheduling model, experimentally obtained integrated into the Excel macro.

High level values with high similarity levels were found between the content of modeling humidity using the calibrated model and the content measured gravimetrically and with the humidity sensor 10HS, behavior similar to that found by Sifuentes *et al.* (2014) in grains and vegetables in northern Sinaloa, Mexico, which can be seen in Figure 3. The second discrepancy value (73 DDB) operatively due to the irrigation application in that period was delayed.

requerimiento reportado por Brown (2010) que fue superior a los 1 100 mm para la Costa de Hermosillo, México y Arizona. Esta diferencia fue debida a los siguientes factores: por la reducción de la evapotranspiración por estrés hídrico presentado en el retraso del riego mencionado en la Figura 3, por las condiciones climáticas de la zona y duración del ciclo principalmente como lo menciona el mismo autor.



B= brotación; FM= floración masculina; FF= floración femenina; PP= Pos polinización; CIF= crecimiento inicial del fruto; CRR= crecimiento rápido; CFN= crecimiento final de la nuez; ILLA= inicio llenado de almendra; LLA= llenado de almendra; LLF= llenado final; M= madurez; C= cosecha.

Figura 4. Requerimientos de riego de nogal pecanero adulto para la Comarca Lagunera de Coahuila, México, estimado mediante programación integral y el concepto tiempo térmico.

Figure 4. Irrigation requirements by pecan for Laguna Region of Coahuila, Mexico, estimated by comprehensive programming and thermal time concept.

El modelo permitió también estimar el comportamiento fenológico del cultivo en diferentes fechas de brotación, escenario que es probable se presente cada vez más frecuente considerando la variabilidad climática actual (Sifuentes *et al.*, 2014). Para un rango de fechas donde podría presentarse el inicio de brotación del 28 de febrero al 31 de marzo, se estimó una diferencia superior a 20 días calendario en la mayoría de las etapas fenológicas, como se presenta en el Cuadro 4. En la práctica esta diferencia contribuye a caer en discrepancias en el manejo agronómico del huerto y consecuentemente en pérdidas en la producción.

El Cuadro 5 presenta un resumen de riegos de auxilio aplicados y la etapa en la que fueron aplicados en la parcela de estudio. Se aplicaron un total de 8 riegos de auxilio, incluyendo el riego inicial de brotación (no se consideran los riegos de pre-brotación). Los intervalos de riego fluctuaron entre 12 y 47 días y una lámina neta máxima de 82.18 mm con árboles activos y una lámina neta acumulada de 748.58 mm. La eficiencia

The calibrated model generated daily and accumulated water requirements (evapotranspiration) of Figure 4, as a function of thermal time or degree days, a total requirement was found of 741 mm, under the minimal requirements reported by Brown (2010), which was higher to 1 100 mm for the Costa de Hermosillo, Mexico and Arizona. This difference was due to the following factors: the reduction of evapotranspiration by water stress presented in the Delay Watering mentioned in Figure 3, for the climatic conditions of the area and cycle time mainly as mentioned by the same author.

The model also allowed estimating the crop phenology on different dates sprouting; a scenario likely to be increasingly common, considering the current climate variability (Sifuentes *et al.*, 2014). For a range of dates in which there might be a beginning of sprouting from February 28 to March 31, estimating a difference higher than 20 calendar days at most of the phenological stages, as presented in Table 4. In practice, this difference contributes to the fall in discrepancies in the agronomic management of the orchard and consequently in production losses.

The Table 5 presents a summary of applied irrigation assistance and the stage in which they were applied in the study plot. A total of 8 irrigations were applied, including the initial watering sprouting (not considered the risks of pre-sprouting). Watering intervals ranging between 12 and 47 days and a net maximum sheet of 82.18 mm, with active trees and a cumulative net sheet of 748.58 mm. The average application efficiency of irrigation ranged from 50-70% and the yield was within the regional average of 2-3 t ha⁻¹, indicating that the conditions under which the study was conducted were those of conventional the management area.

Conclusions

There is an integrated model for irrigation scheduling, calibrated for growing pecan in the Laguna Region of Coahuila, Mexico, with acceptable accuracy indicators, such as variation in moisture content of the soil, phenology, application efficiency of irrigation and performance. The irrigation requirement lower than other areas is due to its management, weather conditions and crop phenology, which increases as the crop development conditions are

de aplicación promedio de los riegos varió de 50 a 70% y el rendimiento obtenido estuvo dentro del promedio regional de 2 a 3 t ha⁻¹, lo cual indica que las condiciones en que se desarrolló el estudio fueron las del manejo convencional de la zona.

more favorable. The model demonstrates that there can be significant variation in crop phenology by varying the date of sprouting, which may affect the crop management and yield. This technology is recommended to temper climate

Cuadro 4. Variación de la duración de etapas fenológicas en días calendario, para diferentes fechas de brotación del nogal pecanero adulto en la Comarca Lagunera.

Table 4. Variation of the duration on phenological stages in calendar days, for different dates of pecan budding in the Laguna Region.

GDA	Etapa	Inicio de brotación			
		28/02	10/03	20/03	31/03
82.68	FM	23	18	11	10
154.15	FF	32	25	19	19
226.17	PP	41	35	29	26
450.07	CIF	66	60	52	50
921.74	CRR	104	96	88	84
1295.84	CFN	133	126	118	113
1514.75	ILLA	149	142	134	129
1697.15	LLA	163	156	149	145
1940.22	LLF	183	175	167	164
2356.03	M	222	216	210	211
2463.94	C	236	232	226	297

FM= floración masculina; FF= floración femenina; PP= pos polinización; CIF= crecimiento inicial del fruto; CRR= crecimiento rápido; CFN= crecimiento final de la nuez; ILLA= inicio llenado de almendra; LLA= llenado de almendra; LLF= llenado final; M= madurez; C= cosecha.

Cuadro 5. Calendario de riegos aplicados en la parcela de estudio ubicada en Hormiguero, Matamoros, Coahuila, México.

Table 5. Timing of irrigation applied in the study plot, located in Hormiguero, Matamoros, Coahuila, Mexico.

Núm. de riego	Días al riego	Intervalo (días)	Lámina de riego neta (mm)	Grados día acumulados	Etapa fenológica
1	0	0	182.74	5.08	Brotación
2	29	29	74.87	226.17	Pos polinización
3	39	10	43.81	331.57	Crecimiento inicial de fruto
4	86	47	182.73	813.59	Crecimiento rápido de fruto
5	100	14	74.23	1061.52	Crecimiento rápido de fruto
6	115	15	82.18	1256.55	Crecimiento final de la nuez
7	131	16	78.25	1473.48	Inicio de llenado de almendra
8	143	12	29.77	1626.80	Llenado de almendra
Total	143	12-47	748.58	1626.80	

Conclusiones

Se cuenta con un modelo integral para programación del riego calibrado para el cultivo de Nogal pecanero adulto en la Comarca Lagunera de Coahuila, México, con indicadores

variability and manage water availability scenarios; for this, it will be necessary to implement validation and transfer programs on a large scale.

End of the English version



de precisión aceptables como variación en el contenido de humedad del suelo, fenología, eficiencia de aplicación del riego y rendimiento. El requerimiento de riego menor al de otras zonas de riego obedece al manejo del riego, condiciones climáticas y fenología del cultivo, el cual aumenta a medida que las condiciones de desarrollo del cultivo sean más favorables. El modelo demuestra que puede existir variación significativa en la fenología del cultivo al variar la fecha de brotación, lo cual puede afectar el manejo del cultivo y rendimiento. Esta tecnología es recomendable para atemperar la variabilidad climática y manejar escenarios de disponibilidad hídrica, para ello se deben implementar programas de validación y transferencia a gran escala.

Literatura citada

- Allen, G. R.; Pereira, L.; Raes, D. y Smith, M. 2006. Estudio FAO riego y drenaje 56. Evapotranspiración del cultivo: guías para la determinación de los requerimientos de agua de los cultivos. Serie cuadernos técnicos. FAO. Roma, Italia. 298 p.
- Barboza, D. S.; Ferreira, J. A.; Rammana, T. V. and Rodríguez, V. P. 2007. Crop water stress index and water use efficiency for melon (*Cucumis melo* L.) on different irrigation regimes. *Agric. J.* 2(1):31-37.
- Brown, W. P. 2010. Pecan water use estimates for Southern Arizona and Northern México. XI simposio internacional de nogal pecanero. 54-61 pp.
- Martínez, D. G. and Núñez, M. H. 2007. Current status of pecan production in Mexico and future Outlook. Proceedings of the 77 Annual Convention of Oklahoma Pecan Growers Association. 434 pp.
- Martínez, D. G. y Jiménez, L. J. 2008. Composición florística en los huertos de nogal pecanero en México. INIFAP-CIRNO. Primera edición. Hermosillo, Sonora. 180 p.
- Ojeda, B. W.; Sifuentes, I. E.; Slack, D. C. and Carrillo, M. 2004. Generalization of irrigation scheduling parameters using the growing degree days concept: application to a potato crop. Primera Edición Irrigation and Drainage. EUA. 251-261 pp.
- Ojeda, B. W.; Sifuentes, I. E. and Unland, W. H. 2006. Programación integral del riego en maíz en el norte de Sinaloa. *Agrociencia.* 40:13-25.
- Godoy, A. C. y Huitrón, R. M. V. 1998. Relaciones hídricas de hojas y frutos de nogal pecanero durante el crecimiento y desarrollo de la nuez. *Agrociencia.* 32:331-337.
- Miyamoto, S. 1983. Consumptive water use of irrigated pecans. *J. Am. Soc. Hortic. Sci.* 108:676-681.
- Worthington, J. W.; Lasswell, J.; Stein, I. A. and McFariand, M. J. 1992. Now that you've decided to irrigate...How?...How much?...When?...pecan south. 22:6-18.
- Stein, I. A.; McEachern, G. A. and Storey, J. B. 1998. Summer and fall moisture stress and irrigation scheduling influence pecan growth and production. *Hortscience.* 24:607-611.
- Herrera, E. 1990. Fruit growth and development of ideal and western pecans. *J. Am. Soc. Hortic. Sci.* 115(6):915-923.
- Sparks, D. 1995c. Kernel development in pecan - a function of soil water. *Annu. Rep. Northern Nut Growers Assn.* 86:116-118.
- Phenes, C. J.; Davis, K. R.; Hutmacher, R. B. and McCormick, R. L. 1987. Advantages of subsurface irrigation for processing tomatoes. *Acta Hortic.* 200:101-114.
- Phenes, C. J.; McCormick, R. L.; Davis, K. R.; Pierro, J. D. and Meek, D. W. 1989. Alysimeter feed back irrigation controller system for evapotranspiration measurements and real time irrigation scheduling. *Trans. Am. Soc. Agric. Eng.* 32:477-484.
- Bart, H. K. 1995. Resource conservation and preservation through a new subsurface irrigation system. *In: Lamm, F. R. Soc. Agric. Eng. St. Joseph. Mich., USA.* 168-174 pp.
- Camp, C. R. 1998. Subsurface drip irrigation: a review. *Trans. Am. Soc. Agric. Eng.* 41:1353-1367.
- Phene, C. J. 1999. Subsurface drip irrigation. *Irrigation J.* 48:1-8.
- Sifuentes, I. E.; Ruelas, I. J.; Soto, F. J.; Macías, C. J. y Palacios, M. C. 2014. Planeación del riego en el cultivo de algodón (*Gossypium hirsutum* L.), mediante un modelo de programación integral en el distrito 075 Sinaloa, México. *Scientia Agropecuaria* 5. Universidad de Trujillo, Perú. 93-102 pp.
- Sifuentes, I. E.; Samaniego, G. J.; Anaya, S. A.; Núñez, M. J.; Valdez, G. B.; Macías, C. J.; Zárate, R. B. y Vieira, F. F. 2014. Irrinogal: riego en tiempo real con internet basado en tiempo térmico: manual de usuario Versión 1.0. Los Mochis, Sinaloa, México. Folleto técnico Núm. 40. 49 p.