

Soil moisture depletion rates on sunflower yield

Niveles de agotamiento de la humedad aprovechable del suelo en el rendimiento del girasol

Marco Antonio Inzunza-Ibarra*; Ignacio Sánchez-Cohen;
Sergio Iván Jiménez-Jiménez; Ernesto Alonso Catalán-Valencia;
Mariana de Jesús Marcial-Pablo

Centro Nacional de Investigación Disciplinaria en Relación Agua-Suelo-Planta-Atmósfera del Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (CENID RASPA INIFAP). Margen derecha canal Sacramento km 6.5, Zona industrial Gómez Palacio, Durango, C. P. 35140, MÉXICO.

Abstract

Introduction: Optimizing the irrigation water resource is essential due to its scarcity, so it is therefore important to consider efficient crops such as sunflower.

Objective: To estimate the sunflower grain yield at different levels of available soil moisture depletion to estimate water use efficiency (WUE) of the crop under different water conditions.

Methodology: Seven treatments resulting from four soil moisture levels (40, 60, 80 and 100 % of available soil moisture [ASM]) and two periods of sunflower growth (from emergence to the beginning of flowering [first stage] and from flowering to physiological maturity [second stage]).

Results: The highest grain yield ($5.5 \text{ t}\cdot\text{ha}^{-1}$) and WUE of ($0.922 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$) were recorded in the 60-60 % ASM treatment in the first and second stages of sunflower development, and by consuming 62.8 cm of water.

Limitations of the study: The results should not be extrapolated to conditions outside the study levels.

Originality: To generate research methodologies to quantify, in a more realistic way, the relationship of yields with crop water requirements.

Conclusions: The highest WUE in sunflower ($0.922 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$) was recorded when it consumed 31.4 and 28.12 cm of water, with 58.8 and 60.5 % of ASM in the first and second stages, respectively, which was similar to the 60-60 % treatment.

Resumen

Introducción: La optimización del recurso agua de riego es indispensable debido a su escasez, por lo que es imperativo considerar cultivos eficientes como el girasol.

Objetivo: Determinar el rendimiento de grano del girasol a diferentes niveles de agotamiento de la humedad aprovechable del suelo, con el fin de estimar la eficiencia de uso del agua (WUE) del cultivo bajo diferentes condiciones hídricas.

Metodología: Se estudiaron siete tratamientos resultantes de cuatro niveles de humedad del suelo (40, 60, 80 y 100 % de consumo de la humedad aprovechable del suelo [HAC]) y dos períodos de crecimiento del girasol (de la emergencia al inicio de floración [primera etapa] y de ésta a la madurez fisiológica [segunda etapa]).

Resultados: La mayor producción de grano ($5.5 \text{ t}\cdot\text{ha}^{-1}$) y WUE ($0.922 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$) se obtuvieron en el tratamiento 60-60 % de la HAC en la primera y segunda etapa de desarrollo del girasol, y al consumir 62.8 cm de agua.

Limitaciones del estudio: Los resultados no deben ser extrapolados a condiciones fuera de los niveles de estudio.

Originalidad: Generar metodologías de investigación para cuantificar, con más apego a la realidad, la relación de los rendimientos con los requerimientos hídricos de los cultivos.

Conclusiones: La mayor WUE en el girasol ($0.922 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$) se obtuvo cuando éste consumió 31.4 y 28.12 cm de agua, con 58.8 y 60.5 % de HAC en la primera y segunda etapa, respectivamente, lo cual resultó similar al tratamiento 60-60 %.

Keywords: *Helianthus annuus* L., water efficiency, evapotranspiration, water production function.

Palabras clave: *Helianthus annuus* L., eficiencia del agua, evapotranspiración, función de producción del agua.



Introduction

Optimizing the use of irrigation water is a strategy to reduce the great problem of its scarcity for agricultural use in the Comarca Lagunera and in more than 50 % of the country (Comisión Nacional del Agua [CONAGUA], 2019). For this reason, in recent years, efforts have been made to achieve maximum yields per unit volume of water applied, instead of per surface area, leading to improved crop water productivity in agriculture. This has consequently caused the study of irrigation management strategies, such as deficit irrigation, where water supply is lower than the crop's water needs, generating a slight shortage during the development stages, where the crop is less sensitive to a water deficiency (Galindo et al., 2018). Other strategies employed are partial root drying (PRD) or stressing the crop with different levels of water potential. These strategies have been successful in crops such as sunflower (Karam et al., 2007; Mila et al., 2017), being tolerant to water stress generated by deficit irrigation or under different water potential levels, as well as being able to produce high yield in response to irrigation inputs (Sezen et al., 2011). The plasticity of sunflower is recognized in terms of adapting leaf area development to water availability (Ren et al., 2018).

The importance of sunflower consists in the production of edible oils with health benefits, due to its high content of polyunsaturated fats. Another important product obtained from sunflower is the paste, which contains between 40 and 50 % protein, with favorable amino acids for livestock and poultry feed (Escalante-Estrada et al., 2007). Ren et al. (2018) report that sunflower has the ability to reduce its water consumption by up to 20 % without significantly affecting its yield. However, sunflower is sensitive to water stress at critical stages, such as early flowering and seed filling (Ebrahimian et al., 2019).

Karam et al. (2007) point out that irrigation limitation at early flowering and mid-flowering should be avoided, while it can be tolerated at seed formation. These authors found that deficit irrigation at early flowering and mid-flowering reduces grain yield by 25 and 14 %, respectively, relative to a control without moisture restriction. In addition, they found that deficit irrigation at the beginning of grain filling increases yield to 5.50 t-ha^{-1} .

Steduto et al. (2012) indicate that the total available water in the root zone should not exceed 40 % to obtain higher yields; this especially during late vegetative periods, flowering and seed formation. Liu et al. (2018) evaluated grain yield of sunflower without moisture restriction (IP) and with deficit irrigation (with irrigation at flower bud initiation [IF] and with irrigation when flower buds start to open [FA]), and

Introducción

La optimización en el uso del agua de riego es una estrategia para disminuir el gran problema de su escasez para uso agrícola en la Comarca Lagunera y en más del 50 % del territorio nacional (Comisión Nacional del Agua [CONAGUA], 2019). Por ello, en los últimos años se ha procurado alcanzar rendimientos máximos por unidad de volumen de agua aplicado, en lugar de por superficie, lo cual permite mejorar la productividad del agua de los cultivos en la agricultura. Como consecuencia, esto ha ocasionado que se estudien estrategias de manejo del riego, como el riego deficitario, en el que el suministro de agua es inferior a las necesidades de agua del cultivo, generando una leve escasez durante las etapas de desarrollo, en las que el cultivo es menos sensible a una deficiencia hídrica (Galindo et al., 2018). Otras estrategias empleadas son el secado parcial de raíces (PRD, por sus siglas en inglés) o someter el cultivo a cierto estrés mediante diferentes niveles de potencial hídrico. Dichas estrategias han tenido éxito en cultivos como el girasol (Karam et al., 2007; Mila et al., 2017), por ser tolerante al estrés hídrico que se genera con el riego deficitario o bajo diferentes niveles de potencial hídrico, además de ser capaz de producir un alto rendimiento en respuesta a los insumos de riego (Sezen et al., 2011). La plasticidad del girasol es reconocida, en términos de la adaptación del desarrollo del área foliar a la disponibilidad de agua (Ren et al., 2018).

La importancia del girasol radica en que genera aceites comestibles con beneficios para la salud, por su alto contenido de grasas poliinsaturadas. Otro producto importante que se obtiene del girasol es la pasta, la cual contiene entre 40 y 50 % de proteínas, con aminoácidos favorables para la alimentación del ganado y aves (Escalante-Estrada et al., 2007). Ren et al. (2018) afirman que el girasol tiene la capacidad de reducir su consumo hídrico hasta 20 % sin afectar significativamente su rendimiento. Sin embargo, el girasol es sensible a estrés hídrico en etapas críticas, como la floración temprana y el llenado de semillas (Ebrahimian et al., 2019).

Karam et al. (2007) señalan que la limitación del riego en la floración temprana y la floración media se debe evitar, mientras que puede ser tolerada en la formación de semillas. Estos autores encontraron que el riego deficitario en la floración temprana y la floración media reduce el rendimiento de grano en 25 y 14 %, respectivamente, con respecto a un testigo sin restricciones de humedad. Además, dedujeron que el riego deficitario al inicio del llenado de grano incrementa el rendimiento a 5.50 t-ha^{-1} .

Steduto et al. (2012) indican que el agua total disponible en la zona radicular no debe exceder el 40 % para obtener mayores rendimientos; esto particularmente

a control under rainfed conditions. The IP, IF and FA treatments produced a higher leaf area index, plant cover, inflorescence diameter and yield compared to rainfed sunflower. Moreover, yield decreased by 6 and 15 % in the IF and FA treatments, respectively, compared to the IP.

García-López et al. (2016) concluded, with three years of study, that sunflower maintains its maximum production when irrigated with 60-80 % of the optimum water volume. Thus, these authors obtained grain yields of $2.6 \text{ t}\cdot\text{ha}^{-1}$ when adding 589.7 mm of water in 2012, $3.3 \text{ t}\cdot\text{ha}^{-1}$ when adding 1019 mm in 2013, and $2.9 \text{ t}\cdot\text{ha}^{-1}$ with 652.4 mm applied in 2014. Howell et al. (2015) reported grain yields of $3.08 \text{ t}\cdot\text{ha}^{-1}$, with a water use efficiency (WUE) of 0.49 kg of dry sunflower seed per m^3 of water consumed. They also obtained a seed oil concentration of 30 to 40 %, a crop development coefficient of 0.15 at initial and 1.22 upon reaching its maximum evapotranspiration rate and higher vegetative cover.

López-Urrea et al. (2014) reported, for 2009 in the sunflower crop, a total water consumption of 619 mm, while for 2011 the consumption was 576 mm. The sunflower development coefficient was 1.10 and 1.20 for the years mentioned, respectively, and both values coincided with the higher sunflower plant cover.

Therefore, the objective of this study was to determine the grain yield of sunflower at different levels of soil moisture depletion, to estimate the WUE of the crop under different water conditions and to look for alternatives to maximize grain yield per m^3 of water consumed.

Materials and methods

The study was carried out at the experimental field of the Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias, CENID-RASPA, located at $25^{\circ} 31' 57''$ N and $103^{\circ} 25' 57''$ W, at 1139 m a.s.l in the ejido Las Huertas in Gómez Palacio, Durango, Mexico. The climate of the area is classified as BW(h')hw(e), which corresponds to very arid-warm with mean annual temperature of 22°C and mean temperature of the coldest month of 18°C , according to the Köppen climate classification modified by Enriqueta García (García, 2004). Average precipitation ranges from 200 to 300 mm per year in the irrigated agricultural zone, and from 400 to 500 mm in the western mountainous zone, with average annual evaporation of 2600 mm. The frost-free period is from April to October, with hailstorms in May. With rainfall in summer, and winter rainfall of 5 to 10 % of the total.

The soil was characterized by sampling at three depths (0-30, 30-60 and 60-90) and four replicates. Regarding chemical characteristics, the soil showed

durante los períodos vegetativos tardíos, floración y formación de las semillas. Liu et al. (2018) evaluaron el rendimiento de grano del girasol sin restricción de humedad (IP) y con riego deficitario (con riego al iniciar los botones florales [IF] y con riego cuando los botones florales se empiezan a abrir [FA]), más un testigo bajo temporal. Los tratamientos IP, IF y FA produjeron un mayor índice de área foliar, cobertura vegetal, diámetro de la inflorescencia y rendimiento, en comparación con el girasol de temporal. Asimismo, la producción disminuyó en 6 y 15 % en los tratamientos IF y FA, respectivamente, comparados con el IP.

García-López et al. (2016) concluyeron, con tres años de estudio, que el girasol mantiene su producción máxima al ser irrigado con el 60-80 % del volumen de agua óptimo. De esta manera, dichos autores obtuvieron un rendimiento de grano de $2.6 \text{ t}\cdot\text{ha}^{-1}$ al aplicar 589.7 mm de agua en 2012, de $3.3 \text{ t}\cdot\text{ha}^{-1}$ al aplicar 1019 mm en 2013, y de $2.9 \text{ t}\cdot\text{ha}^{-1}$ con 652.4 mm de lámina aplicada en 2014. Asimismo, Howell et al. (2015) reportaron rendimientos de grano de $3.08 \text{ t}\cdot\text{ha}^{-1}$, con una eficiencia de uso del agua (WUE) de 0.49 kg de semilla seca de girasol por m^3 de agua consumida. Además, obtuvieron una concentración de aceite en la semilla de 30 a 40 %, un coeficiente de desarrollo del cultivo de 0.15 en su crecimiento inicial y 1.22 al alcanzar su tasa de evapotranspiración máxima y mayor cobertura vegetal.

López-Urrea et al. (2014) obtuvieron, para 2009 en el cultivo de girasol, un consumo total de agua de 619 mm, mientras que para 2011 el consumo fue de 576 mm. El coeficiente de desarrollo del girasol fue de 1.10 y 1.20 para los años citados, respectivamente, y ambos valores coincidieron con la mayor cobertura vegetal del girasol.

Considerando lo anterior, el objetivo de este estudio fue determinar el rendimiento de grano del girasol a diferentes niveles de agotamiento de la humedad aprovechable del suelo, con el fin de estimar la WUE del cultivo bajo diferentes condiciones hídricas y buscar alternativas que permitan maximizar el rendimiento de grano por m^3 de agua consumida.

Materiales y métodos

El estudio se realizó en el campo experimental del Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias, CENID-RASPA, ubicado a los $25^{\circ} 31' 57''$ longitud norte y $103^{\circ} 25' 57''$ latitud oeste, a 1139 m s. n. m., en el ejido Las Huertas en Gómez Palacio, Durango, México. El clima de la zona se clasifica como BW(h')hw(e), que corresponde a muy árido-cálido con temperatura media anual de 22°C y temperatura media del mes más frío de 18°C , según la clasificación climática de Köppen modificado por Enriqueta García (García, 2004). La precipitación pluvial promedio varía de 200 a 300 mm anuales en la zona agrícola

low nitrate availability (Kjeldahl method), moderately low phosphorus availability (Duval method) and high potassium availability (spectrophotometry), and low contents of soluble salts, sodium and organic matter (Castellanos et al., 2000). Due to its pH of 8.4, the soil is considered alkaline, so it could have assimilation problems of Fe, Mn and Zn, but it is a soil with high productivity when irrigated and without significant deficiencies of these microelements.

The physical characteristics of the soil were low organic matter content (Walkley and Black's method), clay loam texture (sand, silt and clay at 19, 45 and 30 %, respectively) (Robinson's pipette method), field capacity of 30 %, permanent wilting point of 15 % (pot and pressure membrane method, respectively) and bulk density of 1.27 g·cm⁻³ (graduated cylinder) (Richards, 1977).

Madero 91 was the sunflower variety used in this study. Sowing was carried out on July 1, 2018, at a density of 62 000 plants·ha⁻¹, and harvest was on October 4 of the same year, resulting in an experimental period of 106 days. Based on the initial soil sampling, fertilization was done with the formula 120-60-0 (N-P-K). Half of the fertilizer was applied at the time of sowing, and the remainder at the first auxiliary irrigation (15 days after sowing).

Seven combinations of soil moisture depletion (ASM) were analyzed, which resulted from the San Cristobal treatment matrix for two 4x4 factors (Villasmil et al., 1974). These ASM combinations were applied in two periods: 1) from emergence to the beginning of flowering (vegetative stage) and 2) from the beginning of flowering to physiological maturity (reproductive stage). The selected levels of each factor were 40, 60, 80 and 100 % of the ASM in each phenological stage; thus, the seven treatments were 40-40, 40-80, 60-60, 60-100, 80-40, 80-80 and 100-60. The treatments were randomly distributed under a randomized block experimental design with four replicates. The experimental unit was 4 x 5 m (20 m² per plot).

The time domain reflectometry (TDR) method was used to determine soil moisture depletion in each treatment. For this purpose, a sensor (Model Trime-Pico T3/IPH44 from IMKO) was placed in a probe that was inserted into access tubes at different soil depths. This method can achieve an accuracy of 0.3 % of volumetric moisture. The equipment was previously calibrated in the experimental soil and the gravimetric method was used as the standard method, with augers type vehimeyer type (Inzunza-Ibarra et al., 2012).

For irrigation purposes, a pressurized pipeline was installed from the supply source to the experimental area. The conduction pipe was 152.4 mm in diameter,

de riego, y de 400 a 500 mm en la zona montañosa oeste, con evaporación media anual de 2 600 mm. El periodo libre de heladas es de abril a octubre, y se pueden presentar granizadas en mayo. Las lluvias son en verano, con lluvias invernales de 5 a 10 % del total.

El suelo se caracterizó mediante muestreos a tres profundidades (0-30, 30-60 y 60-90) y cuatro repeticiones. Con respecto a las características químicas, el suelo presentó una disponibilidad de nitratos baja (método de Kjeldahl), de fósforo moderadamente baja (método de Duval) y de potasio alta (espectrofotometría), además de contenidos bajos de sales solubles, sodio y materia orgánica (Castellanos et al., 2000). Por su pH de 8.4, el suelo se considera alcalino, por lo que podría tener problemas de asimilación de Fe, Mn y Zn, pero es un suelo con alta productividad al ser irrigado y sin tener deficiencias importantes de estos microelementos.

Las características físicas del suelo fueron: contenido bajo de materia orgánica (método de Walkley y Black), textura franco-arcillosa (arena, limo y arcilla en 19, 45 y 30 %, respectivamente) (método de la pipeta de Robinson), capacidad de campo de 30 %, punto de marchitez permanente de 15 % (método de la olla y membrana de presión, respectivamente) y densidad aparente de 1.27 g·cm⁻³ (método del cilindro) (Richards, 1977).

La variedad de girasol utilizada en el estudio fue Madero 91. La siembra se realizó el 1 de julio de 2018, a una densidad de 62 000 plantas·ha⁻¹, y la cosecha fue el 4 de octubre del mismo año, lo cual resultó en un periodo experimental de 106 días. Con base en el muestreo inicial de suelo, se fertilizó con la fórmula 120-60-0 (N-P-K). La mitad del fertilizante se aplicó al momento de la siembra, y el resto en el primer riego de auxilio (15 días después de la siembra).

Se analizaron siete combinaciones de abatimiento de la humedad aprovechable consumida (HAC) en el suelo, las cuales resultaron de la matriz de tratamientos San Cristóbal para dos factores 4x4 (Villasmil et al., 1974). Dichas combinaciones de HAC se aplicaron en dos períodos: 1) de emergencia a inicio de floración (etapa vegetativa) y 2) de inicio de floración a madurez fisiológica (etapa reproductiva). En este sentido, los niveles seleccionados de cada factor fueron 40, 60, 80 y 100 % de la HAC en cada etapa fenológica; de esta manera, los siete tratamientos fueron 40-40, 40-80, 60-60, 60-100, 80-40, 80-80 y 100-60. Los tratamientos se distribuyeron de manera aleatoria bajo un diseño experimental de bloques al azar con cuatro repeticiones. La unidad experimental fue de 4 x 5 m (20 m² por parcela).

Para determinar el abatimiento de la humedad del suelo en cada tratamiento, se utilizó el método de reflectometría en el dominio temporal (TDR, por sus siglas en inglés). Para ello, se colocó un sensor (Modelo

with hydrants every 36 m, for the irrigation of the surrounding melgas of the experimental area. Another 38.1 mm diameter pipe was connected to it, with connections for the union of a hose provided with a calibrated volumetric meter, to precisely apply the required volume of water to the experimental plots.

During the development of the crop, soil moisture was sampled continuously. The first sampling was to measure the initial moisture before pre-planting irrigation. Subsequent samplings were made during the experiment to monitor soil moisture depletions in each treatment. Three readings were taken per stratum and the average was recorded. The same was carried out for the other soil depths, up to 90 cm if the crop height was greater than 80 cm. When reaching the level of available soil moisture by the crop established for each treatment, auxiliary irrigation was applied to recover the soil moisture until the field capacity was reached in the 90 cm soil profile. At the beginning of crop development, a variable irrigation depth was considered according to root growth; this was obtained by exploring the plants of the adjoining plots with a growth equal to that of the plants in the experiment.

The variables evaluated were grain yield (Y ; $t \cdot ha^{-1}$), water consumed (WC ; cm), water use efficiency (WUE ; relating grain yield to water consumed [$kg \cdot m^{-3}$]) and maximum evapotranspiration of sunflower (mm).

Data were analyzed with an ANOVA and Tukey's comparison of means ($P \leq 0.05$). Regression analysis and optimization of variables were carried out based on the theory of maxima and minima of differential calculus, and with the stepwise technique (SAS Institute, 2011).

Results and discussion

Climate conditions

Figure 1 shows the differences in average temperature during the growing season and the historical average (1975-2011) in the same period. In this figure, differences of more than 2 °C are observed from July 10 to mid-August, but in the remaining period the differences were minimal. In general, there was an average difference of 1.3 °C during the sunflower development cycle.

Figure 2 shows the precipitation during the crop cycle and the historical rainfall (1975-2011). This figure shows that, although the average rainfall during the year of the study was 18 % lower than the historical rainfall, precipitation during sunflower development was 57 % higher than the historical precipitation. Most of the events were less than 1 mm; only in August and September there were six rainfall events between 4 and 5 mm. These rainfall events were considered in

Trime-Pico T3/IPH44 de IMKO) en una sonda que se introdujo en tubos de acceso a diferentes profundidades del suelo. Este método puede alcanzar una precisión de 0.3 % de la humedad volumétrica. El equipo se calibró previamente en el suelo experimental y se empleó el gravimétrico como método patrón, con barrenas tipo vehimeyer (Inzunza-Ibarra et al., 2012).

Para la aplicación del riego, se instaló una tubería presurizada desde la fuente de abastecimiento hasta el área experimental. La tubería de conducción fue de 152.4 mm de diámetro, con hidrantes cada 36 m, para el riego de las melgas circunvecinas al área experimental. A ésta se conectó otra tubería de 38.1 mm de diámetro con conexiones para la unión de una manguera provista con un medidor volumétrico calibrado, para aplicar en forma precisa el volumen de agua requerido a las parcelas experimentales.

Durante el desarrollo del cultivo, se hicieron muestreos de humedad del suelo en forma continua. El primer muestreo fue para medir la humedad inicial antes del riego de presiembra. Los muestreos posteriores se realizaron durante el transcurso del experimento para monitorear los abatimientos de humedad del suelo en cada tratamiento. En los muestreos se realizaron tres lecturas por estrato y se registró el promedio. Se hizo lo mismo para las demás profundidades del suelo, hasta 90 cm si la altura del cultivo era mayor a 80 cm. Al alcanzar el nivel de humedad aprovechable consumida por el cultivo establecido para cada tratamiento, se aplicó el riego de auxilio para reponer la humedad del suelo hasta alcanzar la capacidad de campo en el perfil de suelo de 90 cm. Al inicio del desarrollo del cultivo, se consideró una profundidad de riego variable de acuerdo con el crecimiento de las raíces; esto se obtenía explorando las plantas de las melgas contiguas con un crecimiento igual a las plantas del experimento.

Las variables evaluadas fueron rendimiento de grano (R ; $t \cdot ha^{-1}$), lámina de agua consumida (LC ; cm), eficiencia de uso del agua (WUE ; que relaciona el rendimiento de grano con la cantidad de agua consumida [$kg \cdot m^{-3}$]) y evapotranspiración máxima del girasol (mm).

Los datos se sometieron a un análisis de varianza y una comparación de medias de Tukey ($P \leq 0.05$). Asimismo, se realizó un análisis de regresión y la optimización de variables con base en la teoría de máximos y mínimos del cálculo diferencial, y con la técnica stepwise (SAS Institute, 2011).

Resultados y discusión

Condiciones climáticas

La Figura 1 muestra las diferencias de la temperatura media durante el ciclo de cultivo y el promedio

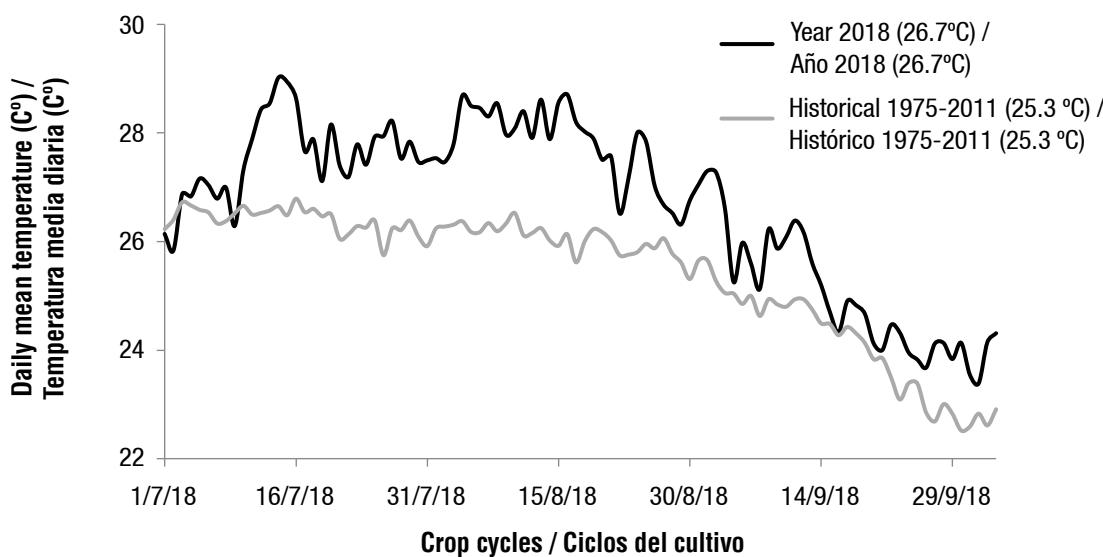


Figure 1. Comparison of the average temperature during sunflower development and the historical temperature (1975-2011).
Figura 1. Comparación de la temperatura media presente durante el desarrollo del girasol y la histórica (1975-2011).

the soil moisture balance, and only delayed the pre-set moisture level of the treatment, without affecting the homogeneity of the treatments.

Moisture content in treatments

ASM values in the field were close to those planned in the treatments, where the differences between that projected and that obtained in the field were insignificant (Table 1). The ASM ranged between 41.9 and 100 % throughout the cycle. The lowest values were obtained with the 40-40 treatment (43.3 and 41.9 %, respectively), and the highest with 100-60 (99.6 and 60.7 %) and 60-100 (57.7 and 100 %).

In the case of the water consumed (WC), the highest consumption in the first and second period was presented in the 40-40 treatment, which has the wettest conditions, while the lowest consumption at vegetative stage was in the 100-60 treatment (24.36 cm), which had the lowest moisture content in that stage, and the lowest consumption in the reproductive stage was obtained in the 60-100 treatment (22.16 cm). This latter treatment showed the lowest water consumption in the entire vegetative cycle of sunflower (53.3 cm).

In general, the crop responded differently according to the timing and water applied in irrigation. Transpiration rates decrease at higher ASM and, in this case, daily crop rates responded to progressive soil drying (Kiani et al., 2016). Reducing transpiration rate and thus minimizing water loss in response to water deficit in sunflower is an aspect of drought tolerance. This is achieved by reducing the rate of leaf area

histórico (1975-2011) en el mismo periodo. En dicha figura, se observan diferencias de más de 2 °C del 10 de julio a mediados de agosto, pero en el periodo restante las diferencias fueron insignificantes. En general, se presentó una diferencia promedio de 1.3 °C durante el ciclo de desarrollo del girasol.

En la Figura 2 se muestra la precipitación ocurrida durante el ciclo de cultivo y la histórica (1975-2011). En esta figura se observa que, aunque la lluvia promedio ocurrida durante el año del estudio fue menor a la histórica en 18 %, la precipitación ocurrida durante el desarrollo del girasol fue mayor en un 57 % a la histórica. La mayoría de los eventos fueron menores a 1 mm; únicamente en agosto y septiembre se presentaron seis lluvias de entre 4 y 5 mm. Dichos eventos de lluvia se consideraron en el balance de humedad del suelo, y solo retrasaron el nivel de humedad prefijado del tratamiento, sin afectar la homogeneidad de los tratamientos.

Contenido de humedad en los tratamientos

Se detectaron valores de la HAC en campo cercanos a los planeados en los tratamientos, donde las diferencias entre lo proyectado y lo obtenido en campo fueron insignificantes (Cuadro 1). La HAC fluctuó entre 41.9 y 100 % en todo el ciclo. Los valores más bajos se obtuvieron con el tratamiento 40-40 (43.3 y 41.9 %, respectivamente), y los más altos, con 100-60 (99.6 y 60.7 %) y 60-100 (57.7 y 100 %).

En el caso de la lámina consumida (LC), el mayor consumo en el primer y segundo periodo se observó en

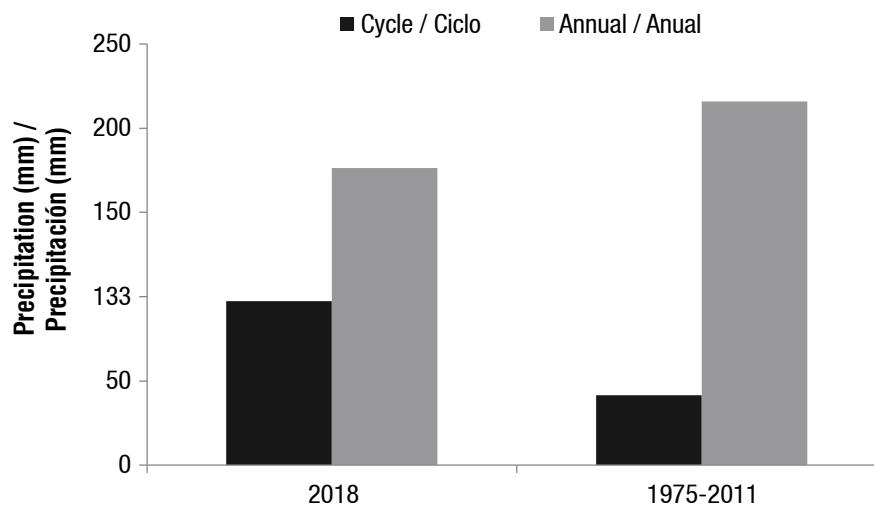


Figure 2. Comparison of precipitation during crop development and historical (1975-2011).

Figura 2. Comparación de la precipitación durante el desarrollo del cultivo y la histórica (1975-2011).

Table 1. Moisture contents, yields and water use efficiency of sunflower grown under different water conditions.

Cuadro 1. Contenidos de humedad, rendimientos y eficiencia de uso del agua del girasol cultivado bajo diferentes condiciones hídricas.

Treatment / Tratamiento	#R ₁	#R ₂	ASM ₁ (%) / HAC ₁ (%)	ASM ₂ (%) / HAC ₂ (%)	WC ₁ (cm) / LC ₁ (cm)	WC ₂ (cm) / LC ₂ (cm)	WC _T (cm) / LC _T (cm)	Y (t·ha ⁻¹) / R (t·ha ⁻¹)	WUE (kg·m ⁻³) / WUE (kg·m ⁻³)
40-40	4	6	43.3	41.9	35.10	33.60	68.7	4.42b	0.642b
40-80	4	3	43.3	82.1	35.10	25.19	60.29	3.80b	0.630b
60-60	2	4	58.8	60.5	31.14	28.12	59.26	5.46a	0.922a
60-100	2	1	57.7	100	31.14	22.16	53.3	2.40c	0.452c
80-40	2	4	79.8	44.4	28.16	32.09	60.25	3.94b	0.655b
80-80	2	3	83.3	81.4	28.16	26.21	54.37	4.09b	0.752b
100-60	1	3	99.6	60.7	24.36	33.45	57.81	2.78c	0.475c

#R₁ and #R₂ = number of irrigations in the first and second stages, respectively; ASM₁ and ASM₂ = available soil moisture at vegetative and reproductive stages, respectively; WC₁, WC₂ and WC_T = irrigation consumed at vegetative, reproductive and total stages, respectively; Y = sunflower grain yield; WUE = water use efficiency.

#R₁ y #R₂ = número de riegos en la primera y segunda etapa, respectivamente; HAC₁ y HAC₂ = humedad aprovechable consumida en la etapa vegetativa y reproductiva, respectivamente; LC₁, LC₂ y LC_T = lamina de riego consumida en la etapa vegetativa, reproductiva y total, respectivamente; R = rendimiento de grano del girasol; WUE = eficiencia de uso del agua.

expansion or transpiration per unit leaf area (stomatal conductance) (Khaleghi et al., 2020).

Grain yield and water use efficiency

Y and WUE, as a response to soil moisture conditions in each treatment, had a similar trend (Table 1 and Figure 3). For both parameters, the ANOVA analysis showed highly significant differences among treatments ($P \leq 0.01$). The 60-60 treatment was significantly higher ($P \leq 0.05$) in terms of Y and WUE (5.46 t·ha⁻¹ and 0.922 kg·m⁻³, respectively) (Table 1). The above is attributed to the application of irrigation at 58.8 and 60.5 % of ASM; that is, when the soil has a stress of -0.48 and -0.461 MPa to extract moisture in the first and second periods, respectively. Paul et al. (2020) indicate

el tratamiento 40-40, el cual presenta las condiciones más húmedas, mientras que el menor consumo en la etapa vegetativa se observó en el tratamiento 100-60 (24.36 cm), que era el de bajo contenido de humedad en dicha etapa, y el menor consumo en la etapa reproductiva se obtuvo en el tratamiento 60-100 (22.16 cm). Asimismo, este último tratamiento mostró un menor consumo de agua en todo el ciclo vegetativo del girasol (53.3 cm).

En general, el cultivo respondió de forma diferente de acuerdo con la oportunidad y la cantidad de agua aplicada en el riego. Las tasas de transpiración decrecen a mayor HAC y, en este caso, las tasas diaria del cultivo respondieron al secado progresivo del suelo (Kiani et al., 2016). La reducción de la tasa de transpiración y, por tanto, la minimización de la perdida de agua en

that the classical lower limit of permanent crop wilting is -1.5 MPa. Khaleghi et al. (2020) reported, in controlled sunflower treatments, that the threshold values below, where the rate of leaf expansion and transpiration start to decrease is close to 60 % of ASM for leaf expansion and 40 % of ASM for daily transpiration. This indicates that the results found are consistent with those in the literature.

The highest average WUE value, reported in this study, is similar to values found by other authors who applied different irrigation management strategies. Sezen et al. (2011) reported values up to $1 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ using the partial root drying technique, and Farhadi-Macheckposhti et al. (2017) found values close to $1 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ by mixing up to 30 % seawater in freshwater.

On the other hand, the highest WUE value is higher than that reported by Karam et al. (2007) ($0.83 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$), with deficit irrigation technique, and by El-Bialy et al. (2018) ($0.75 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$), who used ascorbic acid to alleviate the adverse effects of water deficit in sunflower plants. In general, WUE values were found to be higher in stressed treatments than in abundantly irrigated treatments (García-López et al., 2016). Regarding the above, stressing the sunflower crop and letting the ASM reach 60 % can be an alternative to increase water use efficiency, furthermore, it is an ideal practice in areas that suffer from frequent periods of water deficit.

The lowest Y and WUE values were found with treatments 60-100 (2.4 and $2.8 \text{ t} \cdot \text{ha}^{-1}$, respectively) and

respuesta al déficit hídrico del girasol es un aspecto de tolerancia a la sequía. Esto se logra mediante la reducción de la tasa de expansión del área de la hoja o la transpiración por unidad de área foliar (conductancia estomática) (Khaleghi et al., 2020).

Rendimiento de grano y eficiencia de uso del agua

El R y la WUE, como respuesta a las condiciones de humedad del suelo en cada tratamiento, tuvieron una tendencia similar (Cuadro 1 y Figura 3). En ambos parámetros, el análisis de varianza mostró diferencias altamente significativas entre los tratamientos ($P \leq 0.01$). El tratamiento 60-60 fue significativamente superior ($P \leq 0.05$) en cuanto al R y la WUE ($5.46 \text{ t} \cdot \text{ha}^{-1}$ y $0.922 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$, respectivamente) (Cuadro 1). Lo anterior se atribuye a la aplicación del riego al 58.8 y 60.5 % de la HAC; es decir, cuando el suelo presenta una tensión de -0.48 y -0.461 MPa para extraer la humedad en el primer y segundo periodo, respectivamente. Paul et al. (2020) señalan que el límite inferior clásico de marchitamiento permanente del cultivo es de -1.5 MPa. Khaleghi et al. (2020) encontraron, en tratamientos controlados de girasol, que los valores umbrales por debajo de los cuales la tasa de expansión de las hojas y la transpiración comienzan a disminuir está cerca de 60 % de la HAC para la expansión foliar y de 40 % de la HAC para la transpiración diaria. Esto indica que los resultados encontrados son coherentes con los de la literatura.

El valor promedio más alto de WUE, encontrado en este trabajo, es similar a los valores obtenidos por

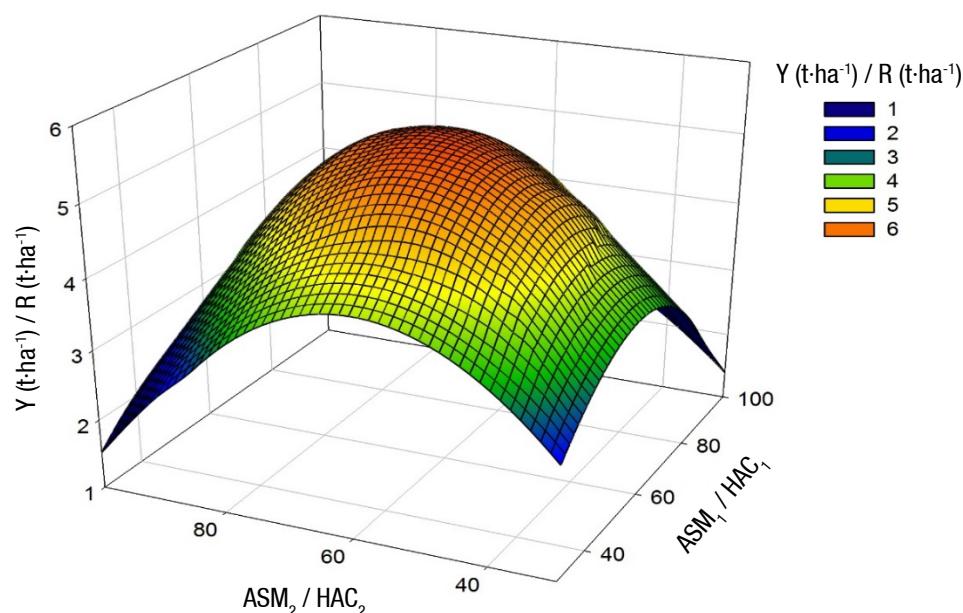


Figure 3. Response of sunflower grain yield (Y) under different irrigation conditions. ASM_1 and ASM_2 = available soil moisture at vegetative and reproductive stages, respectively.

Figura 3. Respuesta del rendimiento de grano (R) de girasol sometido a diferentes condiciones de riego. HAC_1 y HAC_2 = humedad aprovechable consumida en la etapa vegetativa y reproductiva, respectivamente.

100-60 (0.452 and 0.445 kg·m⁻³, respectively). These combinations had in common water stress conditions close to the permanent wilting point in some of the stages studied. Comparison of means indicated that these treatments were statistically lower in Y and WUE than the rest of the treatments, but equal to each other (Table 1). The above indicates a non-linear response of sunflower Y and WUE by soil moisture conditions at the time of irrigation. That is, an increasing and decreasing effect of Y and WUE was observed due to the different levels of moisture depletion studied (Figure 3).

The moment and when to apply irrigation to sunflower is more important than the amount of water in the response of Y and WUE. This is evidenced by comparing the highest Y and WUE treatment (60-60 with 5.46 t·ha⁻¹ and 0.922 kg·m⁻³, respectively), with the lowest Y and WUE treatment (60-100 con 2.46 t·ha⁻¹ y 0.452 kg·m⁻³, respectively).

Grain yield production model with soil moisture regime

The observed data of Y (dependent variable) and ASM (independent variable) in two phenological periods of sunflower were fitted by regression analysis. The function found is presented in Equation 1.

$$\begin{aligned} Y = & -5.6044 + 0.1619ASM_1 + 0.1999ASM_2 \\ & - 0.0017ASM_1^2 - 0.002ASM_2^2 + 0.0008ASM_1ASM_2 \\ R^2 = & 0.93 \quad CV = 7.5 \% \end{aligned} \quad (1)$$

where Y is the grain yield (t·ha⁻¹), ASM₁ and ASM₂ are the available moisture used at vegetative and reproductive stages, respectively (%), R² is the coefficient of determination and CV is the coefficient of variation. The regression coefficients of each of the linear effects (quadratic and interaction) were highly significant, so they help in the model to explain the response of the crop to the treatments.

According to the statistical parameters (R² and CV), the model obtained satisfactorily explains the phenomenon that occurred (Figure 3). The optimum levels of ASM were determined and it was found that the highest Y (5.5 t·ha⁻¹) was found under a soil moisture regime of 60.5 and 61.6 % ASM at vegetative and reproductive stages of the crop, respectively. These results agree with those reported by García-López et al. (2016), who concluded that the optimum yield is found between 60 and 80 % ASM. When analyzing the proximity of the maximum marginal productivity of the model, it is estimated that when plants are exposed to a soil water deficit of 70 and 70 % ASM, grain yield only decreases 2.4 %, which is not significant compared to the yield referred previously.

otros autores que aplicaron diferentes estrategias de manejo del riego. Sezen et al. (2011) obtuvieron valores de hasta 1 kg·m⁻³ mediante la técnica de secado parcial de raíces, y Farhadi-Machekposhti et al. (2017) encontraron valores cercanos a 1 kg·m⁻³ al mezclar hasta un 30 % de agua de mar en agua dulce.

Por otro lado, el valor más alto de WUE es superior al reportado por Karam et al. (2007) (0.83 kg·m⁻³), con la técnica de riego deficitario, y por El-Bialy et al. (2018) (0.75 kg·m⁻³), quienes usaron ácido ascórbico para aliviar los efectos adversos del déficit hídrico en las plantas de girasol. En general, se encontró que los valores de WUE son mayores en tratamientos estresados que en los irrigados abundantemente (García-López et al., 2016). Considerando lo anterior, someter el cultivo de girasol a estrés y dejar que la HAC llegue al 60 % puede ser una alternativa para incrementar la eficiencia en el uso del agua, además de ser una práctica ideal en zonas que sufren períodos frecuentes de déficit hídrico.

Los valores más bajos de R y WUE se obtuvieron con los tratamientos 60-100 (2.4 y 2.8 t·ha⁻¹, respectivamente) y 100-60 (0.452 y 0.445 kg·m⁻³, respectivamente). Estas combinaciones tuvieron en común condiciones de estrés hídrico cercanas al punto de marchitez permanente en alguna de las etapas estudiadas. La comparación de medias indicó que dichos tratamientos resultaron ser estadísticamente inferiores en R y WUE con respecto al resto de los tratamientos, pero iguales entre sí (Cuadro 1). Lo anterior indica una respuesta no lineal del R y la WUE del girasol por condiciones de humedad del suelo al momento del riego. Es decir, se observó un efecto creciente y decreciente del R y la WUE debido a los diferentes niveles de abatimiento de humedad estudiados (Figura 3).

El momento o el cuándo realizar la aplicación del riego al girasol es más importante que la cantidad de agua en la respuesta del R y la WUE. Esto se evidencia al comparar el tratamiento de mayor R y WUE (60-60 con 5.46 t·ha⁻¹ y 0.922 kg·m⁻³, respectivamente), con el tratamiento de menor R y WUE (60-100 con 2.46 t·ha⁻¹ y 0.452 kg·m⁻³, respectivamente).

Modelo de producción del rendimiento de grano con régimen de humedad del suelo

Mediante el análisis de regresión, se ajustaron los datos observados del R (variable dependiente) y la HAC (variable independiente) en dos períodos fenológicos del girasol. La función encontrada se presenta en la Ecuación 1.

$$\begin{aligned} R = & -5.6044 + 0.1619HAC_1 + 0.1999HAC_2 \\ & - 0.0017HAC_1^2 - 0.002HAC_2^2 + 0.0008HAC_1HAC_2 \\ R^2 = & 0.93 \quad CV = 7.5 \% \end{aligned} \quad (1)$$

Model of grain yield and water consumed

When relating Y and WC of each treatment, we found that there is a quadratic relationship between these variables. The function obtained, after performing the regression analysis between both variables, is shown in Equation 2.

$$Y = -50.5588 + 0.9236LC_1 + 2.7244LC_2 - 0.0188LC_1^2 - 0.0519LC_2^2 + 0.0109LC_1LC_2$$

$$R^2 = 0.87 \quad CV = 10.3 \% \quad (2)$$

Where WC_1 y WC_2 is water consumed at vegetative and reproductive stages, respectively (cm).

The previous fitted model has a satisfactory predictive ability for this type of complex biological relationships, where several plant, soil and environmental factors are involved (Figure 4). Model optimization was performed according to differential calculus, and it resulted that sunflower grain yield is maximized at $5.5 \text{ t}\cdot\text{ha}^{-1}$ by consuming 33.1 and 29.7 cm of water at vegetative and reproductive stage, respectively. However, when applying the irrigation deficit criterion, the neighborhoods to the optimum were analyzed and it was deduced that,

donde R es el rendimiento de grano ($\text{t}\cdot\text{ha}^{-1}$), HAC_1 y HAC_2 son la humedad aprovechable consumida en la etapa vegetativa y reproductiva, respectivamente (%), R^2 es el coeficiente de determinación y CV es el coeficiente de variación. Los coeficientes de la regresión de cada uno de los efectos lineales (cuadrático e interacción) fueron altamente significativos, por lo que contribuyen en el modelo para explicar la respuesta del cultivo a los tratamientos.

De acuerdo con los parámetros estadísticos (R^2 y CV), el modelo obtenido explica en forma satisfactoria el fenómeno ocurrido (Figura 3). Se determinaron los niveles óptimos de la HAC y se encontró que el mayor R ($5.5 \text{ t}\cdot\text{ha}^{-1}$) se obtuvo bajo un régimen de humedad en el suelo de 60.5 y 61.6 % de HAC en la etapa vegetativa y reproductiva del cultivo, respectivamente. Estos resultados concuerdan con los reportados por García-López et al. (2016), quienes concluyeron que el rendimiento óptimo se obtiene entre el 60 y 80 % de la HAC. Al analizar la cercanía de la máxima productividad marginal del modelo, se estima que al someter las plantas a un déficit hídrico en el suelo de 70 y 70 % de la HAC, el rendimiento de grano solo disminuye 2.4 %, lo cual no es significativo con respecto al rendimiento referido anteriormente.

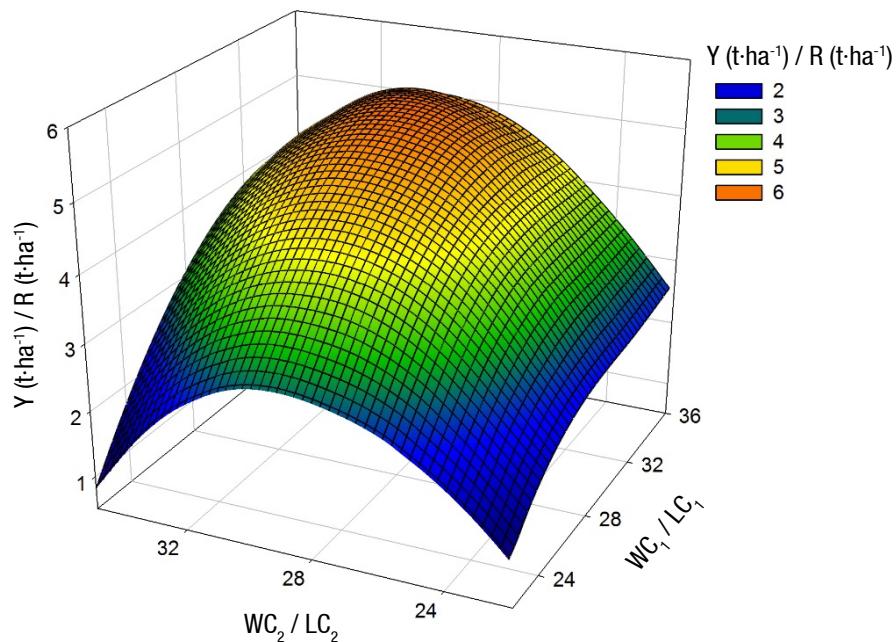


Figure 4. Sunflower grain yield (Y) with different treatments of water consumed (cm) at vegetative (WC_1) and reproductive (WC_2) stages.

Figura 4. Rendimiento de grano (R) del girasol con diferentes tratamientos de lámina de agua consumida (cm) en la etapa vegetativa (LC_1) y la reproductiva (LC_2).

if sunflower consumes 29 and 29 cm in the mentioned stages, Y has a non-significant reduction of 6.1 %, which would allow a saving of 500 m³·ha⁻¹.

Conclusions

The highest water use efficiency of sunflower (0.922 kg·m³) was found when 31.4 and 28.12 cm of irrigation, with soil water levels of 58.8 and 60.5 % of available soil moisture at vegetative and reproductive stage, respectively, which corresponded to the 60-60 treatment.

The developed model, which relates grain yield and soil moisture levels, maximizes sunflower production at 5.5 t·ha⁻¹, under soil water stress of 60.5 and 61.6 % of available soil moisture at vegetative and reproductive stages, respectively. However, the function estimates that it is possible to apply a water deficit of up to 70 and 70 % of the usable moisture in the mentioned stages, with a non-significant decrease in grain yield (2.4 %).

The optimization of the function that related grain yield to the amount of water consumed showed that the maximum yield occurs when the crop consumes 33.1 and 29.7 cm of water at vegetative and reproductive stages, respectively. In a similar way, this model estimated that, when applying an irrigation deficit of 29 and 29 cm in the stages under study, an insignificant decrease of 6 % in grain yield is reached.

According to the information provided by the different soil water conditions, grain yield and water productivity show a non-linear response to both water stress and water consumption.

End of English version

References / Referencias

- Castellanos, J. Z., Uvalle-Bueno, J. X., & Aguilar-Santelises, A. (2000). *Manual de interpretación de análisis de suelos y aguas*. Instituto de Capacitación para la Productividad Agrícola.
- Comisión Nacional del Agua (CONAGUA). (2019). *Estadísticas agrícolas de las unidades de riego: año agrícola 2017-2018*. https://files.conagua.gob.mx/conagua/publicaciones/Publicaciones/EAUR_2017-2018.pdf
- El-Bialy, M., Saudy, H., El-Metwally, I., & Shahin, M. (2018). Efficacy of ascorbic acid as a cofactor for alleviating water deficit impacts and enhancing sunflower yield and irrigation water-use efficiency. *Agricultural Water Management*, 208, 132-139. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2018.06.016>
- Ebrahimian, E., Seyyedi, S. M., Bybordi A., & Damalas, C. A. (2019). Seed yield and oil quality of sunflower, safflower,

Modelo del rendimiento de grano y de la lámina de agua consumida

Al relacionar el R y la LC de cada tratamiento, se encontró que existe una relación de tipo cuadrática entre estas variables. Dicha función obtenida, después de realizar el análisis de regresión entre ambas variables, resultó en la Ecuación 2.

$$\begin{aligned} R = & -50.5588 + 0.9236LC_1 + 2.7244LC_2 - 0.0188LC_1^2 \\ & - 0.0519LC_2^2 + 0.0109LC_1LC_2 \end{aligned} \quad (2)$$

donde LC₁ y LC₂ son la lámina de agua consumida en la etapa vegetativa y reproductiva, respectivamente (cm).

El modelo ajustado anterior tiene una capacidad de predicción satisfactoria para este tipo de relaciones biológicas complejas, donde intervienen diversos factores de la planta, el suelo y el ambiente (Figura 4). La optimización del modelo se realizó de acuerdo con el cálculo diferencial, y resultó que la producción de grano de girasol se maximiza a 5.5 t·ha⁻¹ al consumir 33.1 y 29.7 cm de agua en la fase vegetativa y reproductiva, respectivamente. Sin embargo, al aplicar el criterio del déficit de riego, se analizaron las vecindades al óptimo y se dedujo que, si el girasol consume 29 y 29 cm en las etapas mencionadas, el R tiene una reducción no significativa de 6.1 %, lo cual permitiría un ahorro de 500 m³·ha⁻¹.

Conclusiones

La mayor eficiencia de uso del agua del girasol (0.922 kg·m³) se obtuvo cuando se consumieron 31.4 y 28.12 cm de lámina de riego, con niveles hídricos del suelo de 58.8 y 60.5 % de la humedad aprovechable consumida en la etapa vegetativa y reproductiva, respectivamente, lo cual correspondió con el tratamiento 60-60.

El modelo generado, que relaciona el rendimiento de grano y los niveles de humedad del suelo, maximiza la producción de girasol a 5.5 t·ha⁻¹, esto bajo estrés hídrico del suelo de 60.5 y 61.6 % de la humedad aprovechable consumida en la etapa vegetativa y reproductiva, respectivamente. No obstante, la función estima que es posible aplicar un déficit hídrico de hasta 70 y 70 % de la humedad aprovechable en las etapas citadas, con una disminución no significativa del rendimiento de grano (2.4 %).

La optimización de la función que relacionó la producción de grano con la cantidad de agua consumida arrojó que el máximo rendimiento se presenta cuando el cultivo consume 33.1 y 29.7 cm de agua durante la etapa vegetativa y reproductiva, respectivamente. En

- and sesame under different levels of irrigation water availability. *Agricultural Water Management*, 218, 149-157. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2019.03.031>
- Escalante-Estrada, L., Escalante-Estrada, Y., & Linzaga-Elizalde, C. (2007). La fertilización nitrogenada en el rendimiento del girasol en México. *Agronomía Costarricense*, 31(2), 95-100. <https://www.redalyc.org/pdf/436/43631214.pdf>
- Farhadi-Machekposhti, M., Shahnazari, A., Ahmadi, M. Z., Aghajani, G., & Ritzema, H. (2017). Effect of irrigation with sea water on soil salinity and yield of oleic sunflower. *Agricultural Water Management*, 188, 69-78. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2017.04.002>
- Galindo, A., Collado-González, J., Grinán, I., Corell, M., Centeno, A., Martín-Palomo, M. J., Girón, I. F., Rodríguez, P., Cruz, Z. N., Memmi, H., Carbonell-Barrachina, A. A., Hernández, F., Torrecillas, A., Moriana, A., & López-Pérez, D. (2018). Deficit irrigation and emerging fruit crops as a strategy to save water in Mediterranean semiarid agrosystems. *Agricultural Water Management*, 202, 311-324. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2017.08.015>
- García, E. (2004). *Modificaciones al sistema de clasificación climática de Koppen*. Instituto de Geografía de la Universidad Nacional Autónoma de México. <http://www.publicaciones.igg.unam.mx/index.php/ig/catalog/view/83/82/251-1>
- García-López, J., Lorite, I. J., García-Ruiz, R., Ordoñez, R., & Domínguez, J. (2016). Yield response of sunflower to irrigation and fertilization under semi-arid conditions. *Agricultural Water Management*, 176, 151-162. <http://dx.doi.org/10.1016/j.agwat.2016.05.020>
- Howell, T. A., Evett, S. R., Tolk, J. A., Copeland, K. S., & Marek, T. H. (2015). Evapotranspiration, water productivity and crop coefficients for irrigated sunflower in the U.S. Southern High Plains. *Agricultural Water Management*, 162, 33-46. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2015.08.008>
- Inzunza-Ibarra, M. A., Inzunza-Ibarra, M. A., Catalán-Valencia, E. A., Villa-Castorena, M. M., & Ramírez, G. D. (2012). Calibración de TDR para estimar el contenido de humedad volumétrica en el suelo. *AGROFAZ*, 12(3), 59-65. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=5517359>
- Karam, F., Lahoud, R., Masaad, R., Kabalan, R., Breidi, J., Chalita, C., & Rouphael, Y. (2007). Evapotranspiration, seed yield and water use efficiency of drip irrigated sunflower under full and deficit irrigation conditions. *Agricultural Water Management*, 90(3), 213-223. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2007.03.009>
- Khaleghi, M., Hassanpour, F., Karandish, F., & Shahnazari, A. (2020). Integrating partial root-zone drying and saline water irrigation to sustain sunflower production in freshwater-scarce regions. *Agricultural Water Management*, 234, 106094. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2020.106094>
- Kiani, M., Gheysari, M., Mostafazadeh-Fard, B., Majidi, M. M., Karchani, K., & Hoogenboom, G. (2016). Effect of the interaction of water and nitrogen on sunflower under drip irrigation in an arid region. *Agricultural Water Management*, 171, 62-172. <http://dx.doi.org/10.1016/j.agwat.2016.04.008>
- formá similar, este modelo estimó que, al aplicar un déficit de riego de 29 y 29 cm en las etapas bajo estudio, se obtiene una disminución insignificante del 6 % en rendimiento de grano.
- De acuerdo con la información generada por las diferentes condiciones hídricas del suelo, el rendimiento de grano y la productividad del agua presentan una respuesta no lineal, tanto al estrés hídrico como al consumo de agua.

Fin de la versión en español

- Liu, R., Abdelraouf, E. A., Bicego, B., Joshi, V. R., & Garcia y Garcia, A. (2018). Deficit irrigation: a viable option for sustainable confection sunflower (*Helianthus annuus* L.) production in the semi-arid US. *Irrigation Science*, 36, 319-328. <https://doi.org/10.1007/s00271-018-0588-6>
- López-Urrea, R., Montoro, A., & Trout, T. J. (2014). Consumptive water use and crop coefficients of irrigated sunflower. *Irrigation Science*, 32, 99-109. <https://doi.org/10.1007/s00271-013-0418-9>
- Mila, A. J., Ali, M. H., Akanda, A. R., Rashid, M. H., & Rahman, M. A. (2017). Effects of deficit irrigation on yield, water productivity and economic return of sunflower. *Cogent Food & Agriculture*, 3(1), 1287619. <https://doi.org/10.1080/23311932.2017.1287619>
- Paul, P. L., Bell, R. W., Barrett-Lennard, E. G., & Kabir, E. (2020). Straw mulch and irrigation affect solute potential and sunflower yield in a heavy textured soil in the Ganges Delta. *Agricultural Water Management*, 239, 106211. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2020.106211>
- Richards, L. A. (1977). *Diagnóstico y rehabilitación de suelos salinos-sódicos*. Editorial Limusa.
- Ren, D., Xu, X., Engel, B., & Huang, G. (2018). Growth responses of crops and natural vegetation to irrigation and water table changes in an agro-ecosystem of Hetao, upper Yellow river basin: Scenario analysis on maize, sunflower, watermelon and tamarisk. *Agricultural Water Management*, 199, 93-104. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2017.12.021>
- SAS Institute (2011). *SAS/STAT® 9.3 User's guide*. SAS Institute. <https://doi=10.1.1.226.6407&rep=rep1&type=pdf>
- Sezen, S. M., Yazar, A., Kapur, B., & Tekin, S. (2011). Comparison of drip and sprinkler irrigation strategies on sunflower seed and oil yield and quality under Mediterranean climatic conditions. *Agricultural Water Management*, 98, 1153-1161. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2011.02.005>
- Steduto, P., Hsiao, T. C., Fereres, E., & Raes, D. (2012). *Crop yield response to water*. Food and Agriculture Organization. <http://www.fao.org/3/i2800e/i2800e.pdf>
- Villasmil, P. J., Martínez, E., & Segura, G. (1974). El diseño San Cristóbal y su uso en ensayos de fertilización en Caña de Azúcar. *Revista de la Facultad de Agronomía*, 3, 7-25. <https://produccioncientificaluz.org/index.php/agronomia/article/view/25874/26500>