

DOI: 10.24850/j-tyca-2025-06-07

Artículos

## **Rendimiento y productividad del agua en cultivos de invierno bajo riego deficitario**

### **Yield and water productivity in winter crops under deficit irrigation**

Sergio Arturo Ortiz-Díaz<sup>1</sup>, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6948-6385>

Pablo Preciado-Rangel<sup>2</sup>, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3450-4739>

Manuel Fortis-Hernández<sup>3</sup>, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7374-8779>

Ricardo Israel Ramírez-Gottfried<sup>4</sup>, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6694-642X>

Sellenne Yuridia Márquez-Guerrero<sup>5</sup>, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5910-8794>

Jessica Janeth Rocha-Santillano<sup>6</sup>, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4879-2321>

Arturo Reyes-González<sup>7</sup>, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6983-0905>

<sup>1</sup>Tecnológico Nacional de México, Campus Instituto Tecnológico de Torreón, Coahuila, México, [sergio.ortdiaz@gmail.com](mailto:sergio.ortdiaz@gmail.com)

<sup>2</sup>Tecnológico Nacional de México, Campus Instituto Tecnológico de Torreón, Coahuila, México, ppreciador@yahoo.com.mx

<sup>3</sup>Tecnológico Nacional de México, Campus Instituto Tecnológico de Torreón, Coahuila, México, fortismanuel@hotmail.com

<sup>4</sup>Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro, Unidad Laguna, Coahuila, México, gottfried\_ricardo@hotmail.com

<sup>5</sup>Tecnológico Nacional de México, Campus Instituto Tecnológico de Torreón, Coahuila, México, selenne.mg@torreon.tecnm.mx

<sup>6</sup>Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro, Unidad Laguna, Coahuila, México, janethrocha17@gmail.com

<sup>7</sup>Campo Experimental La Laguna- Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias, Coahuila, México, reyes.arturo@inifap.gob.mx

Autor para correspondencia: Arturo Reyes-González, reyes.arturo@inifap.gob.mx

## Resumen

El riego deficitario es una estrategia para incrementar la productividad del agua especialmente en las zonas áridas y semiáridas. Con el objetivo de evaluar el efecto del riego deficitario (60, 80 y 100 de la evapotranspiración, ET) sobre el rendimiento y la productividad del agua en cultivos de invierno, se estableció un trabajo de campo, para lo cual se utilizó un diseño experimental de parcelas divididas en bloques al azar con cuatro repeticiones. Los porcentajes de ET corresponden a la parcela principal (60, 80 y 100 %) bajo un sistema de riego por goteo y un testigo

con riego por inundación los cultivos de invierno: cebada (*Hordeum vulgare* L.); canola (*Brassica napus* L.); triticale (*X Triticosecale Wittmack*); avena (*Avena sativa* L.), y cártamo (*Carthamus tinctorius* L.) como subparcelas. Los resultados muestran que el rendimiento de biomasa de las especies y la productividad del agua (PA) dependen del riego deficitario. Con la ET de 80 y 100 % se obtuvieron los mayores rendimientos de forraje verde y seco en la cebada, triticale y avena, respectivamente. La mayor productividad del agua corresponde a los tratamientos con 60 y 80 % de ET (4 y 3.75 kg m<sup>-3</sup>). El riego deficitario con el 60 % de ET permite mantener el potencial forrajero y la productividad del agua en los cultivos de invierno.

**Palabras clave:** evapotranspiración, riego por goteo, potencial forrajero.

## Abstract

Deficit irrigation is a strategy to increase water productivity, especially in arid and semi-arid areas. With the objective of evaluating the effect of deficit irrigation (60, 80 and 100 of evapotranspiration (ET) on the yield and productivity of water in winter crops, field work was established using an experimental design of plots divided into random blocks with four repetitions. The ET percentages correspond to main plot (60, 80 and 100 %) under a drip irrigation system and a control with flood irrigation, the winter crops: barley (*Hordeum vulgare* L.); canola (*Brassica napus* L.); triticale (*X Triticosecale Wittmack*); oats (*Avena sativa* L.), and safflower (*Carthamus tinctorius* L.) as subplots. The results show that the biomass yield of the species and water productivity (PA) depend on deficit irrigation. With the 80 and 100 % of ET, the highest yields of green and dry forage were obtained in barley, triticale and oats respectively. The

highest water productivity corresponds to the treatments with 60 and 80 % ET (4 y 3.75 kg m<sup>-3</sup>). Deficit irrigation at 60 % ET allows maintaining forage potential and water productivity in winter crops.

**Keywords:** Evapotranspiration, drip irrigation, forage potential.

Recibido: 17/06/2024

Aceptado: 26/01/2025

Publicado *ahead of print*: 30/01/2025

Versión final: 01/11/2025

## Introducción

La producción de leche en México en 2020 fue de 12 mil 554 millones de litros, la Comarca Lagunera aporta el 21 % de la producción nacional, que representa una de las principales actividades económicas de la región (SIAP, 2021). Al ser la principal cuenca lechera del país demanda grandes cantidades de forraje por año; la principal fuente de alimentación se basa en maíz y alfalfa (Sader, 2021); sin embargo, el maíz se produce solo en el ciclo primavera-verano y en el invierno la producción de alfalfa disminuye debido a que las condiciones climáticas no son favorables para su desarrollo.

Ante esta situación, el empleo de especies forrajeras adaptables a las condiciones climáticas y edáficas prevalientes durante el ciclo otoño-invierno es de vital importancia. Cultivos como triticale, cebada y cártamo son especies capaces de desarrollarse en condiciones limitadas de agua de riego y con potencial para producir forrajes de alto valor nutricional

durante el periodo de invierno (Ochoa-Espinoza *et al.*, 2022a). La avena es un cultivo de alta adaptabilidad en zonas áridas y semiáridas, de bajo requerimiento hídrico y con producciones de forraje de alto valor energético (Servin-Palestina, Sánchez-Gutiérrez, Ramírez-Valle, Galindo-Reyes, & Gutiérrez-Bañuelos, 2018). Otra alternativa para estas condiciones edafoclimáticas es la canola, la cual presenta tolerancia a las condiciones limitadas de agua y salinidad; en estas condiciones soporta bajas temperaturas y produce forrajes de buena calidad con rendimientos de proteína cruda (PC) y energía neta de lactancia (ENL) similares a cultivares de primavera (Reta-Sánchez, Serrato-Corona, Quiroga-Garza, Figueroa-Viramontes, & Gaytán-Mascorro, 2017). Las especies antes mencionadas pudieran incrementar el potencial forrajero en el ciclo otoño-invierno en la Laguna.

Una de las principales limitantes para la producción de forrajes en la Comarca Lagunera es la baja disponibilidad de agua, ya que para satisfacer la gran demanda de alimento para el ganado bovino se requiere de altos volúmenes de agua de riego (Reyes, Franco, Hernández, & Maltos, 2020), por lo que es necesario utilizar técnicas que permitan obtener mayor productividad del agua y aumentar los rendimientos de los cultivos. El sistema de riego por goteo subterráneo es un sistema que minimiza la evaporación del agua de la superficie del suelo, lo que resulta en mayor producción de biomasa e incremento en la eficiencia en el uso de agua (Reyes *et al.*, 2023).

Por otro lado, la evapotranspiración (ET) es fundamental para la programación del riego en los cultivos (Reyes *et al.*, 2023). Diferentes porcentajes de ET se han aplicado en la calendarización del riego en varios cultivos, que incluyen maíz (Zavala-Borrego, Reyes-González, Álvarez-Reyna, Cano-Ríos, & Rodríguez-Moreno, 2022); alfalfa (Godoy-Ávila,

Pérez-Gutiérrez, Torres, Hermosillo, & Reyes, 2003); trigo (Alghory & Yazar, 2019), y avena (Reyes-González *et al.*, 2011); sin embargo, para cebada, canola y cártamo se tiene poca información para la región.

El riego deficitario es una estrategia de ahorro de agua comúnmente utilizada en las zonas áridas y semiáridas. Consiste en aplicar cantidades de agua inferiores a los requerimientos hídricos del cultivo (Flores, Ojeda, Flores, Sifuentes, & Mejía, 2013).

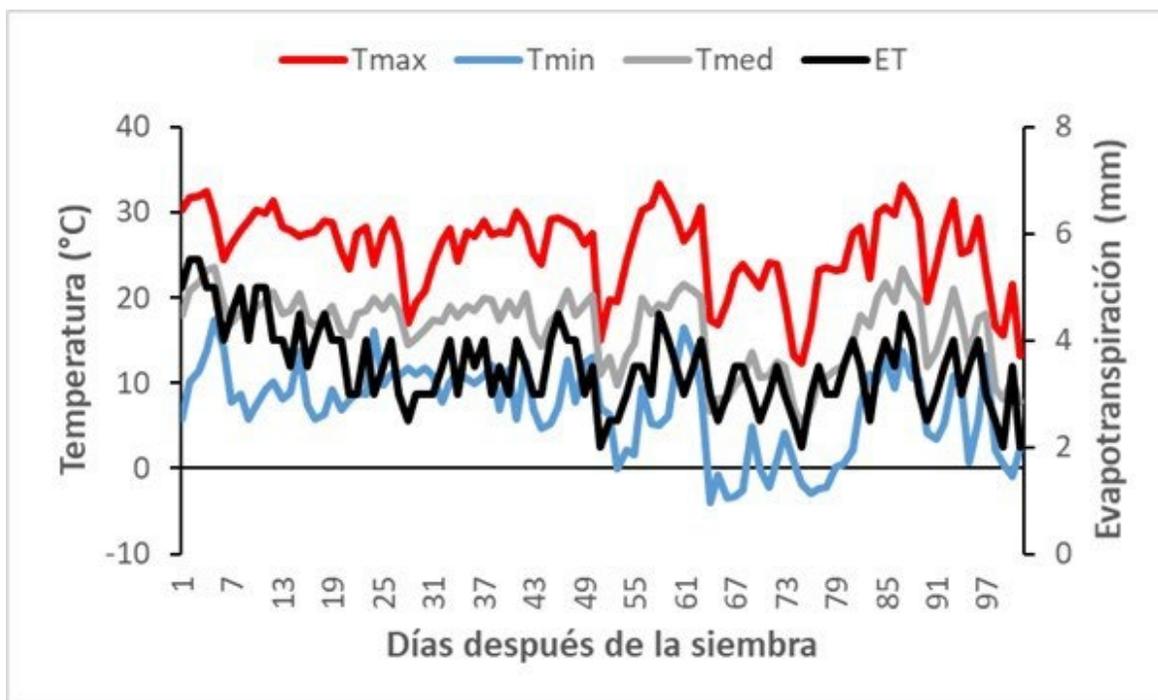
La aplicación de diferentes niveles de irrigación basados en porcentajes de ET y déficit hídrico puede mantener el potencial productivo de los cultivos de invierno. Debido a lo anteriormente mencionado, el objetivo del presente estudio fue evaluar el efecto del riego deficitario (100, 80 y 60 % de ET) sobre el rendimiento y la productividad del agua en cultivos de invierno bajo un sistema de riego por goteo y riego por inundación en la Comarca Lagunera. La hipótesis planteada es que el rendimiento y productividad del agua se mantienen al aplicar diferentes niveles de irrigación basado en porcentaje de evapotranspiración y déficit hídrico en la Comarca Lagunera.

## Materiales y métodos

### Localización del experimento

El presente estudio se llevó a cabo durante el ciclo otoño-invierno 2021-2022 en el Campo Experimental "La Laguna" (CELALA) del Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (INIFAP), ubicado en Matamoros, Coahuila, México (25° 32' N, 103° 14' O y 1 150 msnm). El suelo del sitio experimental presenta una textura franco-arcillosa, capacidad de campo de 35.2 %, punto de marchitez permanente

de 20.57 %, densidad aparente de  $1.3 \text{ g cm}^{-3}$ , pH alcalino, bajo en materia orgánica, fósforo y nitrógeno disponible. El clima seco semicálido (Bwh) con humedad atmosférica escasa, temperatura media anual de  $22.6 \text{ }^\circ\text{C}$ , mientras que la precipitación anual promedio es de  $215.5 \text{ mm}$  y evaporación media anual de  $2\,000 \text{ mm}$  (García, 2004). Las condiciones climáticas prevalecientes durante el desarrollo del cultivo fueron las siguientes: la temperatura mínima fue de orden creciente con  $-4 \text{ }^\circ\text{C}$  hasta alcanzar  $16.5 \text{ }^\circ\text{C}$ . La máxima fue de  $16.9$  a  $33.3 \text{ }^\circ\text{C}$  y la temperatura media durante el ciclo fue en el rango de  $7$  a  $23.5 \text{ }^\circ\text{C}$  (Figura 1). La evapotranspiración (ET) promedio fue de  $3.5 \text{ mm día}^{-1}$  durante el ciclo de producción.



**Figura 1.** Temperaturas mínimas, máximas, medias y evapotranspiración durante el ciclo de producción en cultivos de invierno con diferentes niveles de irrigación basados en porcentajes de ET y riego por inundación.

## Preparación del terreno

La preparación del terreno consistió en subsolación, barbecho, rastra, nivelación y colocación de cinta de riego. Se evaluaron cinco especies de cultivos: 1) cebada Valencia; 2) Canola IMC 205; 3) triticale río Nazas; 4) avena Cuauhtémoc, y 5) cártamo Forrcart 2020. Se utilizó un diseño experimental de parcelas divididas en bloques al azar con cuatro repeticiones. Los diferentes niveles de irrigación basados en porcentajes de ET se consideraron como parcela grande (100, 80 y 60 % de ET) y un testigo con riego por inundación, mientras que las parcelas chicas se conformaron por las diferentes especies de cultivos (cebada, canola, triticale, avena y cártamo). Cada parcela experimental constó de 15 hileras, con una distancia entre surcos de 0.20 y 5 m de longitud (15 m<sup>2</sup>). La siembra se realizó en seco de forma manual el 30 de octubre de 2021, con densidades de 15 a 80 kg ha<sup>-1</sup>. La dosis de fertilización utilizada para los diferentes cultivos fue de 200-100-00 (N-P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>-K<sub>2</sub>O); se utilizó como fuente de nitrógeno urea CO(NH<sub>2</sub>)<sub>2</sub> y sulfato de amonio (NH<sub>4</sub>)<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, y como fuente de fósforo el fosfato monoamónico (MAP) NH<sub>4</sub>H<sub>2</sub>PO<sub>4</sub>. A la siembra se aplicó todo el fósforo y la mitad del nitrógeno; el resto del nitrógeno se aplicó cada 15 días durante el crecimiento del cultivo acorde con su requerimiento mediante el sistema de riego por goteo usando un inyector Venturi. En el riego por inundación se aplicó la otra mitad de nitrógeno al voleo de forma manual a los 25 días después de la siembra (DDS).

## Riegos

La cinta de riego utilizada fue RO-DRIP 8 mil (Rivulis Irrigation Inc., San Diego, CA, EUA) con espesor de pared de 0.2 mm, diámetro interior de 16 mm, con emisores a 0.2 m de separación y un gasto de 0.5 l h<sup>-1</sup> por emisor. El sistema de riego operó a una presión de 55.15 kilo pascales (8 PSI), con intervalo de riego cada tercer día. En el riego por inundación o superficial, la frecuencia de riego fue con intervalos de 25 días entre ellos. Para la estimación de la ET de referencia se utilizó un atmómetro (ETgage, modelo A comercializado por ETgage Company Loveland, Colorado, EUA), ubicado a 50 m del sitio experimental. Las lecturas fueron diarias y se multiplicaron por el coeficiente de cultivo (Kc) de cada cultivo para obtener la evapotranspiración de los cultivos (ETc).

## Variables evaluadas

### Potencial hídrico foliar

La medición del potencial hídrico foliar ( $\Psi_h$ ) se realizó semanalmente durante el ciclo de producción con la ayuda de la bomba de presión propuesta por Scholander, Bradstreet, Hemmingsen y Hammel (1965). Se hicieron dos muestreos por tratamiento y repetición entre las 12:00 y 14:00 horas del día. Se seleccionaron dos hojas sanas de la parte superior del cultivo de cada tratamiento y repetición, las cuales se cubrieron con tela humedecida para evitar la pérdida de humedad en el traslado antes de su medición (Alghory & Yazar, 2019).

## Temperatura del dosel del cultivo

Para medir la temperatura del dosel del cultivo ( $^{\circ}\text{C}$ ) se utilizó un termómetro digital infrarrojo modelo 42530 (Extech instruments Inc., Boston, MA, EUA), con campo de visión de 8:1 (a 8 pies = 2.4 m) de distancia. Las temperaturas se tomaron cada semana bajo radiación directa a partir de los 35 DDS. Se tomaron dos lecturas por tratamiento y repetición a una altura de 25 cm por encima del dosel del cultivo con ángulo de inclinación de  $20^{\circ}$  con respecto al nivel perpendicular del dosel del cultivo.

## Altura de las plantas

La altura final de las plantas se midió con una cinta métrica desde la base del tallo hasta la espiga o última hoja en tres plantas escogidas al azar en cada tratamiento y repetición al momento de la cosecha, y se promediaron.

## Índice de área foliar

El índice de área foliar (IAF) se obtuvo al utilizar el ceptómetro PAR/LAI modelo Lp-80 de AccuPAR (Decagon Devices, Inc. Pullman, WA, EUA). La barra del ceptómetro se colocó en un ángulo de  $45^{\circ}$  a través de los surcos en cada uno de los cultivos para medir la intercepción de la radiación fotosintéticamente activa (PAR). El IAF se midió entre las 12:00 y 14:00 horas, con tres lecturas por encima y por debajo del dosel del cultivo en cada tratamiento y repetición. Las lecturas se tomaron en días despejados con intervalos de siete días.

## Rendimiento

La cosecha de cebada, triticale y avena se realizó cuando la maduración del grano presentó un estado lechoso masoso (Xu *et al.*, 1995). En canola, la cosecha se efectuó en la fase final de la floración. En el cártamo, la cosecha se llevó a cabo en la fase de yemas florales (Espinoza *et al.*, 2023). Se determinó el rendimiento de forraje verde (FV) y forraje seco (FS) para cada una de las especies cultivadas. La producción de forraje verde se calculó al pesar 2 m<sup>2</sup> de biomasa de cada uno de los cultivos y se promediaron en cada unidad experimental de cada tratamiento y repetición. Posteriormente, se tomó una muestra de 500 g y se secó en una estufa de aire forzado (UF 260 Plus, Memmert, Alemania) a una temperatura de 65 °C hasta alcanzar un peso constante (Buthelezi, Mupangwa, Muchenje, & Nherera, 2019) para determinar el porcentaje de materia seca (MS). El rendimiento de forraje seco de cada especie se estimó con la producción de forraje verde y el porcentaje de MS.

## Productividad del agua

La productividad de agua (PA) se obtuvo al dividir el rendimiento seco cosechado (kg) de cada uno de los forrajes entre el volumen total de agua aplicada (m<sup>3</sup>) durante el ciclo de producción en cada tratamiento (Fernández & Camacho, 2005).

## Análisis estadístico

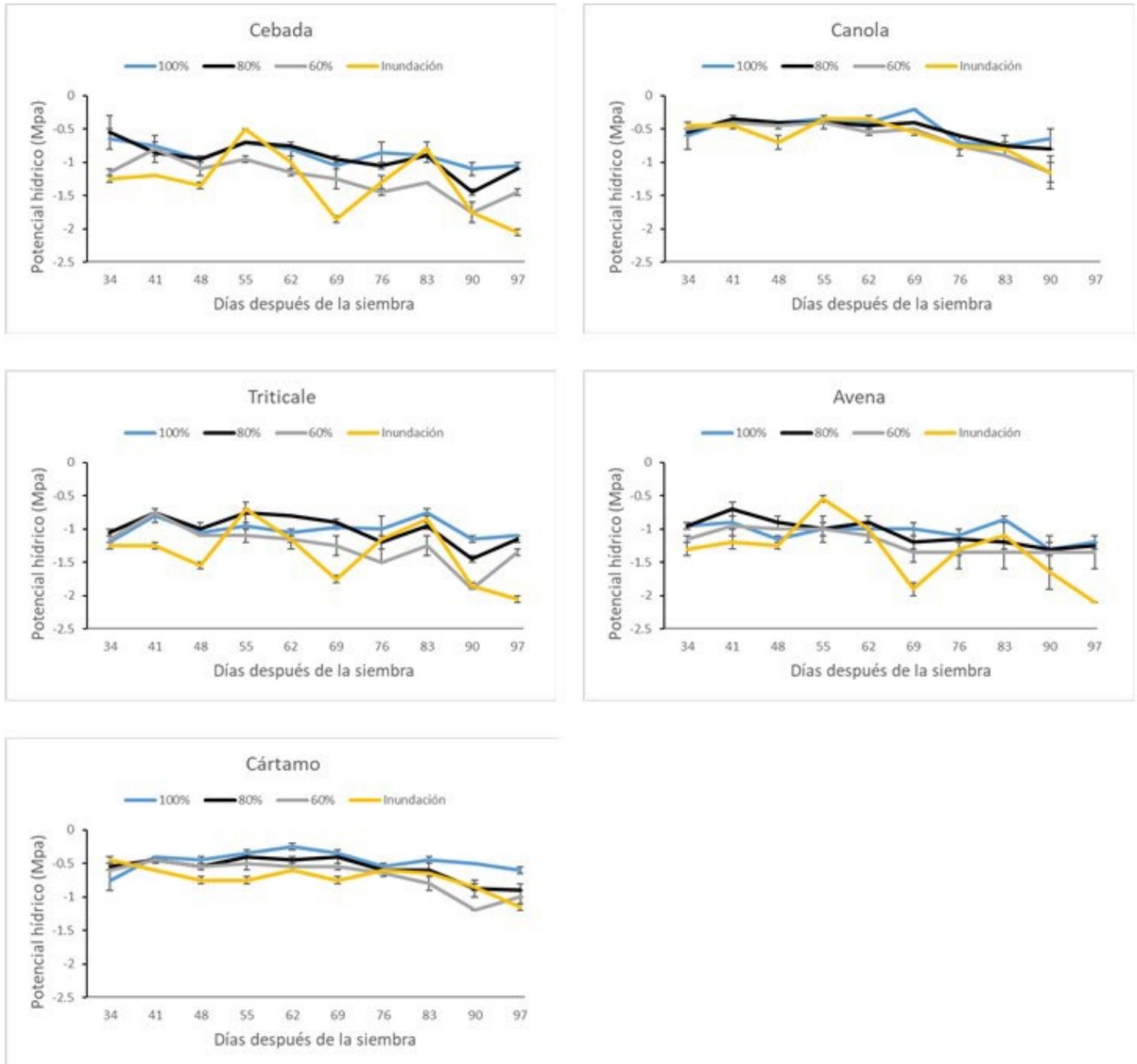
Se utilizó un modelo matemático lineal de efectos fijos para el análisis de varianza para el procesamiento estadístico de las variables evaluadas.

Una vez comprobada la existencia de diferencias se usó la prueba de comparación múltiple de medias de Tukey ( $p \leq 0.05$ ) empleando el paquete estadístico Statistical Analysis System Institute, versión 9.3. (SAS Institute Inc., Cary, NC. EUA).

## Resultados y discusión

### Potencial hídrico foliar ( $\Psi_h$ )

Los distintos tratamientos de riego afectan el potencial hídrico de la hoja de los cultivos evaluados (Figura 2). Los tratamientos de 80 y 100 % de ET presentaron la mayor condición hídrica a lo largo del ciclo de producción en los diferentes cultivos con un rango de -0.2 a -1.45 MPa. Por el contrario, los tratamientos de riego con el 60 % de ET y riego por inundación presentaron mayor estrés hídrico (de -0.3 a -2.10 MPa) debido al contenido de humedad del suelo. Los tratamientos con mayores niveles de humedad en el suelo presentan potencial hídrico más positivo, mientras que la deficiencia de humedad genera valores más negativos (May-Lara, Pérez-Gutiérrez, Ruiz-Sánchez, Ic-Caamal, & García-Ramírez, 2011). Valores similares de potencial hídrico fueron reportado por Reyes-González *et al.* (2011) (-0.3 a -2.0 MPa), al evaluar variedades de avena forrajera y diferentes porcentajes de ET. Similar tendencia en el  $\Psi_h$  fue reportada por Zavala-Borrego *et al.* (2022) en sorgo forrajero, donde los tratamientos de 60 % de la ET y riego por gravedad registraron los valores más negativos de  $\Psi_h$ .

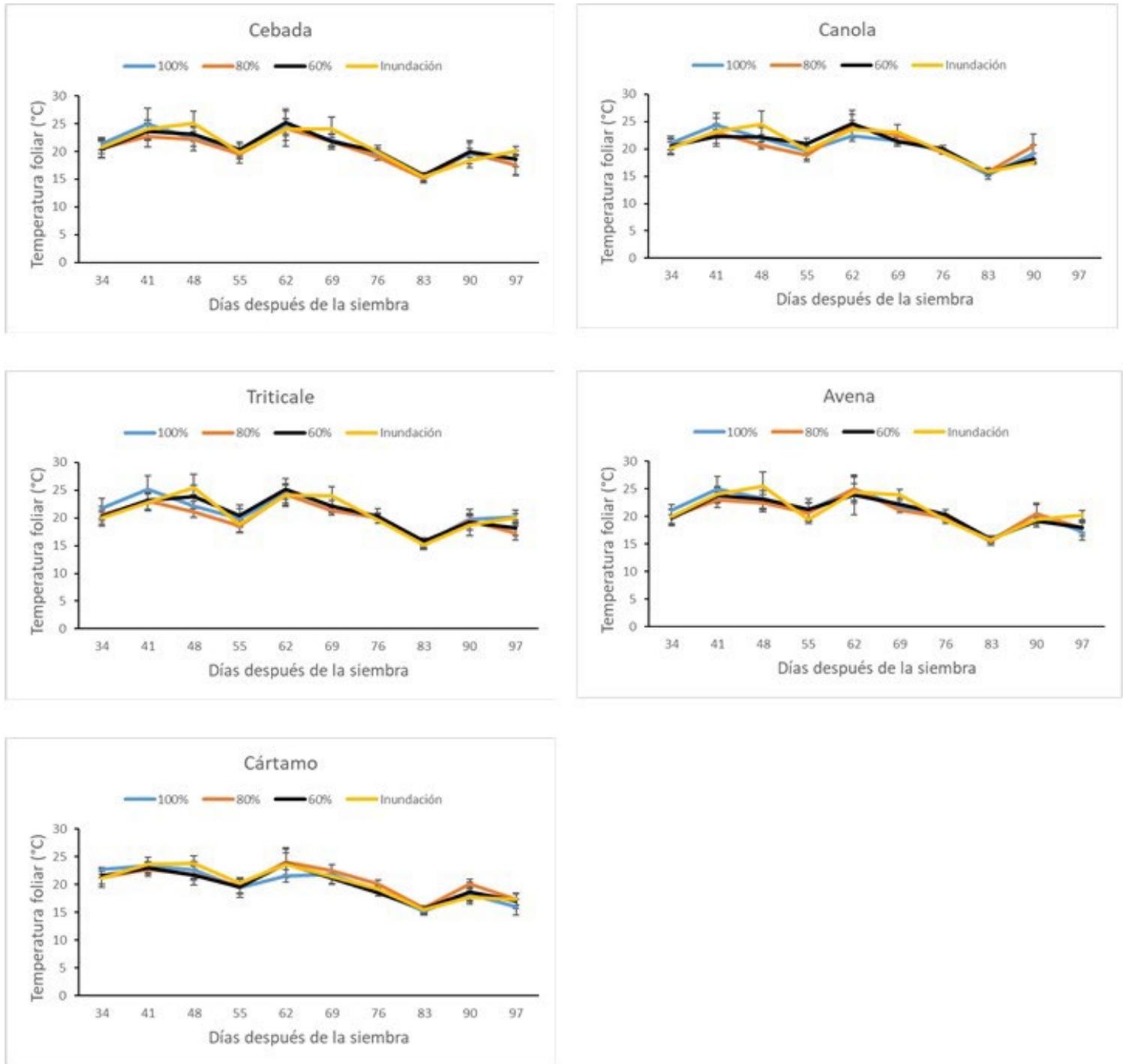


**Figura 2.** Potencial hídrico foliar en cultivos de invierno con diferentes niveles de irrigación basados en porcentajes de ET y riego por inundación. Las barras verticales indican la desviación estándar.

El cártamo y canola presentaron el mayor comportamiento de  $\Psi_h$  con valores menos negativo en los diferentes tratamientos de riego; tal comportamiento se asocia con que son especies de menor requerimiento hídrico (Reta-Sánchez *et al.*, 2017). En contraste, las especies de avena, triticale y cebada reportaron los valores más negativos; dichos valores correspondieron al tratamiento de riego por inundación, en el cual se mostraron mayores altibajos de potencial hídrico.

### Temperatura del dosel

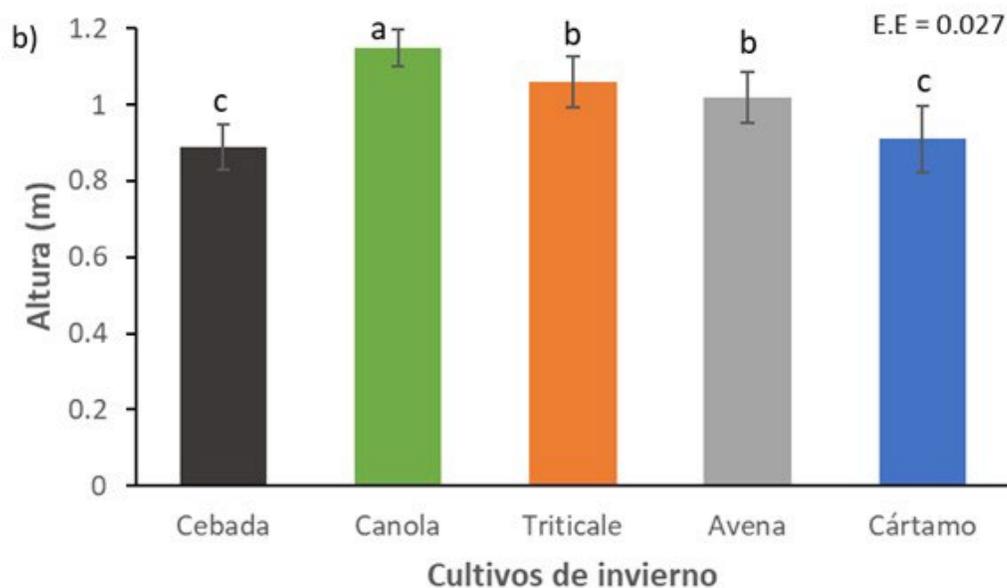
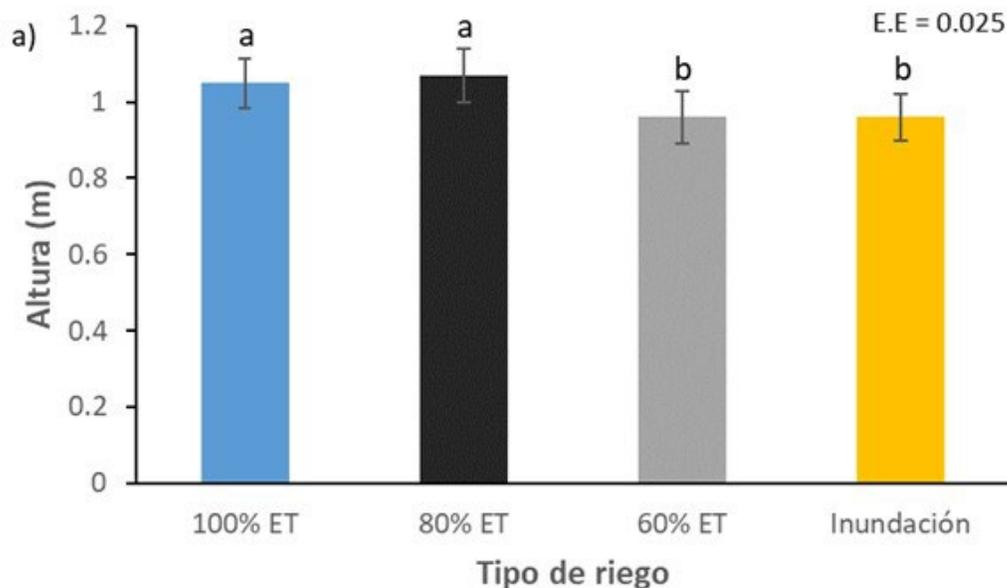
La temperatura del dosel fue similar entre las diferentes especies cultivadas (Figura 3). Las temperaturas más altas se registraron a los 48 DDS, con valores de 25.4 y 25.5 °C en triticale y avena en el tratamiento de inundación; mientras que los valores mínimos se presentaron a los 83 DDS en todas las especies y tratamientos de riego. En general, las temperaturas más altas se registraron en el tratamiento de 60 % de ET y riego por inundación; a su vez, fueron los tratamientos que presentaron valores de  $\Psi_h$  más negativos, lo que indica déficit de humedad, lo cual dio como resultado mayor temperatura foliar (Him-Lo *et al.*, 2020). En este mismo contexto, Reyes-González *et al.* (2019) observaron que niveles bajos de humedad reducen la transpiración debido al cierre estomático y provocan un incremento en la temperatura foliar del cultivo.



**Figura 3.** Temperatura del dosel en cultivos de invierno con diferentes niveles de irrigación basados en porcentajes de ET y riego por inundación. Las barras verticales señalan la desviación estándar.

## Altura de las plantas

La altura de planta fue afectada positivamente por los diferentes tratamientos; la mayor altura de planta se alcanzó en los tratamientos de 80 y 100 % de ET. La menor altura se encontró en los tratamientos de 60 % de ET y el riego por gravedad (Figura 4a); estos últimos fueron estadísticamente iguales. Dicha respuesta se debe a que en los tratamientos de 80 y 100 % de ET, el intervalo de riego y cantidad aplicada favorecen al aprovechamiento de la humedad en la zona radical y al crecimiento del cultivo, lo cual genera mayor producción de biomasa (Reyes *et al.*, 2023).



**Figura 4.** Altura de planta en diferente tipo de riego (a) y en diversos cultivos de invierno (b). Las barras verticales indican la desviación estándar.

En lo que se refiere a las especies de invierno, el cultivo de canola fue el que registró la mayor altura, por lo que es diferente estadísticamente al resto de ellos. El triticale y la avena fueron estadísticamente similares, aunque la menor altura se registró en el cártamo y la cebada, los cuales fueron estadísticamente iguales (Figura 4b).

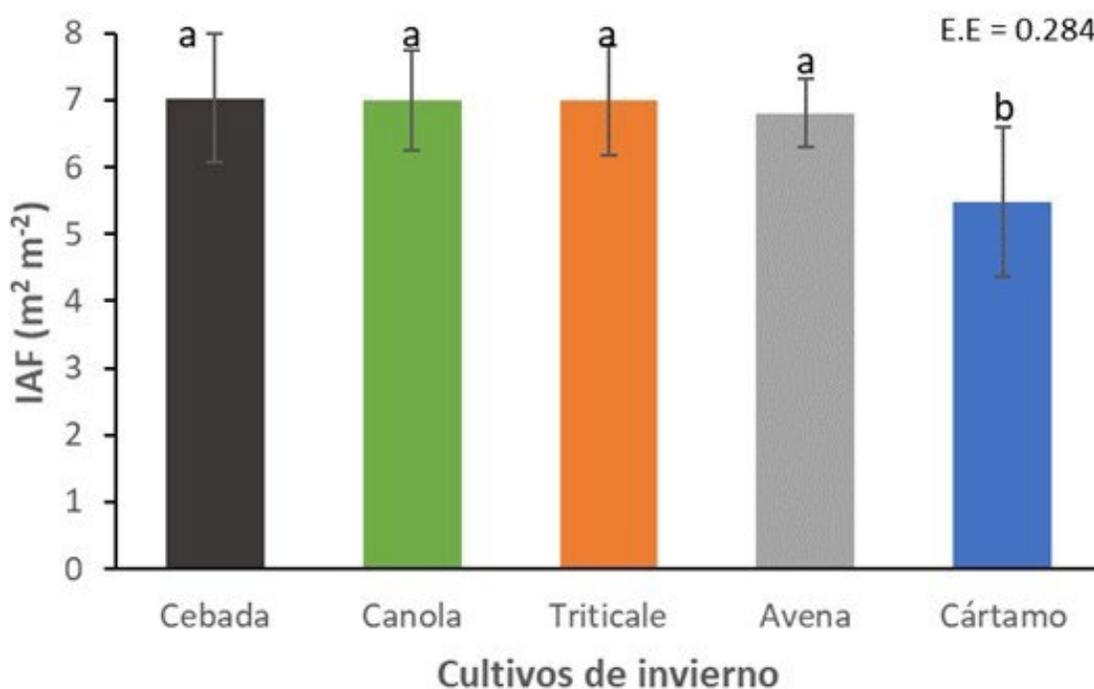
Zavala-Borrego *et al.* (2022) también reportaron una mayor altura de planta con el 80 y 100 % de la ET al emplear un sistema de riego por goteo, en comparación con el sistema de riego por gravedad. A su vez, Ochoa-Espinoza *et al.* (2022b) obtuvieron alturas similares en la evaluación del potencial forrajero de cártamo y cereales de grano pequeño en dos ciclos de producción al utilizar especies similares a las de la presente investigación.

## Índice de área foliar (IAF)

Aunque no hubo diferencia estadística entre el tipo de riego, los resultados mostraron mayor IAF en los tratamientos de 80 y 100 % de ET con respecto a los tratamientos de 60 % de ET y el riego por gravedad. Este resultado se debe probablemente a que los diferentes niveles de humedad presentes en el suelo condicionan el potencial de turgencia y cierre estomático, lo que limita la producción de biomasa. Al respecto, Reyes *et al.* (2023) señalan que la restricción de agua limita el desarrollo adecuado de las hojas, por lo que la capacidad de la planta para captar la energía luminosa se ve afectada, al igual que los valores de IAF.

Por otro lado, en las especies de invierno sí hubo diferencia estadística entre ellas, el cártamo fue el que registró el menor valor de IAF (Figura 5). Esto se debió a que el cártamo crece sobre un tallo

principal, mientras que los otros cereales amacollan (Prado, Gallardo, Kruk, & Miralles, 2017). Cabe señalar que la canola no amacolla, sin embargo las hojas son grandes, por lo que ocupa mayor índice de área foliar. Esta es una característica importante que depende de la intercepción solar, la cual determina la cantidad de forraje durante el ciclo de producción de los cultivos (Reta, Sánchez, Ochoa, Reyes, & Rodríguez, 2023).

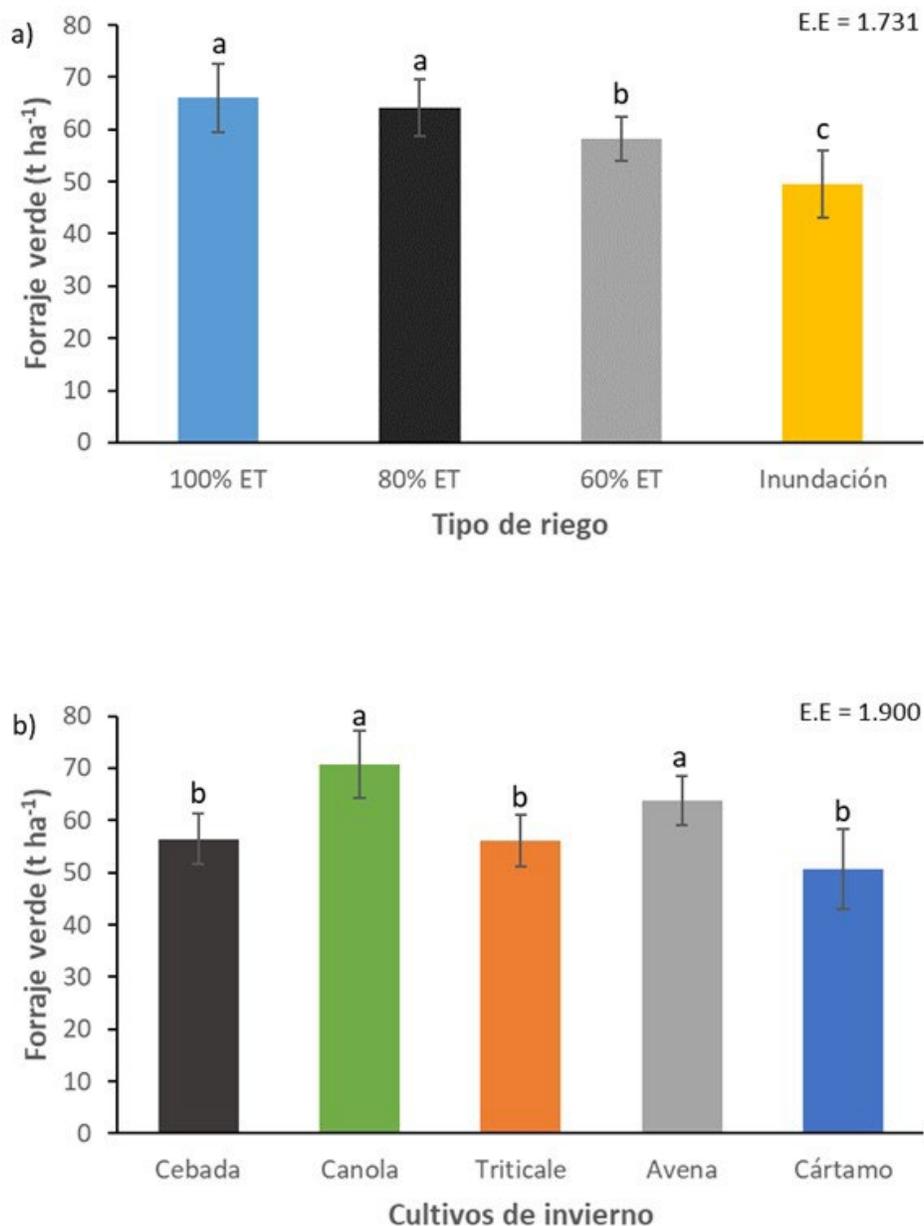


**Figura 5.** Comportamiento de índice de área foliar en cultivos de invierno. Las barras verticales indican la desviación estándar.

Los resultados de esta investigación fueron superiores a los obtenidos por Ochoa-Espinoza *et al.* (2022a), con valores de índice de área foliar de 5.34 a 7.95 en cinco especies forrajeras establecidas bajo riego por inundación en la Comarca Lagunera.

## Forraje verde (FV)

En la producción de FV se encontraron diferencias significativas entre los tratamientos de riego y las especies evaluadas. La mayor producción de FV se observó en los tratamientos de 80 y 100 % de ET con rendimientos promedio de 64.21 y 66.11 t ha<sup>-1</sup>, respectivamente, siendo iguales estadísticamente. Los tratamientos con menor rendimiento de FV fueron el de 60 % de ET, seguido por el riego de gravedad (Figura 6a). En cuanto a las especies evaluadas, la canola y avena fueron estadísticamente superiores a los demás cultivos. El cártamo fue el que obtuvo el menor rendimiento de forraje verde, con una producción de 50.66 t ha<sup>-1</sup> (Figura 6b).



**Figura 6.** Rendimientos de forraje verde en diferente tipo de riego (a) y cultivos de invierno (b). Las barras verticales indican la desviación estándar.

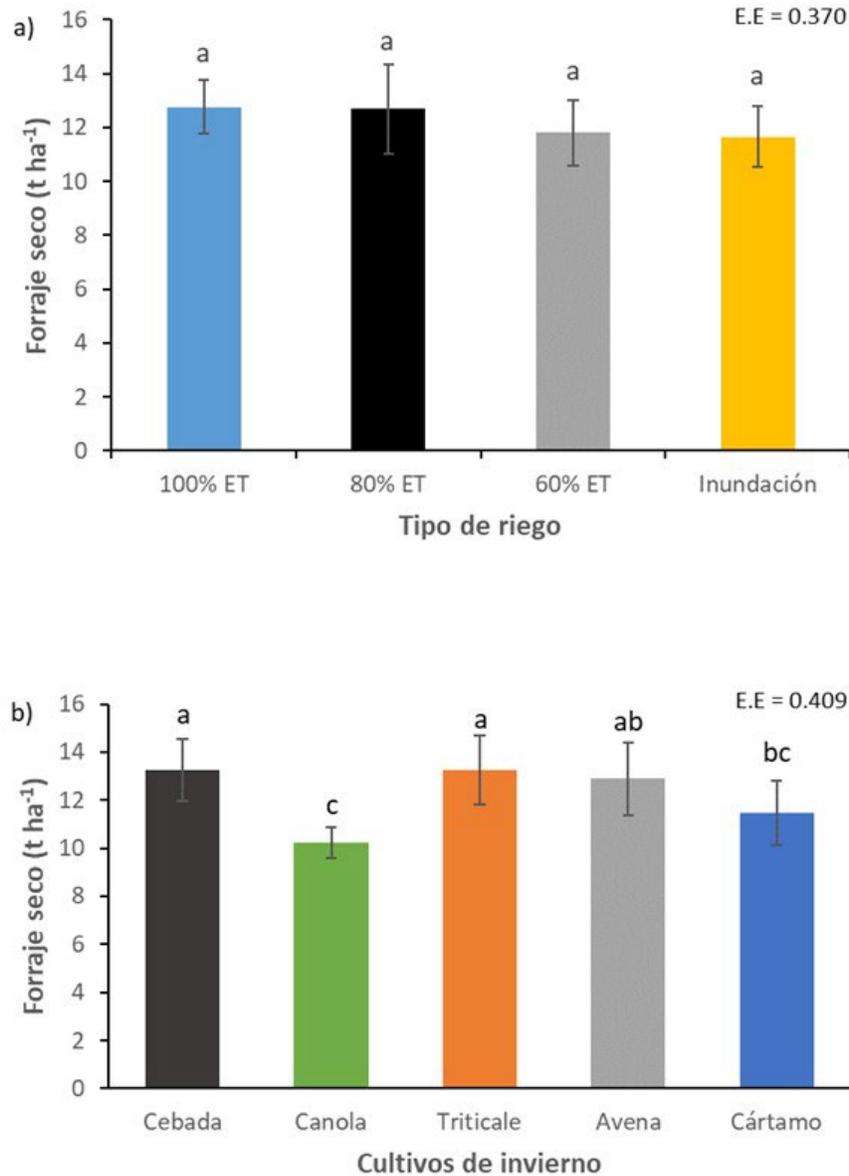
El incremento de la biomasa en los tratamientos de ET se debe a que el agua de riego se aplica de manera eficiente y constante, lo cual

crea condiciones de humedad favorable para el buen desarrollo del cultivo desde etapas tempranas, lo que resulta en una mayor producción de biomasa (Reta-Sánchez, Cueto-Wong, Gaytan-Mascorro, & Santamaria-Cesar, 2007; Sánchez-Hernández *et al.*, 2013), además de que el rendimiento está influenciado por el tipo de cultivar, la fecha de siembra y los rasgos agronómicos de cada una de las especies (Ochoa-Espinoza *et al.*, 2022a). Al respecto, Zavala-Borrego *et al.* (2021) observaron un incremento en el rendimiento de forraje verde en tratamientos donde se aplicó el riego por goteo con base en niveles de ET (80 y 100 %) en comparación con el riego por inundación.

## Forraje seco (FS)

La producción de FS para los tipos de riego no mostró diferencias significativas. Los mayores rendimientos fueron en los tratamientos de 80 y 100 % de ET, con rendimientos de 12.68 y 12.76 t ha<sup>-1</sup>, respectivamente, con respecto a los tratamientos de 60 % de ET y el riego por gravedad (Figura 7a). La producción de FS para los diferentes cultivos de invierno mostró diferencias significativas entre ellos (Figura 7b). Los cultivos que presentaron mayor FS fueron cebada, triticale y avena con 13.26, 13.24 y 12.89 t ha<sup>-1</sup>, respectivamente. Lo anterior se relaciona con que estas especies presentan mayor capacidad de amacollamiento y generan mayor índice de área foliar, lo que favorece el incremento de biomasa y, en consecuencia, mayores rendimientos de forraje (Prado *et al.*, 2017). Los rendimientos más bajos se reportaron en las especies de cártamo (11.47 t ha<sup>-1</sup>) y canola (10.25 t ha<sup>-1</sup>), comportamiento asociado con el estrés abiótico presente en la planta, que provoca alteraciones en las funciones fisiológicas (capacidad fotosintética y actividades

metabólicas), que reducen la formación de granos y espigas, lo cual afecta los rendimientos en el forraje (Nurunnaher & Islam, 2017).

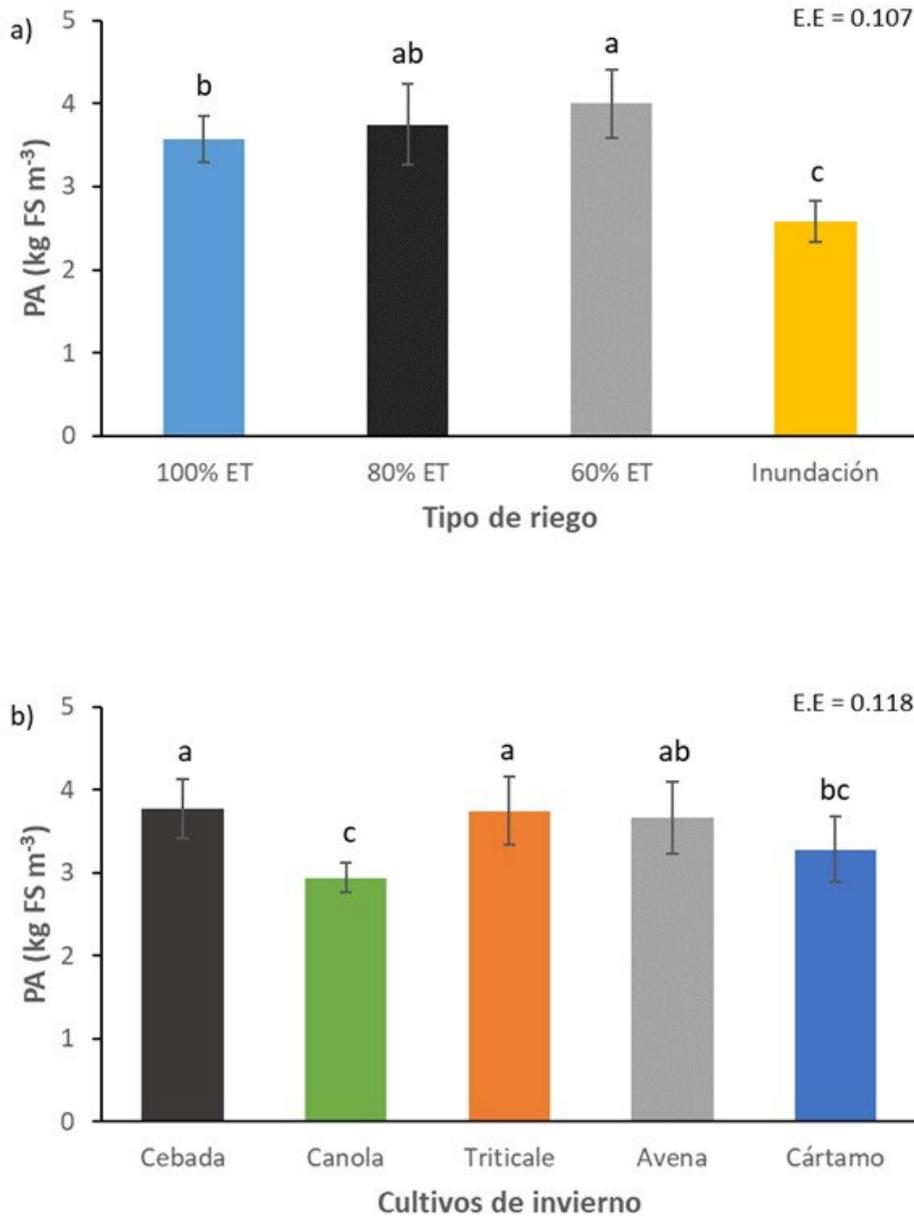


**Figura 7.** Rendimientos de forraje seco en diferente tipo de riego (a) y cultivos de invierno con diferentes niveles de irrigación basados en porcentajes de ET y riego por inundación. Las barras verticales indican la desviación estándar.

López-Jara *et al.* (2022) reportaron mayores rendimientos de materia seca en las especies de cebada y triticale con respecto a la canola y el cártamo durante el ciclo otoño-invierno, que son similares a los resultados de esta investigación. En este mismo sentido, los rendimientos del presente estudio son superiores a los reportados por Ochoa-Espinoza *et al.* (2022a), quienes obtuvieron menores rendimientos de FS en la evaluación del potencial de rendimiento de cinco especies forrajeras (cebada, triticale, avena, trigo y cártamo) en el ciclo de producción otoño-invierno 2017-2018.

### **Productividad del agua (PA)**

La PA mostró diferencias significativas entre los diferentes tratamientos de riego y las especies cultivadas. La mayor PA se obtuvo en los tratamientos de 60 y 80 % de ET, con valores promedio de 4.00 y 3.75 kg FS m<sup>-3</sup>, que supera al riego por inundación un 35.5 y 31.2 %, respectivamente (Figura 8a). La cebada, avena y triticale obtuvieron los mayores valores de productividad del agua debido a que son especies de menor requerimiento hídrico (Reta *et al.*, 2017), mientras que el menor valor de PA se registró con la canola (Figura 8b).



**Figura 8.** Productividad del agua en diferente tipo de riego (a) y en cultivos de invierno (b). Las barras verticales indican la desviación estándar.

El incremento en la PA en los tratamientos de 60 y 80 % de ET se debe a que se utilizó menor cantidad de agua de riego con relación a los tratamientos de 100 % de ET y riego por inundación; lo anterior se asocia

con el hecho de que la mayor PA se obtiene cuando se emplea menor lámina de agua riego (Zavala-Borrego *et al.*, 2022). Al respecto, Núñez-Ramírez *et al.* (2020) reportaron mayor PA del agua en la evaluación de cuatro diferentes tensiones de humedad en el suelo (10, 20, 30 y 40 kPa) al obtener mejores resultados con valores de humedad más bajos en la producción de seis genotipos de maíz. Los resultados obtenidos en la presente investigación son similares a los reportados por Reyes *et al.* (2023), quienes evaluaron tres niveles de ET (60, 80 y 100 %) y riego por gravedad en maíz forrajero, y reportaron mayor PA en el riego por goteo (60 % de ET) ( $3.60 \text{ kg FS m}^{-3}$ ) y menor en el riego por gravedad ( $2.21 \text{ kg de FS m}^{-3}$ ).

## Conclusiones

En la presente investigación no hubo interacción entre los niveles de los dos factores. Sin embargo, los diferentes niveles de ET afectaron el rendimiento de biomasa y la productividad del agua. Con el 80 y 100 % de ET se obtiene el mayor rendimiento de biomasa (FV y FS) en los cultivos de cebada, triticale y avena. La productividad del agua fue mayor en los tratamientos de 60 y 80 % de ET, mientras que en los cultivos de invierno, la mayor PA correspondió a la cebada, triticale y avena. Se recomienda aplicar el 60 % de ET, pues no existen diferencias en rendimiento (FS) ni en productividad del agua con el 80 % de ET. En general, los resultados indicaron que los tratamientos con riego por goteo con base en diferentes niveles de irrigación de acuerdo con porcentajes de ET y déficit hídrico mantienen el potencial productivo de los cultivos de invierno en la Comarca Lagunera.

## Referencias

- Alghory, A., & Yazar, A. (2019). Evaluation of crop water stress index and leaf water potential for deficit irrigation management of sprinkler-irrigated wheat. *Irrigation Science*, 37(1), 61-77. DOI: 10.1007/s00271-018-0603-y
- Buthelezi, L. S., Mupangwa, J. F., Muchenje, V., & Nherera, Ch. (2019). Influence of drying technique on chemical composition and ruminal degradability of subtropical *Cajanus cajan* L. *Animal Nutrition*, 5, 95-100. DOI: 10.1016/j.aninu.2018.03.001
- Espinoza, X. M. O., Aguilera-Molina, N. A., Barreras, C. I. C., Gracia, A. B., Casillas, E. Á., Bolivar, E. H. G., & Jiménez, J. N. (2023). Comportamiento de líneas élite y variedades de cártamo del tipo oleico en el sur de Sonora/Performance of elite lines and varieties of carthamus of the oleic type in southern Sonora. *Brazilian Journal of Animal and Environmental Research*, 6(3), 2998-3007. DOI: 10.34188/bjaerv6n3-081
- Fernández, R.E., & Camacho, F. (2005). Eficiencia en el uso del agua. *Revista Viveros. Horticultura Internacional*, (1), 86-89.
- Flores, G. H., Ojeda, B. W., Flores, M. E., Sifuentes, I. E., & Mejía, S. E. (2013). Simulación del rendimiento de maíz (*Zea Mays* L.) en el norte de Sinaloa usando el modelo Aquacrop. *Agrociencia*, 47(3), 347-359.
- García, E. (2004). *Modificaciones al sistema de clasificación climática de Köppen, para adaptarlo a las condiciones de la República Mexicana* (núm. 6) (pp. 90-93). Ciudad de México, México: Instituto de Geografía, Universidad Nacional Autónoma de México.

- Godoy-Ávila, C., Pérez-Gutiérrez, A., Torres, C. A., Hermosillo, L. J., & Reyes, I. (2003). Uso de agua, producción de forraje y relaciones hídricas en alfalfa con riego por goteo subsuperficial. *Agrociencia*, 37(2), 107-115.
- Him-Lo, T., Rudnick, D. R., DeJonge, K. C., Bai, G., Njuky-Nakabuye, H., Katimbo, A., & Heeren, D. M. (2020). Differences in soil water changes and canopy temperature under varying water×nitrogen sufficiency for maize. *Irrigation Science*, 38, 519-534. DOI: 10.1007/s00271-020-00683-2
- López-Jara, A. G., Reta-Sánchez, D. G., Reyes-González, A., Santana, O. I., López-Calderón, M. J., & Sánchez-Duarte, J. I. (2022). Composición nutritiva y productividad de forrajes alternativos de otoño-invierno en diferentes fechas de siembra del norte de México. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 13(SPE28), 125-135. DOI: 10.29312/remexca.v13i28.3268
- May-Lara, C., Pérez-Gutiérrez, A., Ruiz-Sánchez, E., Ic-Caamal, A. E., & García-Ramírez, A. (2011). Efecto de niveles de humedad en el crecimiento y potencial hídrico de *Capsicum chinense* Jacq. Y su relación con el desarrollo de *Bemisia tabaci* (Genn.). *Tropical and Subtropical Agroecosystems*, 14(3), 1039-1045. DOI: 10.56369/tsaes.1104
- Nurunnaher, A., & Islam, M. R. (2017). Efectos y manejo del estrés por calor en el trigo. Una revisión. *Agronomía para el Desarrollo Sostenible*, Dev. 5(37), 1-37. DOI: 10.1007/s13593-017-0443-9

- Núñez-Ramírez, F., Escobosa-García, I., Cárdenas-Salazar, V., Santillano-Cázares, J., Ruelas-Islas, J. D. R., Preciado-Rangel, P., & Díaz-Ramírez, J. (2020). Tensión de humedad del suelo, crecimiento, eficiencia en el uso del agua y rendimiento de maíz cultivado en el noroeste de México. *Terra Latinoamericana*, 38(4), 805-815. DOI: 10.28940/terra.v38i4.763
- Ochoa-Espinoza, X. M., Reta-Sánchez, D. G., Cano-Ríos, P., Sánchez-Duarte, J. I., Ochoa-Martínez, E., García-Martínez, J. E., & Quiroga-Garza, H. M. (2022a). Rendimiento y valor nutritivo de cereales y cártamo forrajero en la Comarca Lagunera. *Biotecnia*, 24(2), 142-148. DOI: 10.18633/biotecnia.v24i2.1620
- Ochoa-Espinoza, X. M., Reta-Sánchez, D. G., Cano-Ríos, P., Sánchez-Duarte, J. I., Ochoa-Martínez, E., García-Martínez, J. E., & Reyes-González, A. (2022b). Nutritional yield and composition of spiny and spineless varieties of safflower (L.) forage harvested at four phenological stages. *The Open Agriculture Journal*, 16(1), 1-8. DOI: 10.2174/18743315-v16-e2201250
- Prado, S. A., Gallardo, J. M., Kruk, B. C., & Miralles, D. J. (2017). Strategies for yield determination of bread wheat and two-row barley growing under different environments: A comparative study. *Field Crops Research*, 203, 94-105. DOI: 10.1016/j.fcr.2016.12.013

- Reyes-González, A., Martínez-Rodríguez, J. G., Palomo-Rodríguez, M., Faz-Contreras, R., Cruz-Chaires, J. J., & Sánchez-Duarte, J. I. (2011). Producción de avena forrajera con riego por goteo subsuperficial en la Comarca Lagunera. En: *Memoria de la XXIII Semana Internacional de Agronomía FAZ-UJED* (pp. 189-195). Gómez Palacio, México: Facultad de Agricultura y Zootecnia, Universidad Juárez del Estado de Durango.
- Reyes, G. A., Kjaersgaard, J., Trooien, T., Reta, S. D. G., Sánchez, D. J. I., Preciado, R. P., & Fortis, H. M. (2019). Comparison of leaf area index, surface temperature, and actual evapotranspiration estimated using the METRIC model and in situ measurements. *Sensors*, 19(8), 1857. DOI: 10.3390/s19081857
- Reyes, G. A., Franco, G. I., Hernández, L. E., & Maltos, B. J. (2020). Evaluación del potencial hídrico, temperatura foliar y rendimiento en sorgo (*sorghum* spp.) forrajero bajo riego por goteo. *Ciencia e Innovación*, 3(1), 83-90.
- Reyes, A. G., Reta, D. G. S., Sánchez, J. I. D., Preciado, P. R., Rodríguez, V. M. M., & Ruiz, O. Á. (2023). Uso del atmómetro y coeficiente de cultivo en la programación del riego en maíz forrajero. *Ecosistemas y Recursos Agropecuarios*, 10(1), 1-14. e3160. DOI: 10.19136/era.a10n1.3160
- Reta-Sánchez, D. G., Cueto-Wong, J. A., Gaytan-Mascorro, A., & Santamaria-Cesar, J. (2007). Rendimiento y extracción de nitrógeno, fosforo y potasio de maíz forrajero en surcos estrechos. *Agricultura Técnica en México*, 33, 145-151. DOI: 10.35196/rfm.2017.2.227-233

- Reta-Sánchez, D. G., Serrato-Corona, J. S., Quiroga-Garza, H. M., Figueroa-Viramontes, U., & Gaytán-Mascorro, A. (2017). Potencial forrajero de cultivares de canola primaverales e invernales en la Comarca Lagunera, México. *Revista Fitotecnia Mexicana*, 40(2), 227-233.
- Reta, D. G. S., Sánchez, J. I. D., Ochoa, E. M., Reyes, A. G., & Rodríguez, K. H. (2023). Intercepción de radiación solar y rendimiento de forraje de brásicas y cereales de otoño-invierno. *Agrofaz*, 5(1), 3-9.
- Sader, Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural. (2021). Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural-Delegación en la Región Lagunera, Sector Agropecuario. *El Siglo de Torreón*, suplemento especial, 24.
- Sánchez-Hernández, M. A., Aguilar-Martínez, C.U., Valenzuela-Jiménez, N., Joaquín-Torres, B. M., Sánchez-Hernández, C., Jiménez-Rojas, M. C. & Villanueva-Verduzco, C. (2013). Rendimiento en forraje de maíces del trópico húmedo de México en respuesta a densidades de siembra. *Revista Mexicana de Ciencias Pecuarias*, 4, 271-288.
- Scholander, P. F., Bradstreet, E. D., Hemmingsen, E. A., & Hammel, H. T. (1965). Sap pressure in vascular plants Negative hydrostatic pressure can be measured in plants. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 148(3668), 339-346. DOI: 10.1126/science.148.3668.339
- Servin-Palestina, M., Sánchez-Gutiérrez, R. A., Ramírez-Valle, O., Galindo-Reyes, M. A., & Gutiérrez-Bañuelos, H. (2018). Modelos para programación y optimización de agua de riego en avena forrajera. *Revista Mexicana de Ciencias Pecuarias*, 9(4), 667-684. DOI: 10.22319/rmcp.v9i4.4404

- SIAP, Sistema de Información Agroalimentaria y Pesquera. (2021). *Escenario mensual de productos agroalimentarios*. Ciudad de México: México: Sistema de Información Agroalimentaria y Pesquera.
- Xu, S., Harrison, J. H., Kezar, W., Entrikin, N., Loney, K. A., Riley, R. E., & Hunt, C. (1995). Evaluation of yield, quality, and plant composition of early-maturing corn hybrids harvested at three stages of maturity. *The Professional Animal Scientist*, 11(3), 157-165. DOI: 10.15232/S1080-7446(15)32580-8
- Zavala-Borrego, F., Reyes-González, A., Álvarez-Reyna, V. D. P., García-Carrillo, M., Rodríguez-Moreno, V. M., & Preciado-Rangel, P. (2021). Efecto de diferentes niveles de evapotranspiración sobre área foliar, temperatura superficial, potencial hídrico y rendimiento en sorgo forrajero. *Terra Latinoamericana*, 39(1), 1-14. e954. DOI: 10.28940/terra.v39i0.954
- Zavala-Borrego, F., Reyes-González, A., Álvarez-Reyna, V. D. P., Cano-Ríos, P., & Rodríguez-Moreno, V. M. (2022). Efecto de la tasa de evapotranspiración en área foliar, potencial hídrico y rendimiento de maíz forrajero. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 13(3), 407-420. DOI: 10.29312/remexca.v13i3.2294