

Ciencia Latina Revista Científica Multidisciplinar, Ciudad de México, México.  
ISSN 2707-2207 / ISSN 2707-2215 (en línea), julio-agosto 2025,  
Volumen 9, Número 4.

[https://doi.org/10.37811/cl\\_rcm.v9i2](https://doi.org/10.37811/cl_rcm.v9i2)

# **EVALUACIÓN DE CINCO TÉCNICAS DE CONSERVACIÓN DE AGUA EN RIEGO POR GRAVEDAD EN EL CULTIVO DE MAÍZ (*ZEA MAYS*)**

**EVALUATION OF FIVE WATER CONSERVATION  
TECHNIQUES IN GRAVITY IRRIGATION IN CORN CROP  
(*ZEA MAYS*)**

**Ismael Talamantes Castorena**  
Universidad Autónoma de Sinaloa

**Saulo Talamantes Castorena**  
Universidad Autónoma de Sinaloa

**Rita Isela Domínguez Domínguez**  
Universidad Autónoma de Sinaloa

**Nidia Isabel Rosas Meza**  
Universidad Autónoma de Sinaloa

**Aracely Talamantes Castorena**  
Universidad Autónoma de Sinaloa

DOI: [https://doi.org/10.37811/cl\\_rcm.v9i4.19225](https://doi.org/10.37811/cl_rcm.v9i4.19225)

## Evaluación de Cinco Técnicas de Conservación de Agua en Riego por Gravedad en el Cultivo de Maíz (*Zea mays*)

**Ismael Talamantes Castorena<sup>1</sup>**[ismaeltalamantes@uas.edu.mx](mailto:ismaeltalamantes@uas.edu.mx)<https://orcid.org/0009-0007-1189-2533>

Universidad Autónoma de Sinaloa

**Saulo Talamantes Castorena**[saulo295@hotmail.com](mailto:saulo295@hotmail.com)<https://orcid.org/0009-0003-0512-7502>

Universidad Autónoma de Sinaloa

**Rita Isela Domínguez Domínguez**[ritadominguez@uas.edu.mx](mailto:ritadominguez@uas.edu.mx)<https://orcid.org/0009-0001-7215-6392>

Universidad Autónoma de Sinaloa

**Nidia Isabel Rosas Meza**[rosasisabella12@hotmail.com](mailto:rosasisabella12@hotmail.com)<https://orcid.org/0009-0009-4423-4240>

Universidad Autónoma de Sinaloa

**Aracely Talamantes Castorena**[aracelytalamantes@favf.mx](mailto:aracelytalamantes@favf.mx)<https://orcid.org/0009-0001-8199-5518>

Universidad Autónoma de Sinaloa

### RESUMEN

El estado de Sinaloa es el principal productor de maíz en México bajo riego por superficie, aportando 65 % de la producción nacional; sin embargo, la eficiencia de riego de aplicación se mantiene en 45 % y escenarios frecuentes de baja disponibilidad hídrica han puesto en riesgo la estabilidad económica y social del estado. Con el fin de generar alternativas tecnológicas de aplicación inmediata que contribuyan a mejorar la eficiencia en el uso del agua del maíz, en el presente estudio se evaluaron tres técnicas parcelarias de riego por gravedad de alta eficiencia: 1) surcos alternos, 2) camas, 3) riego deficitario, comparándolas con el sistema tradicional (testigo). El estudio se realizó en el distrito de riego 075 (norte de Sinaloa) dentro del Campo Experimental Valle del Fuerte del INIFAP. Se utilizó un diseño experimental en bloques completos al azar con tres repeticiones (análisis de varianza y comparación de medias). La programación de los riegos se realizó con el programa IRRIMODEL para determinar el requerimiento hídrico ( $L_n$ ) y el momento de riego. El diseño de los riegos en los tratamientos se hizo con el programa RIGRAV estimando el gasto y tiempo de riego óptimos. El mejor tratamiento fue reducción de gasto con 89.1 y 92 % de eficiencia de aplicación y uniformidad, seguido del riego intermitente con eficiencia de aplicación de 85.7 % y 93.3 % de uniformidad. El testigo mostró la mayor uniformidad 99.0 %, pero la más baja eficiencia de aplicación 48.7 %. Desde el punto de vista de ahorro y productividad del agua, el mejor tratamiento fue el riego deficitario. Esta técnica podría ser una excelente opción en escenarios críticos de disponibilidad hídrica. Se demostró que es posible adecuar el RIGRAV en las cinco técnicas y ser una opción para usarse a nivel de zonas de riego.

**Palabras clave:** diseño, riego de precisión, productividad del agua, aplicabilidad, rendimiento

---

<sup>1</sup> Autor principal

Correspondencia: [ismaeltalamantes@uas.edu.mx](mailto:ismaeltalamantes@uas.edu.mx)

# Evaluation of Five Water Conservation Techniques in Gravity Irrigation in Corn Crop (*Zea mays*)

## ABSTRACT

The state of Sinaloa is the most irrigated corn producer in Mexico, which contributes to 65% of national irrigated production. However, the major constraints are the low irrigation efficiency (45%) and the frequency of years with low water availability that have put economic and social stability at risk. The purpose of this study was to generate technological applied alternatives to improve water use efficiency in corn production. The experiments consisted of five different surface irrigation techniques: 1) alternate furrows, 2) beds, 3) flow rate reduction, 4) intermittent irrigation, 5) deficit irrigation and conventional irrigation technique. The study was carried out at irrigation district 075 (north of Sinaloa) and Valle del Fuerte agricultural center (INIFAP). The experiments were arranged in a complete block design with 2 replications. Irrigation scheduling was realized using a computer program called irrimodel, which determines irrigation requirements and timing. Furthermore, irrigation design in all treatments was done using another computer program called RIGRAV, which estimates flow rate and optimal timing. The best treatment was flow rate reduction technique, with 89.1% and 92% overall efficiency and uniformity. This was followed by intermittent irrigation technique, with 85.7% and 93.3% overall efficiency and uniformity. Conventional irrigation technique showed the greatest uniformity (99.03%), but the lowest efficiency (48.7%). In terms of water-saving and efficiency, the best treatment was deficit irrigation technique, which could be an excellent choice in periods of low water availability. According to this study it is possible to manage the RIGRAV program in all treatments, which could be an excellent option to consider at irrigation districts.

**Keywords:** design, irrigation and precision, water productivity, application and performance

*Artículo recibido 03 julio 2025*

*Aceptado para publicación: 07 agosto 2025*



## INTRODUCCIÓN

La agricultura contemporánea enfrenta el reto impostergable de producir alimentos de manera eficiente, sustentable y resiliente frente al cambio climático. En este contexto, el maíz (*Zea mays L.*), como uno de los principales cultivos a nivel mundial y base de la seguridad alimentaria en países como México, demanda estrategias que optimicen el uso de los recursos hídricos, especialmente en regiones donde el riego por gravedad sigue siendo la técnica predominante (Cruz-Cruz *et al.*, 2017; Cruz-González *et al.*, 2024).

El riego por gravedad, aunque ampliamente utilizado, presenta retos significativos en cuanto a eficiencia en el uso del agua. Diversas investigaciones han evidenciado que esta práctica tradicional suele acompañarse de un uso excesivo del recurso, provocando pérdidas por escurrimiento o infiltración profunda, así como efectos negativos sobre la estructura del suelo (Cuadras-Berrelleza *et al.*, 2021; Rosano-Méndez *et al.*, 2001; Flores-Gallardo *et al.*, 2014). Además, en un contexto de creciente presión sobre los recursos hídricos, exacerbada por el cambio climático, se vuelve necesario adoptar prácticas que incrementen la eficiencia y reduzcan el consumo hídrico (Flores-Manchero & Palacios-López, 2025).

Entre las alternativas viables, destacan la calibración de modelos hidrológicos que permiten una mejor programación del riego (Rosano-Méndez *et al.*, 2001), el riego por surcos alternos (Sarker *et al.*, 2020; Flores-Gallardo *et al.*, 2014), el uso de camellones (camas) elevados con asociación de cultivos (Flores-Gallardo *et al.*, 2014; Blanco Navarro *et al.*, 2023) y la aplicación de déficit hídrico controlado (Sifuentes-Ibarra *et al.*, 2023; Trujillo-García *et al.*, 2025) otra opción es riego por reducción de gasto ; Flores-Gallardo *et al.*, (2014). Estas prácticas tienen como objetivo mejorar la productividad del agua, reducir el consumo de energía, conservar la fertilidad del suelo y mantener o incluso aumentar los rendimientos del cultivo.

En regiones como Sinaloa, donde el cultivo de maíz es altamente tecnificado, pero aún dependiente del riego superficial, se han identificado patrones de producción intensivos que amenazan la calidad de los suelos y la disponibilidad hídrica (Cruz-Delgado, D., & Leos-Rodríguez J.A. 2019).

Asimismo, a nivel internacional se ha reportado que el riego por surcos alternos puede mantener los rendimientos del maíz y su contenido nutrimental, a la vez que incrementa la productividad del agua, lo



que lo convierte en una técnica de conservación prometedora para climas subtropicales secos (Sarker *et al.*, 2020). Este enfoque también ha sido respaldado por Huang *et al.* (2024), quienes demostraron que la combinación de riego alterno con estrategias de nutrición mejora la eficiencia del uso del nitrógeno y los rendimientos del cultivo.

Otro aspecto relevante es la relación entre densidad de siembra, fertilización y eficiencia en el uso del agua. En el Valle de México, Alonso-Sánchez *et al.* (2023) encontraron que, aunque la densidad de siembra no tuvo un efecto significativo, las dosis adecuadas de fertilización mejoraron la productividad del agua, evidenciando la importancia de una gestión integrada de los recursos. De igual forma, estudios han evidenciado que la productividad del agua en el maíz se puede incrementar mediante una adecuada selección de momentos y cantidades de riego (Alonso-Sánchez *et al.*, 2023).

Por otro lado, la creciente presión sobre los recursos hídricos exige el desarrollo de modelos de simulación y herramientas de toma de decisiones para el manejo preciso del riego. El modelo RIGRAV, por ejemplo, ha mostrado resultados promisorios al permitir reducciones significativas del volumen aplicado sin afectar los rendimientos (Rosano-Méndez *et al.*, 2001). Asimismo, las tecnologías de riego inteligente, que integran sensores, automatización y análisis de datos en tiempo real, pueden reducir hasta en un 30% el consumo de agua, ajustándose a las necesidades específicas del cultivo (Flores-Mancheno & Palacios-López, 2025).

Estudios recientes también advierten que la variabilidad climática está modificando los requerimientos de riego del maíz en diversas regiones del país. En Aguascalientes, se ha documentado un incremento sostenido en las necesidades hídricas del cultivo, lo cual exige ajustes en la programación y eficiencia del riego (Guzmán Luna *et al.*, 2022). Esta evidencia refuerza la urgencia de estrategias adaptativas ante el cambio climático.

Finalmente, cabe destacar que la producción de maíz en México no solo está vinculada a la seguridad alimentaria, sino también a aspectos culturales y socioeconómicos. A pesar de los avances tecnológicos, persisten disparidades regionales, con estados como Sinaloa y Jalisco a la vanguardia productiva, mientras otras entidades mantienen niveles bajos debido al autoconsumo (Guzmán-Anaya & Lugo-Sánchez, 2024).



En consecuencia, el presente trabajo se enfoca en la evaluación de cinco técnicas de conservación de agua aplicadas al riego por gravedad en el cultivo de maíz. Se pretende analizar su impacto en la eficiencia del uso del agua, el rendimiento del cultivo y las condiciones edáficas, con el fin de identificar alternativas viables que contribuyan a la sustentabilidad del sistema productivo y al uso racional de los recursos hídricos.

## **MATERIALES Y MÉTODOS**

La zona de estudio fue en el Distrito de Riego 075. La precipitación anual fluctúa de 200 a 350 mm. Los suelos del Valle del Fuerte tienen una textura predominantemente franco-arcillosa (50 % arcilla, 30 % limo y 20 % arena), bajos en materia orgánica (menos del 1 %) y densidad aparente de  $1.15 \text{ g cm}^{-3}$  (Ojeda *et al.*, 2006).

La superficie regable es de 238,000 ha con un plan de cultivos compuesto de la siguiente manera: 27,846 ha tiene cultivos perennes (PER) y 210,154 ha de cultivos anuales, de los cuales el 66 % maíz, 20 % frijol (*Phaseolus vulgaris*) y 14 % otros cultivos en OI. En el ciclo PV, existen segundos cultivos; y de la superficie sembrada en OI: 65 % es sorgo (*Sorghum bicolor*), 34 % maíz y 1 % otros cultivos (Ojeda *et al.*, 2011).

El estudio se desarrolló durante el ciclo agrícola OI 2010/2011 en terrenos del Campo Experimental Valle del Fuerte (CEVAF) del Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (INIFAP), ubicado en Juan José Ríos, Sinaloa, México a los  $25^{\circ} 46' 32'' \text{ N}$ ,  $108^{\circ} 48' 10'' \text{ O}$  y una altitud de 20 msnm.

Los tratamientos utilizados consistieron en cinco técnicas para riego por superficie: 1) surcos alternos (SA), 2) camas (CAM), 3) reducción de gasto (REG), 4) riego intermitente (INT), 5) riego deficitario (DEF) y el testigo (TES). Este último corresponde al riego por surcos convencional de la zona de estudio. Se utilizó un diseño de bloques completos al azar con tres repeticiones en una parcela de  $29,376 \text{ m}^2$ , con 18 unidades experimentales de  $8 \text{ m} \times 204 \text{ m}$  (10 surcos).

El cultivo se sembró en seco en todos los tratamientos el 14/02/11, aplicando un riego de germinación en forma inmediata; se utilizó la variedad Pioneer P2946W ciclo intermedio con sembradora de precisión Monosem NG. Se aplicó una fertilización base previo a la siembra de 126-52-0; al cierre del cultivo (octava hoja verdadera V8) se complementó la fertilización con 115-0-0, y las fuentes utilizadas



fueron urea y fosfato monoamónico (MAP). La densidad de siembra fue de 103,000 semillas ha<sup>-1</sup> separadas a 12.04 cm; cuando el maíz alcanzó 40 cm de altura, se procedió a cultivar y abrir surco en forma simultánea.

La programación del riego de germinación se hizo gravimétricamente y la de los riegos de auxilio se llevó a cabo con el programa IRRIMODEL<sup>5</sup> para determinar el momento y requerimientos de riego (Ln). Este software opera bajo internet y pronostica el riego en tiempo real, en función del desarrollo fenológico del cultivo, acumulación de grados día crecimiento (GDCA) y humedad del suelo. El sistema estima diariamente los parámetros de calendarización en función de los días grado acumulados (Ojeda *et al.*, 2006).

El diseño de los riegos (inicial y auxilios) se realizó con el programa RIGRAV (Rendón *et al.*, 1995) el cual se fundamenta en las ecuaciones de Barré de Saint-Venant y de Richard para presentar de manera integral la ecuación de conservación de la masa como sigue:

$$Q_r t = \int_0^s A_h(x,t) dx + \int_0^s A_l(x,\tau) dx$$

Donde S es la posición del frente de avance en el tiempo  $t$ ,  $x$  es la distancia a lo largo de la melga o del surco medida a partir de la cabecera aguas arriba,  $A_h$  es el área hidráulica de la sección transversal del escurrimiento superficial y  $A_l$  es el área de la sección transversal del escurrimiento subterráneo.

El tiempo de infiltración  $\tau$  se define como  $\tau = t - t_x$  y corresponde al tiempo que tarda el frente de avance en llegar al punto situado a la distancia  $x$ . El programa resuelve numéricamente la ecuación anterior; para utilizarlo se requiere conocer el coeficiente de rugosidad ( $n$ ) de Manning, la pendiente longitudinal (%) del surco, así como la función de infiltración de Green y Ampt (1911). El coeficiente de rugosidad varía entre 0.02 y 0.04 para un suelo sin cultivo (Chow, 1973).

La función del RIGRAV es simular la duración del tiempo de riego ( $Tr$  [minutos]), gasto de riego unitario ( $q_u$  [litros por segundo]), coeficiente de uniformidad de Christiansen (CUC [adimensional]), lámina bruta (Lb), eficiencia de aplicación (Ea) y eficiencia de riego (Er), considerando los siguientes parámetros: lámina neta (Ln), humedad a saturación ( $\theta_s$ ), humedad inicial ( $\theta_o$ ), conductividad hidráulica a saturación ( $K_s$ ), parámetro de la función de infiltración ( $Hf$ ), pendiente natural del terreno (m) y la longitud del riego (L).

Para el diseño del riego inicial se realizaron pruebas de riego en la parcela experimental en el tratamiento SA, donde se midieron las fases de avance y recesión con fines de calibración de los parámetros  $K_s$  y  $H_f$  del RIGRAV. Para esto, se consideraron los siguientes valores iniciales de los otros parámetros:  $L=204$  m,  $m=0.04\%$ ,  $L_n=0.12$  m,  $\theta_0=0.37$  cm<sup>3</sup> cm<sup>-3</sup> (medida gravimétricamente),  $\theta_s=0.65$  cm<sup>3</sup> cm<sup>-3</sup>,  $n=0.0375$  s m<sup>-1/3</sup>. Los parámetros iniciales de  $K_s$  y  $H_f$  fueron los propuestos por Fuentes (1997), cuyos valores son respectivamente 0.05 cm hr<sup>-1</sup> y 59 cm; el valor de  $n$  fue el propuesto por Rosano *et al.*, (2001). Una vez hecha la calibración de  $K_s$  y  $H_f$  en el riego inicial, se ejecutó el programa en el resto de los tratamientos (excepto el TES) para determinar el gasto por surco óptimo ( $Q_g$ ) y  $T_r$ ; el primero representa el producto del gasto de riego unitario ( $q_u$ ) por la separación entre surcos ( $E$ ). Debido a que la calibración se realizó en SA, se consideró la separación entre surcos de 1.6 m, despreciando el perímetro del surco intermedio.

En el primer riego de auxilio se realizó una segunda calibración con pruebas de riego (avance y recesión) en el mismo tratamiento SA, para verificar los parámetros  $K_s$  y  $H_f$  obtenidos en el riego inicial. Para los siguientes riegos en todos los tratamientos, se utilizaron los parámetros obtenidos en la segunda calibración, a excepción del TES.

Para poder aplicar el RIGRAV en el resto de los tratamientos, se hicieron algunas adecuaciones: En los tratamientos SA y CAM, se consideró una separación entre surcos de 1.6 m; en el método REG, la longitud del surco se dividió en cuatro partes iguales y el gasto de riego se manejó en dos eventos. En las primeras tres cuartas partes de la longitud total, se utilizó un gasto alto sin llegar al gasto máximo no erosivo (aproximadamente el triple del TES); en el último cuarto, el gasto de riego se redujo a menos de la mitad del gasto inicial para completar la lámina proyectada. En el tratamiento INT, el gasto se dividió en dos secciones (sección A y B) de cinco surcos y la longitud del surco ( $L$ ) se dividió también en tres partes iguales. La aplicación del riego se inició en la zona A (0 m) y se suspendió al llegar al primer tercio ( $L/3$ ) para iniciar la aplicación en la zona B (0 m) y al llegar al primer tercio, repitiendo esta acción hasta cubrir los tres tercios de ambas zonas. En este tratamiento la separación entre surcos fue de 0.8 m. Para el caso del riego deficitario controlado (DEF), la  $L_n$  (calculada con IRRIMODEL) en cada riego se redujo al 30%; excepto en el segundo riego de auxilio, al cual no se

provocó déficit ya que coincidió con la etapa más crítica del cultivo desde el punto de vista hídrico que fue floración (R1).

La evaluación de los riegos se hizo en términos de eficiencias de aplicación ( $E_a$ ) y uniformidad (CUC) en unidades porcentuales en todos los riegos. La primera evaluación se determinó usando la fórmula  $E_a = (L_n / L_b) \times 100$ , donde  $E_a$  representa la eficiencia de aplicación (%),  $L_n$  la lámina de riego requerida o lámina neta y  $L_b$  la lámina de riego bruta o aplicada (Bolaños *et al.*, 2001). La determinación de  $L_b$  se calculó mediante la fórmula  $Q \times T = L_b \times A$ , donde  $Q$  es el gasto de riego ( $l\ s^{-1}$ ),  $T$  el tiempo (s),  $L_b$  es la lámina de riego aplicada (m) y  $A$  la superficie regada ( $m^2$ ) (Martin, 2006). El CUC se determinó utilizando la fórmula de Christiansen, expresada de la siguiente manera:  $CUC = \left[ 1 - \frac{\sum_{i=1}^n |L_i - L_m|}{n L_m} \right]$  donde,  $L_i$  es la lámina infiltrada (medida en forma gravimétrica) en el punto  $i$ ,  $L_m$  la lámina infiltrada media y  $n$  el número de sitios de muestreo a lo largo del surco.  $L_i$  se determinó en tres sitios de muestreo (50, 100 y 150 m) a lo largo del surco central de cada tratamiento con muestras gravimétricas en tres estratos del perfil del suelo (0-30, 30-60 y 60-90 cm), antes y después de cada riego.

Además de las variables anteriores, se evaluaron la productividad del agua (PA) y el rendimiento (R); la primera representa la relación de una producción obtenida (producto o servicio) con respecto al insumo agua (Bessembinder *et al.*, 2005); y se calcula con la siguiente fórmula:  $PA = (RC / VA)$ , donde  $RC$  es la producción de un cultivo en kg y  $VA$  el volumen de agua utilizado en  $m^3$ .

El rendimiento se evaluó el 27/07/11 (163 días después de siembra) en cinco sitios representativos de muestreo ubicados en los dos surcos centrales, de cinco metros de largo en un área de  $8\ m^2$  ( $5\ m \times 1.6\ m$ ), en los cinco tratamientos el testigo. Se realizó un análisis de varianza, con base en un modelo de bloques al azar con tres repeticiones. La comparación de medias se hizo con base en Tukey al nivel de significancia  $p \leq 0.05$ . Los análisis se realizaron con el paquete estadístico SAS v. 9.0.

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El calendario de riegos utilizado en los tratamientos estudiados se muestra en el Cuadro 1. Se aplicó un total de cinco riegos incluyendo el riego inicial. El intervalo de los riegos de auxilio fue de 16 a 52 días,

la Ln del riego inicial fue de 12 cm y las de los riegos de auxilio fluctuaron entre 8 y 11 cm, sumando una Ln total de 48 cm, a excepción del tratamiento DEF donde ésta fue menor.

**Tabla 1.** Calendario de riegos utilizado en cinco técnicas de aplicación del riego por superficie en el cultivo de maíz en el norte de Sinaloa. Suelo arcilloso, fecha de siembra 14/02/11.

| Riego | Días riego | al Intervalo (días) | Lámina neta (cm) | DGCA <sup>§</sup> | Etapa Fenológica    |
|-------|------------|---------------------|------------------|-------------------|---------------------|
| 1     | 0          | 0                   | 12               | 0                 | Siembra             |
| 2     | 52         | 52                  | 8                | 489.1             | Cuarta hoja (V4)    |
| 3     | 73         | 21                  | 8                | 741.2             | Flor masculina (VT) |
| 4     | 89         | 16                  | 9                | 962.3             | Jiloteo (R1)        |
| 5     | 105        | 16                  | 11               | 1213.7            | Grano lechoso (R3)  |
|       |            |                     | 48               |                   |                     |

<sup>§</sup>DGCA: Días Grado Crecimiento Acumulado.

Fuente: Elaboración propia

Los resultados de la calibración de los parámetros de diseño  $K_s$ ,  $H_f$  y  $n$  del programa RIGRAV se presentan en el Cuadro 2; se observan dos calibraciones a partir de los parámetros de referencia R propuestos por Fuentes (1997) y Rosano *et al.*, (2001). En la primera calibración C1 realizada en el riego inicial, los valores obtenidos de  $K_s$  y  $H_f$  fueron  $0.33 \text{ cm hr}^{-1}$  y 68 cm, respectivamente. El valor de  $n$  fue el mismo que el de referencia ( $0.0375 \text{ s m}^{-1/3}$ ). En la segunda calibración C2 efectuada en el primer riego de auxilio,  $n$  se mantuvo igual, mientras que  $K_s$  se modificó a  $0.09 \text{ cm hr}^{-1}$  y  $h_f$  a 99 cm probablemente por la variación de la porosidad inicial del suelo; estos valores se utilizaron para el diseño del resto de los riegos.

**Tabla 2.** Resultados de la calibración de los parámetros  $K_s$ ,  $H_f$  y  $n$  del modelo RIGRAV en dos eventos (C1 y C2).

| R | C   | $q_u$<br>( $\text{lps m}^{-1}$ ) | $\theta_0$<br>( $\text{cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ ) | $\theta_s$<br>( $\text{cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ ) | $K_s$<br>( $\text{cm hr}^{-1}$ ) | $N$<br>( $\text{s m}^{-1/3}$ ) | $h_f$<br>(cm) | $L_n$<br>(m) | $L_b$<br>(m) | $Tr$<br>(min) |
|---|-----|----------------------------------|---|---|----------------------------------|--------------------------------|---------------|--------------|--------------|---------------|
| 1 | ¶   | ---                              | ---   | ---   | 0.05                             | 0.0375                         | 59            | ---          | ---          | ---           |
|   | D1† | 0.76                             | 0.37  | 0.65  | 0.33                             | 0.0375                         | 68            | 0.12         | 0.13         | 605           |
| 2 | D1† | 0.76                             | 0.42  | 0.65  | 0.33                             | 0.0375                         | 68            | 0.08         | 0.11         | 469           |
|   | D2□ | 0.63                             | 0.42  | 0.65  | 0.09                             | 0.0375                         | 99            | 0.08         | 0.09         | 481           |

= parámetros de referencia, † = primera calibración, □ = segunda calibración, R = Riego, C = Calibración, Longitud = 204 m, Pendiente = 0.04 %

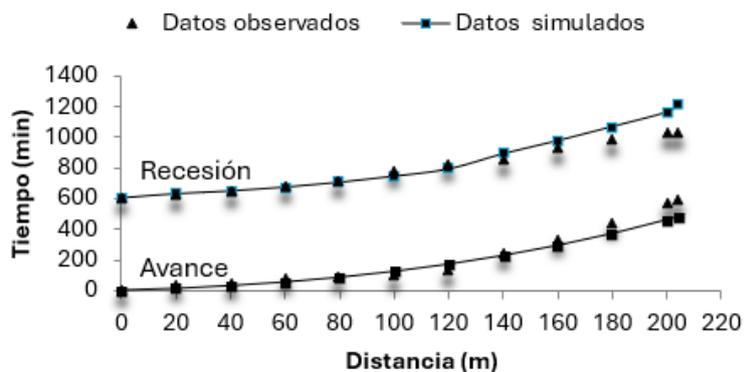
Fuente: Elaboración propia

En ambas calibraciones, las fases de avance y recesión observadas en campo fueron similares a las modeladas con el RIGRAV. En las Figuras 1a y 1b, se muestra un comparativo entre los datos modelados y calibrados de estas dos variables.

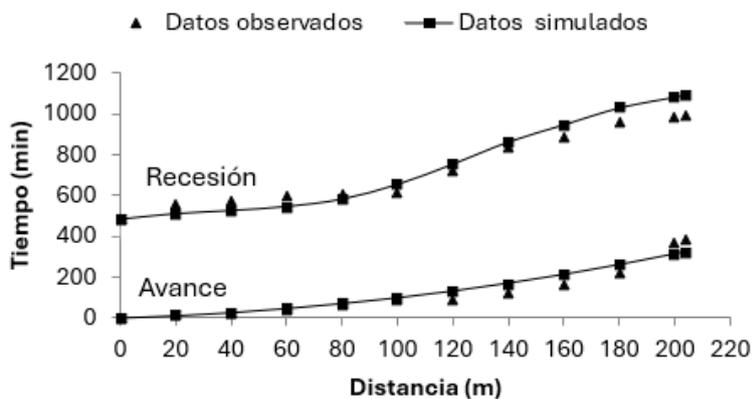


**Figura 1.**

*Comparación de las fases de avance y recesión observada y modelada con el programa RIGRAV durante el proceso de calibración durante el riego inicial (a) y primer auxilio (b).*



(a)



(b)

El Cuadro 3 muestra una comparación detallada entre las variables  $Q_g$ ,  $T_r$ ,  $E_a$  y CUC modeladas y obtenidas en campo. En todos los tratamientos, se observa que  $Q_g$  modelado fue similar al aplicado, lo cual indica un buen control de la aplicación de los tratamientos. De acuerdo con la  $E_a$  y CUC obtenida, el mejor tratamiento fue el REG con 89.16 % y 92 % respectivamente, seguido del INT con una  $E_a$  de 85.79 % y un CUC de 93.3 %, aunque la CUC de este último fue ligeramente mayor, el INT mostró mayor  $E_a$  y practicidad en la aplicación del riego. El TES mostró la mayor CUC, la cual fue de 99.03 % pero con la más baja  $E_a$  de sólo 48.78 %; esto demuestra que el riego tradicional utiliza el criterio de aplicación de láminas de riego altas en todos los puntos de la parcela con  $Q_g$  bajos con respecto al óptimo de diseño, provocando erosión hídrica y lixiviación de nutrientes soluble como el nitrógeno.



El tratamiento con mayor consumo de agua fue TES con 98.54 cm seguido de CAM con 58.10 cm, SUA 56.97 cm, INT 56.01 cm, REG 53.96 cm y DEF con sólo 44.28 cm de Lb.

**Tabla 3.** Comparación de las variables Qu, Tr, Ea y CUC modeladas con RIGRAV y obtenidas en riegos aplicados en seis tratamientos de riego por superficie en el norte de Sinaloa.

| Trat. | Riego | Sección | L<br>(m) | Qu*<br>(lps m <sup>-1</sup> ) | Tr*<br>(min) | Ea*<br>(%) | CUC*<br>(%) | Qg**<br>(lps) | Tr**<br>(min) | Ea**<br>(%) | CUC**<br>(%) |
|-------|-------|---------|----------|-------------------------------|--------------|------------|-------------|---------------|---------------|-------------|--------------|
| SA    | 1     |         | 204.3    | 0.76                          | 597          | 89         | 90          | 1.22          | 652           | 82.2        | 89           |
|       | 2     |         | 204.3    | 0.63                          | 481          | 88         | 89          | 1.01          | 476           | 90.7        | 87           |
|       | 3     |         | 204.3    | 0.63                          | 481          | 88         | 89          | 1.01          | 521           | 82.8        | 90           |
|       | 4     |         | 204.3    | 0.67                          | 508          | 86         | 87          | 1.07          | 556           | 82.4        | 90           |
|       | 5     |         | 204.3    | 0.76                          | 548          | 90         | 93          | 1.22          | 579           | 84.8        | 98           |
|       | Media |         |          |                               |              | 88.2       | 89.6        |               |               | 84.6        | 90.8         |
| CAM   | 1     |         | 204.3    | 0.76                          | 597          | 89         | 90          | 1.22          | 669           | 80.1        | 87           |
|       | 2     |         | 204.3    | 0.63                          | 481          | 88         | 89          | 1.01          | 502           | 85.9        | 89           |
|       | 3     |         | 204.3    | 0.63                          | 481          | 88         | 89          | 1.01          | 510           | 84.7        | 94           |
|       | 4     |         | 204.3    | 0.67                          | 508          | 86         | 87          | 1.07          | 565           | 81.1        | 86           |
|       | 5     |         | 204.3    | 0.76                          | 548          | 90         | 94          | 1.22          | 592           | 83          | 89           |
|       | Media |         |          |                               |              | 88.2       | 89.8        |               |               | 82.9        | 89           |
| REG   | 1     |         | 153.2    | 1.79                          | 77           | 73         | 88          | 1.43          | 118           | 86.2        | 83           |
|       |       |         | 204.3    | 0.76                          | 369          | 72         | 78          | 0.61          | 253           |             |              |
|       | 2     |         | 153.2    | 1.79                          | 52           | 75         | 71          | 1.43          | 71            | 87.9        | 94           |
|       |       |         | 204.3    | 0.73                          | 259          | 87         | 83          | 0.58          | 194           |             |              |
|       | 3     |         | 153.2    | 1.79                          | 52           | 74         | 71          | 1.43          | 65            | 90.6        | 94           |
|       |       |         | 204.3    | 0.73                          | 259          | 87         | 83          | 0.58          | 201           |             |              |
|       | 4     |         | 153.2    | 1.73                          | 66           | 80         | 75          | 1.38          | 183           | 91.5        | 96           |
|       |       |         | 204.3    | 0.73                          | 259          | 87         | 83          | 0.58          | 199           |             |              |
|       | 5     |         | 153.2    | 1.79                          | 79           | 84         | 79          | 1.43          | 103           | 89.6        | 93           |
|       |       |         | 204.3    | 0.76                          | 298          | 86         | 84          | 0.61          | 226           |             |              |
| Media |       |         |          |                               | 81.1         | 79.5       |             |               | 89.2          | 92          |              |
| INT   | 1     | A       | 68.1     | 1.2                           | 37           | 70         | 91          | 0.96          | 43            | 83.2        | 91           |
|       |       |         | 136.2    | 1.2                           | 106          | 72         | 97          | 0.96          | 77            |             |              |
|       |       |         | 204.3    | 1.2                           | 210          | 68         | 89          | 0.96          | 165           |             |              |
|       |       | 68.1    | 1.2      | 37                            | 70           | 91         | 0.96        | 44            |               |             |              |
|       |       | 136.2   | 1.2      | 106                           | 72           | 97         | 0.96        | 74            |               |             |              |
|       |       | 204.3   | 1.2      | 210                           | 68           | 89         | 0.96        | 164           |               |             |              |
|       | 2     | A       | 68.1     | 1                             | 30           | 75         | 84          | 0.8           | 38            | 84.2        | 93           |
|       |       |         | 136.2    | 1                             | 76           | 60         | 79          | 0.8           | 64            |             |              |
|       |       |         | 204.3    | 1                             | 151          | 86         | 79          | 0.8           | 113           |             |              |
|       |       | 68.1    | 1        | 30                            | 75           | 84         | 0.8         | 35            |               |             |              |
|       |       | 136.2   | 1        | 76                            | 60           | 79         | 0.8         | 67            |               |             |              |
|       |       | 204.3   | 1        | 151                           | 86           | 79         | 0.8         | 121           |               |             |              |
|       | 3     | A       | 68.1     | 1                             | 30           | 75         | 84          | 0.8           | 33            | 85.8        | 94           |
|       |       |         | 136.2    | 1                             | 76           | 60         | 77          | 0.8           | 73            |             |              |
|       |       |         | 204.3    | 1                             | 151          | 86         | 79          | 0.8           | 109           |             |              |
|       |       | 68.1    | 1        | 30                            | 75           | 84         | 0.8         | 34            |               |             |              |
|       |       | 136.2   | 1        | 76                            | 60           | 77         | 0.8         | 69            |               |             |              |
|       |       | 204.3   | 1        | 151                           | 86           | 79         | 0.8         | 103           |               |             |              |

|     |       |       |   |     |       |      |      |      |      |      |
|-----|-------|-------|---|-----|-------|------|------|------|------|------|
|     |       | 68.1  | 1 | 31  | 75    | 84   | 0.8  | 42   |      |      |
|     |       | 136.2 | 1 | 76  | 85    | 79   | 0.8  | 74   | 86.2 | 96   |
|     | A     | 204.3 | 1 | 151 | 86    | 79   | 0.8  | 118  |      |      |
| 4   |       | 68.1  | 1 | 31  | 75    | 84   | 0.8  | 37   |      |      |
|     | B     | 136.2 | 1 | 76  | 85    | 79   | 0.8  | 73   | 86.7 | 95   |
|     |       | 204.3 | 1 | 151 | 86    | 79   | 0.8  | 133  |      |      |
|     |       | 68.1  | 1 | 38  | 89    | 85   | 0.8  | 45   |      |      |
|     | A     | 136.2 | 1 | 78  | 85    | 80   | 0.8  | 87   | 87.2 | 93   |
|     |       | 204.3 | 1 | 189 | 85    | 80   | 0.8  | 164  |      |      |
| 5   |       | 68.1  | 1 | 38  | 89    | 85   | 0.8  | 45   |      |      |
|     | B     | 136.2 | 1 | 78  | 85    | 80   | 0.8  | 86   | 88.9 | 93   |
|     |       | 204.3 | 1 | 189 | 85    | 80   | 0.8  | 157  |      |      |
|     | Media |       |   |     | 76.63 | 83.1 |      |      | 85.7 | 93.3 |
|     | 1     | 204.3 | 1 | 318 | 89    | 91   | 0.8  | 351  | 81.6 | 93   |
|     | 2     | 204.3 | 1 | 212 | 83    | 80   | 0.8  | 232  | 82.2 | 96   |
|     | 3     | 204.3 | 1 | 303 | 88    | 86   | 0.8  | 324  | 84   | 88   |
|     | 4     | 204.3 | 1 | 238 | 83    | 81   | 0.8  | 266  | 80.7 | 84   |
|     | 5     | 204.3 | 1 | 291 | 89    | 86   | 0.8  | 335  | 78.3 | 96   |
| DEF | Media |       |   |     | 86.4  | 84.8 |      |      | 81.3 | 91.4 |
|     | 1     | 204.3 |   |     |       |      | 0.52 | 1173 | 52.7 | 99.4 |
|     | 2     | 204.3 |   |     |       |      | 0.52 | 1086 | 38.6 | 98.6 |
|     | 3     | 204.3 |   |     |       |      | 0.52 | 977  | 42.9 | 99.7 |
|     | 4     | 204.3 |   |     |       |      | 0.52 | 924  | 51   | 98.3 |
|     | 5     | 204.3 |   |     |       |      | 0.52 | 982  | 58.7 | 98.9 |
| TES | Media |       |   |     |       |      |      |      | 48.8 | 99.0 |

\* variables modeladas \*\* variables obtenidas

Fuente: Elaboración propia

La variable rendimiento de grano mostró diferencia estadística significativa entre tratamientos; la mejor técnica fue REG con 10,686 kg ha<sup>-1</sup>, mientras que el del testigo fue de 9,423 kg ha<sup>-1</sup>, como se muestra en el Cuadro 4, lo cual indica que, en condiciones óptimas de humedad en el suelo, es un factor fundamental para mejorar el rendimiento, ya que también fue el mejor en términos de Ea y CUC. Los tratamientos restantes fueron similares al testigo.

**Tabla 4.** Rendimiento de grano y rendimiento relativo del cultivo de maíz en los cinco tratamientos de riego por gravedad y el testigo en el norte de Sinaloa.

| Tratamiento        | Clave | Rendimiento<br>(kg ha <sup>-1</sup> ) | Rendimiento relativo<br>(%/100) |
|--------------------|-------|---------------------------------------|---------------------------------|
| Surcos alternos    | SA    | 8,869 e                               | 0.83                            |
| Camas              | CAM   | 8,742 f                               | 0.82                            |
| Reducción de gasto | REG   | 10,686 a                              | 1.00                            |
| Intermitente       | INT   | 9,622 c                               | 0.90                            |
| Deficitario        | DEF   | 9,025 b                               | 0.84                            |
| Testigo            | TES   | 9,423 d                               | 0.88                            |

Letras distintas en una misma columna denotan tratamientos significativamente diferentes de acuerdo con la prueba de Tukey ( $\alpha=0.05$ ).

Fuente: Elaboración propia



Con respecto a la variable PA, los tratamientos DEF y REG fueron los mejores con 2.04 y 1.98 kg m<sup>-3</sup>, respectivamente, mientras que la del TES fue sólo de 0.96, como se muestra en el Cuadro 5.

**Tabla 5.** Rendimiento de grano y productividad del agua en cinco técnicas de aplicación del riego y el testigo en el cultivo de maíz en el norte de Sinaloa.

| Tratamiento        | Clave | Rendimiento (kg ha <sup>-1</sup> ) | Volumen aplicado (m <sup>3</sup> ha <sup>-1</sup> ) | Productividad del agua (kg m <sup>-3</sup> ) | Diferencia |
|--------------------|-------|------------------------------------|---|--|------------|
| Surco alterno      | SUA   | 8,869                              | 5,697   | 1.56   | +0.60      |
| Camas              | CAM   | 8,742                              | 5,810   | 1.51   | +0.55      |
| Reducción de gasto | REG   | 10,686                             | 5,396   | 1.98   | +1.02      |
| Intermitente       | INT   | 9,622                              | 5,601   | 1.72   | +0.76      |
| Riego deficitario  | DEF   | 9,025                              | 4,428   | 2.04   | +1.08      |
| Testigo            | TES   | 9,423                              | 9,854   | 0.96   | ---        |

Fuente: Elaboración propia

Las 5 técnicas parcelarias evaluadas muestran las bondades en el ahorro del agua; estas alternativas podrían implementarse en los distritos de riego de México, ya que el volumen ahorrado es cercano a 5,426 m<sup>3</sup> ha<sup>-1</sup> del tratamiento con menor consumo de agua (DEF) con respecto al TES, con sólo una reducción del 4.3 % de rendimiento, lo que permitiría una mayor superficie sembrada y el establecimiento de cultivos dobles en el mismo ciclo agrícola. El tiempo total de riego refleja una reducción en la mano de obra, lo cual permite disminuir los costos del cultivo.

## CONCLUSIONES

Se lograron calibrar los parámetros conductividad hidráulica a saturación (Ks) y el parámetro de la función de infiltración (Hf); sin embargo, ésta debe realizarse en dos eventos apoyados con pruebas de riego (avance y recesión), en el riego inicial y en el primer auxilio debido a la variación en porosidad del suelo. El mejor tratamiento desde el punto de vista de eficiencias, rendimiento y practicidad fue la reducción de gasto (REG).

Desde el punto de vista de ahorro de agua y productividad del agua el mejor fue el riego deficitario; esta técnica podría ser una excelente opción en escenarios de gran escasez de agua. Los tratamientos surcos alternos y camas mostraron eficiencias de aplicación relativamente altas (Ea), con una tendencia a disminuir el Coeficiente de Uniformidad de Christiansen (CUC) por la ruptura del lomo de surcos y el bordo de la cama.



Los modelos IRRIMODEL y RIGRAV demostraron ser excelentes herramientas para el manejo integral del riego en las técnicas evaluadas. El RIGRAV adecuado para las técnicas de surcos alternos, camas, reducción de gasto y riego intermitente, proporciona buen nivel de precisión en el diseño, cuando se cuenta con suficiente información de campo, dándole aplicabilidad a nivel de zona de riego. No se puede generalizar el uso de las técnicas para los diferentes tipos de suelos, por esto se recomienda estratificar su aplicación para una zona de riego específica.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Alonso Sánchez, H., Tadeo Robledo, M., Espinosa Calderón, A., Zaragoza Esparza, J., López López, C., Zamudio González, B., Monter Santillán, A., Turrent Fernández, A., Arteaga Escamilla, I., Mora García, K. (2023). Efecto de la densidad de población y la fertilización sobre la productividad del agua y rendimientos de híbridos de maíz en el Valle de México. *Terra Latinoamericana*, 41, e1577. <https://doi.org/10.28940/terra.v41i0.1577>
- Bessembinder, J. J. E., Leffelaar, P. A., Dhindwal, A. S., & Ponsioen, T. C. (2005). Which crop and which drop, and the scope for improvement of water productivity. *Agric. Water Manage*, 73 (2): 113-130. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2004.10.004>
- Blanco Navarro, M.A., Mendieta, Bryan., & Rocha, L., (2023). Asocios de cultivos en camellones prehispánicos y su efecto en las propiedades del suelo. *Revista científica la calera*, 23 (10), 22-29. <https://doi.org/10.5377/calera.v23i40.15917>
- Bolaños-González, M., Palacios-Vélez, E., Scott, C., & Exebio-García, A. (2001). Estimación del volumen de agua usado en una zona de riego mediante una imagen satélite e información complementaria. *Agrociencia* 35 (6): 589-597. <https://www.redalyc.org/pdf/302/30200602.pdf>
- Chow, V. T. (1973). Hydrodynamic modeling of two-dimensional watershed flow. *J. Of the Hydraulics Division* 99 (11): 2023-2040.
- Cruz Cruz, N.V., Portillo Vázquez, M., Pérez Soto, Francisco., Caamal Cauich, I., & Martínez Damián, M. A. (2017). Análisis de la producción mundial, nacional y estatal de maíz (*Zea mays L.*). *Agroproductividad*, 95-100. <https://www.revista-agroproductividad.org/index.php/agroproductividad/article/view/982>



- Cruz Delgado, D., & Leos Rodríguez, J.A. (2019). La producción de maíz en Sinaloa, México, y sus implicaciones para el medio ambiente. *Letras Verdes Revista Latinoamericana de Estudios Socioambientales*, 100-118. <https://doi.org/10.17141/letrasverdes.25.2019.3705>
- Cruz González, A., Arteaga Ramírez, R., Sánchez Cohen, I., Soria Ruiz, J., & Monterroso Rivas, A. I. (2024). Impactos del cambio climático en la producción de maíz en México. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 15(1), e3327. DOI: <https://doi.org/10.29312/remexca.v15i1.3327>
- Cuadras-Berrelleza, A. A., Peinado-Guevara, V. M., Portillo-Molina, R., Ahumada-Cervantes R., Leyva-Morales J. B., Peinado-Guevara H. J., et al. (2021). Prácticas agrícolas y sustentabilidad en cultivos de maíz en Guasave, Sinaloa. *Ra Ximhai*, 17(3), 355-385. <https://doi.org/10.35197/rx.17.03.2021.15.ac>
- Flores Gallardo, H., Sifuentes Ibarra, E., Flores Magdaleno, H., Ojeda Bustamante, W., & Ramos García, C. R. (2014). Técnicas de conservación del agua en riego por gravedad a nivel parcelario. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 5(2), 241–252.
- Flores Mancheno, C. I., & Palacios López, L. A. (2025). Tecnologías de riego inteligente y su contribución a la conservación del agua en agricultura. *Multidisciplinary Collaborative Journal*, 3(1), 61–73. <https://doi.org/10.70881/mcj/v3/n1/46>
- Fuentes Ruiz, C. (1997). Manual para diseño de zonas de riego pequeñas. IMTA. Jiutepec, Morelos, México. pp: 1-3 a 1-12.
- Green, W. A. & Ampt, G. A. (1911). Studies on soil physics 1. The flow of air and water through soils. *J. Of Agric. Sci.* 4 (1): 1-24.
- Guzmán Anaya, L., & Lugo Sánchez, M. G. (2024). Análisis regional de la producción de maíz en México. *Economía*, 19(62), 9-18.
- Guzmán Luna, L., Quevedo Nolasco, A., Ramírez, F. P., Bolaños González, M. A., & Guzmán Luna, J. R. (2022). Variación temporal de los requerimientos de riego en maíz. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 14(5), 51–63. <https://doi.org/10.29312/remexca.v14i5.3084>



- Huang, M., Li, W., Hu, C., Wu, J., Huang, H., Fu, G., Shaaban, M., Li, Y., & Li, G. (2024). Coupled one-off alternate furrow irrigation with nitrogen topdressing at jointing optimizes soil nitrate-N distribution and wheat nitrogen productivity in dryland. *Frontiers in Plant Science*, 15, 1372385. <https://doi.org/10.3389/fpls.2024.1372385>
- Martin E., C. (2006). Determining the amount of irrigation water applied to a field. The University of Arizona Cooperative Extension, Pub. AZ 1157, Arizona Water Series: Number 29. 3 p.
- Ojeda Bustamante, W., Sifuentes Ibarra, E., & Unland Weiss, H. (2006). Programación integral de riego en maíz en el norte de Sinaloa. *Agrociencia* 40 (1): 13-25.
- Ojeda Bustamante, W., Sifuentes Ibarra, E., Íñiguez Covarrubias, M., & Montero Martínez, M. (2011). Impacto del cambio climático en el desarrollo y requerimientos hídricos de los cultivos. *Agrociencia* 45 (1): 1-11.
- Rendón Pimentel, L., Fuentes Ruiz, C., y Magaña S, G. (1995). Diseño simplificado de riego por gravedad. In: Memorias del VI Congreso Nacional de Irrigación. Chapingo, México. pp: 385-391
- Rosano Méndez, L., Rendón Pimentel, L., Pacheco Hernández, P., Etchevers Barra, J. D., Chávez Morales, J., Vaquera Huerta, H. (2001). Calibración de un modelo hidrológico aplicado en el riego tecnificado por gravedad. *Agrociencia*, 35, 577-588.
- Sarker, K. K., Hossain, A., Timsina, J., Biswas, S.K., Malone, S. L., Alam, M. K., Loescher, H. W., Bazzaz M. (2020). Alternate furrow irrigation can maintain grain yield and nutrient content, and increase crop water productivity in dry season maize in South Asia. *Agricultural Water Management*, 238, 106229. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2020.106229>
- Sifuentes Ibarra, E., Ojeda Bustamante, W., Macías Cervantes, J., Merino Leyva, R.I., Preciado Rangel, P., Ruelas Islas, J. R. . (2023). Déficit hídrico controlado y su efecto en el rendimiento y calidad de tres variedades de papa. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 14(8), e3202. <https://doi.org/10.29312/remexca.v14i8.3202>
- Trujillo García, D., Uscanga Mortera, E., Otero Sánchez, M. A., Becerril Román, A.E., Jaén Contreras, D., Canales Sosa, E., & Trejo, C. (2025). El riego deficitario incrementa la productividad del maíz. *Tropical and subtropical agroecosystems*. <http://doi.org/10.56369/tsaes.5306>

