

Dos Modelos de Aspersores en el Rendimiento, Calidad y Eficiencia del Uso del Agua del Cultivo de Papa (*Solanum tuberosum L.*) Two Sprinkler Models in Performance, Quality and Efficiency of Water Use in Potato Crops (*Solanum tuberosum L.*)

Jesús Alejandro Beltrán-Félix¹ , Ernesto Sifuentes-Ibarra^{2±} ,
Blanca Elvira Lopez-Valenzuela¹ , Vladimir Ruiz-Perez¹ ,
Jesús del Rosario Ruelas Islas¹ , Quintín Armando Ayala-Armenta¹ 

¹ Universidad Autónoma de Sinaloa, Facultad de Agricultura del Valle del Fuerte. Av. Japaraqui y Calle 16 s/n, Colonia El Estero (Juan José Ríos). 8110 Ahome, Sinaloa, México; (J.A.B.F.), (B.E.L.V.), (V.R.P.), (J.R.R.I.), (Q.A.A.A.).

² Campo Experimental Valle del Fuerte-INIFAP. Carretera Internacional México-Nogales km 1609, Col. Juan José Ríos. 81110 Guasave Sinaloa, México; (E.S.I.).

± Autor para correspondencia: eblnat68@gmail.com

RESUMEN

La superficie de papa cosechada en México bajo riego es de 68 000 ha, de las cuales 64% son de riego y 36% de temporal, con un rendimiento medio de 27.4 Mg ha⁻¹ y una derrama económica de 11 000 millones de pesos al año, ubicando a este cultivo dentro de los cinco principales del país. En los últimos 10 años los sistemas de aspersión fija han incrementado su uso en forma exponencial, principalmente en los distritos de riego del noroeste, sin embargo, se carece de información científica sobre su efecto en el rendimiento, calidad y aprovechamiento del agua de riego. El objetivo del presente trabajo fue conocer el efecto de los aspersores Naan Dan 5022 (A1) y Xcell Wobbler de senninger (A2) en el rendimiento, calidad y uso del agua del cultivo de papa variedad Fiana. El estudio se desarrolló en el norte de Sinaloa, México en un suelo representativo de la zona, estableciendo tres tratamientos (T) en una franja de terreno de 0.12 ha, T1 fue el aspersor A1 y T2 el aspersor A2. Las variables medidas fueron presión de operación, lámina de riego, uniformidad de riego, eficiencia de aplicación, biomasa, índice ndvi, rendimiento y calidad de tubérculos, las tres últimas variables fueron sometidas a un análisis de varianza y prueba de medias. El rendimiento estimado para el mejor tratamiento fue de 42 Mg ha⁻¹ que utilizó el aspersor Xcell Wobbler. Al finalizar este proyecto se recomienda la utilización del aspersor Xcell Wobbler debido a su fiabilidad en funcionamiento, opera a menores presiones y en general y se adaptó a las demandas específicas de funcionamiento de la zona de estudio y se mejorara la producción del cultivo de papa en el norte del estado de Sinaloa.



Cita recomendada:

Beltrán-Félix, J. A., Sifuentes-Ibarra, E., Lopez-Valenzuela, B. E., Ruiz-Perez, V., Ruelas-Islas, J. R., & Ayala-Armenta, Q. A. (2025). Dos Modelos de Aspersores en el Rendimiento, Calidad y Eficiencia del Uso del Agua del Cultivo de Papa (*Solanum tuberosum L.*). *Terra Latinoamericana*, 43, 1-13. e2078. <https://doi.org/10.28940/terra.v43i.2078>

Recibido: 30 de agosto de 2024.

Aceptado: 16 de enero de 2025.

Artículo. Volumen 43.

Junio de 2025.

Editor de Sección:
Dr. Pablo Preciado Rangel

Editor Técnico:
Dra. Elizabeth Hernández Acosta



Copyright: © 2025 by the authors.
Submitted for possible open access publication under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY NC ND) License (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>).

Palabras clave: aspersión fija, eficiencias de riego, sensores remotos.

SUMMARY

The surface area of irrigated potatoes harvested in Mexico is 68 000 ha, of which 64% are irrigated and 36% rainfed with an average yield of 27.4 Mg ha⁻¹ and an economic impact of 11 000 million pesos per year, placing this crop among the five main ones in the country. In the last 10 years, the use of fixed sprinkler systems has increased exponentially, mainly in northwestern irrigation districts. Nonetheless, a lack of scientific information exists on their effect on yield, quality, and irrigation water use. Therefore, the objective of the present research is to determine the effect of Naan Dan 5022 (A1) and Xcell Wobbler Senninger (A2) sprinklers on water yield, quality and use in Fiana variety of potato crop. The study was performed in Sinaloa, Mexico, on a representative soil of the area, establishing three treatments (T) in a

strip of land of 0.12 ha: T1 (A1) sprinkler and T2 (A2) sprinkler. The variables measured were operating pressure, irrigation depth, irrigation uniformity, application efficiency, biomass, Normalized Difference Vegetation Index (NDVI), yield and tuber quality; the last three variables were subjected to an analysis of variance and a mean test. The estimated yield for the best treatment was 42 Mg ha^{-1} using Xcell Wobbler sprinkler. At the end of this project, the use of Xcell Wobbler sprinkler is recommended due to its operation reliability at lower pressures and, in general, adapting to specific operating demands of the study area and improving potato crop production in the northern state of Sinaloa.

Index words: *fixed sprinklers, irrigation efficiencies, remote sensors.*

INTRODUCCIÓN

El cultivo de papa (*Solanum tuberosum* L.) se considera como básico dentro de la dieta de muchos países ya que es un importante proveedor de carbohidratos, vitaminas y minerales, ocupando el cuarto lugar en importancia después del trigo, arroz y maíz (Camire, 2016). En 159 países del mundo se cultiva papa sobre una superficie total de 17.8 millones de hectáreas. En el mundo se producen anualmente 374 millones de toneladas de papa (FAO, 2024). En 2017 se produjeron 388 millones de toneladas en 20 millones de hectáreas cosechadas a nivel global, siendo China, India, Rusia, Ucrania y Estados Unidos, los principales países productores (FAOSTAT, 2017). Este cultivo es considerado como sensible al estrés hídrico (Gillette *et al.*, 2023) y tiene una alta sensibilidad a los excesos y deficiencias de humedad en el suelo (Flores-Gallardo, Ojeda, Flores, Mejía y Sifuentes, 2011), para alcanzar sus rendimientos potenciales requiere de 400 a 700 mm de agua (Manickam, Pillai y Manickam, 2018; Steduto, 2012). La etapa más crítica y de mayor exigencia de agua es la floración, que coincide con la tuberización, la cual se presenta aproximadamente a los 100 días después de la siembra (DDS), pues su disponibilidad limitada reduce el número de tubérculos por planta (Manickam *et al.*, 2018).

En México, los distritos de riego comprenden una superficie de 3.2 millones de hectáreas (CONAGUA, 2018) y son consideradas zonas agrícolas estratégicas para la producción de alimentos y fibras. En ellos se produce el 51% de la producción agrícola nacional y el 70% de las exportaciones, siendo generadores de empleo y divisas (CONAGUA, 2018). Los sistemas de riego presurizados permiten la aplicación del agua y fertilizantes con alto nivel de eficiencias, especialmente cuando la programación del riego se automatiza a través de sensores que monitorean variables edáficas, climáticas y de cultivo, traduciéndose en ahorros de agua, incremento en rendimiento y calidad, y ahorro en mano de obra (Arámbula-Marín, y Salazar, 2017¹). Los sistemas de riego por aspersión, con una eficiencia de aplicación del 85%, se comportan mejor que los sistemas de riego por gravedad, que se distinguen por su baja eficiencia entre el 60 y 65%, sin embargo, en ambos casos es necesario el diseño, programación y manejo deficientes para lograr importantes rendimientos y calidad de cosecha (Sifuentes y Macías, 2022). Ante esta situación se requiere mejorar la programación, evaluación y desempeño de los componentes de estos sistemas de riego, principalmente los aspersores que tienen impacto directo en la calidad y cantidad de producción en cultivos como papa ya que la aplicación del agua es en forma de lluvia ligera, esto hace que la tierra se pueda compactar y afectar al cultivo si no se aplica de la manera correcta.

El uso de sistemas de riego de aspersión fija baja ha ido en aumento en los últimos años en el cultivo de papa en el norte de Sinaloa (Flores-Gallardo, Sifuentes y Ojeda, 2007), comercialmente existen diversas marcas que ofrecen aspersores para este tipo de riego, sin embargo, se carece de información científica suficiente sobre desempeño, manejo y efecto en el rendimiento y calidad de papa. La determinación experimental de las capacidades operativas de los principales aspersores utilizados en sistemas de riego por aspersión fija y su efecto en el rendimiento y calidad de papa, permitirá seleccionar aquellos con las mejores características operativas y utilizarlas para diseño y evaluación de estos sistemas.

El objetivo del presente trabajo fue conocer el efecto de los aspersores Naan Dan y Xcell Wobbler operados en un sistema de aspersión fija, en el rendimiento, calidad y eficiencia del uso del agua del cultivo de papa, en el norte de Sinaloa, México.

¹ Arámbula-Marín, A., & Salazar-Tapia A. A. (2017). *Diseño y construcción de un prototipo de sistema de riego automatizado con tecnología open source y energía renovable con monitoreo vía web para los huertos organopónicos de la prefectura del guayas*. Tesis de grado para obtener el título de Ingeniería. Universidad de Guayaquil. Disponible en: <https://repositorio.ug.edu.ec/handle/redug/27808>

MATERIALES Y MÉTODOS

El trabajo se realizó durante el ciclo otoño-invierno (OI) 2021-2022 en el Campo Experimental Valle del Fuerte (CEVAF) del Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (INIFAP), ubicado frente a Juan José Ríos, Sinaloa a la altura del km 1609 de la carretera internacional México-Nogales, al norte del estado en las coordenadas 25° 45' 46" N y 108° 48' 43" O, dentro del distrito de riego 075 Río Fuerte, el cual colinda con los distritos 063 Guasave y 076 Valle del Carrizo.

El lote experimental se estableció en un área de 1200 m², bajo riego por aspersión fija-baja, donde se establecieron dos tratamientos (T) en franjas con cuatro repeticiones (R). T1 correspondió al aspersor Naan Dan 5022 (A1) y T2 al aspersor Senninger Xcell Wobbler (A2), como se muestra en la Figura 1, 2.

Características del aspersor Xcell Wobbler: el contrabalanceo reduce la vibración, dando un rendimiento suave y estable, una única pieza móvil, lo que supone una mayor vida útil, conexiones NPT macho de 3/4" o 1/2", caudales: de 0.78 a 6.97 gpm (177 a 1583 L h⁻¹), presiones de funcionamiento: de 10 a 25 psi (0.69 a 1.72 bar), baja pérdida por viento y evaporación a bajas presiones, se colocaron sobre una base tubular de un metro sobre el nivel del suelo.

Características del aspersor Naan Dan 5022: aspersor plástico de impacto de 1/2" macho o hembra de 3/4", diseño único del martillo combinado con la placa SD (súper difusor), diseñado para una distribución uniforme con una o dos boquillas, diseñado para lograr un rendimiento óptimo y uniforme a bajas presiones, gran uniformidad de distribución (hasta 12 metros), mayor resistencia al viento, diseñado para ciclos cortos de riego para germinación, boquillas a bayoneta codificadas por color para un sencillo mantenimiento, instalado en una base tubular de un metro sobre el surco igual que el aspersor Xcell Wobbler.

La preparación del terreno se realizó de manera convencional, consistiendo en un barbecho, rastreo cruzado y marca de surcos. Antes de la siembra se realizó un análisis físico-químico de suelo en el estrato superficial 0-40 cm y se aplicó un riego por gravedad para humedecer la zona de raíces, estimada en 0.7 m del perfil de suelo. El cultivo se estableció el 08/12/2021 en surcos de 40 m de longitud separados a 0.8 m, usando una densidad de siembra de 50 000 semillas ha⁻¹. Para la evaluación de los tratamientos, se midieron las siguientes variables.

Contenido volumétrico de humedad del suelo (θ_v). Esta variable se midió en dos estratos del perfil de suelo (0-30 y 30-60) antes de la aplicación de cada riego, se utilizó el sensor de humedad portátil Field Scout TDR300 calibrado localmente en forma gravimétrica.

Biomasa (B). La biomasa se determinó en un metro lineal (1 m × 90 cm), en base a los pesos secos obtenidos para esta variable.

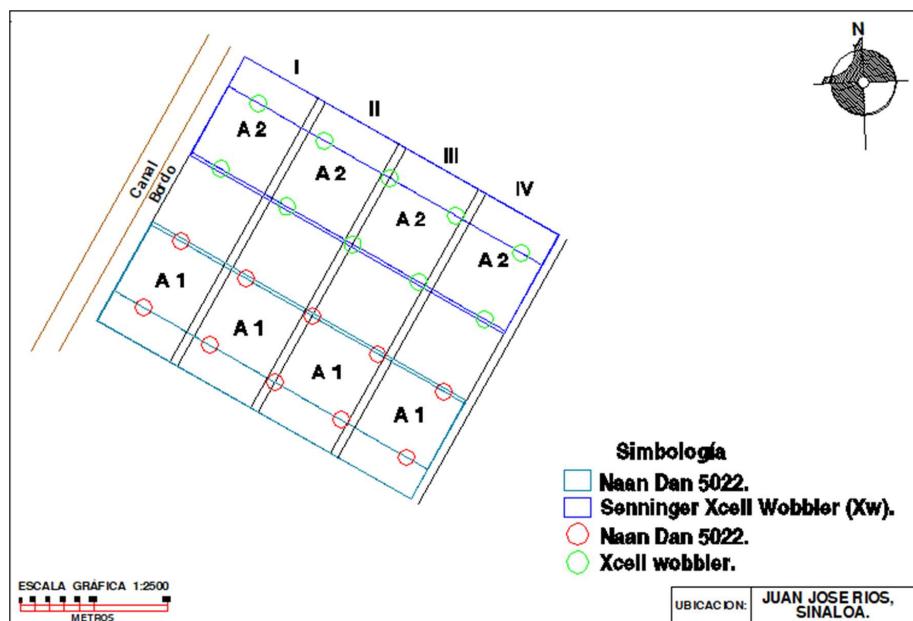


Figura 1. Distribución de tratamientos en lote experimental. INIFAP-CEVAF, OI 2021-2022.
Figure 1. Treatment distribution in experimental plot. INIFAP-CEVAF, FW 2021-2022.



Figura 2. Imagen de la Distribución de tratamientos en lote experimental. INIFAP-CEVAF, OI 2021-2022.
Figure 2. Image of treatment distribution in the experimental plot. INIFAP-CEVAF, FW 2021-2022.

$$P_{sm} = \frac{Ps_{sm} \times Pf_m}{Pf_{sm}} \quad (1)$$

Donde P_{sm} es el peso seco de la muestra completa del órgano, Ps_{sm} peso seco de la submuestra, Pf_m el peso fresco de la muestra y Pf_{sm} es el peso fresco de la submuestra.

Después de obtener el peso seco de cada tubérculo la biomasa se estimó con suma de los pesos secos de cada órgano. Para expresar la biomasa en kilogramos sobre hectárea, se utilizó la siguiente formula:

$$B = \frac{Ps_t \times 10\,000}{A_m} \quad (2)$$

Donde B es biomasa, Ps_t es la sumatoria de los pesos secos obtenidos de cada órgano y A_m es el área que se muestreo.

Índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI). Este índice se midió con cámara Parrot sequoia montada en un dron eBee. La cámara cuenta con un sensor multiespectral para detectar las bandas del verde (G), rojo (R), borde rojo (IR) e infrarrojo cercano (NIR) así como un sensor RGB. Se realizaron vuelos en periodos quincenales para la elaboración de ortofotomosaicos RGB y NGB usando una versión de prueba del software AgisoftPhotoScan (Agisoft LLC, 2024) con la cual se pueden procesar las fotografías tomadas y realizar la ortorectificación y creación del mosaico de imágenes (Berrio-Meneses, Alzate, Ramón y Ramón, 2015). El NDVI se calculó delimitando una parcela útil en cada parcela experimental con la siguiente ecuación (Cherlinka, 2020):

$$NDVI = \frac{(NIR - R)}{(NIR + R)} \quad (3)$$

Para el cálculo del índice NDVI se utilizó la calculadora de Ráster del Software QGIS Versión 3.22 (Qgis.org, 2024) cargando los datos necesarios. Los resultados del NDVI fueron representados con un mapa de colores, donde cada color corresponde a un cierto rango de valores. No hay una paleta de colores estándar, pero la mayoría de los programas informáticos utilizan la variante "rojo-verde", lo que significa que los colores rojo-naranja-amarillo indican suelo desnudo o vegetación muerta/dispersa y los tonos de verde son un signo de una cubierta vegetal normal o densa.

Eficiencia de aplicación (EA). Se determinó en cada riego, mediante la ecuación $EA = (Ln / Lb) \times 100$, donde Ln representa la lámina de agua requerida por el cultivo o lámina neta (cm), calculada mediante balance hídrico y en función de Grados-día desarrollo (GDD) a través de la plataforma IRRIMODEL 3.0 (Sifuentes-Ibarra et al., 2023a). Lb representa la lámina de agua aplicada en cada tratamiento (cm), la cual se determinó mediante pluviómetros instalados en forma vertical y transversal formando una cruz.

Eficiencia de distribución (ED). Para esta variable se determinó el coeficiente de uniformidad de Christiansen (CUC) en cada tratamiento, expresado en %, mediante la ecuación reportada por Rendón y Fuentes (2007):

$$CUC = \left[1 - \frac{\sum_{i=1}^n |L_i - L_m|}{n \times L_m} \right] \times 100 \quad (4)$$

Donde L_i representa la lámina medida en cada pluviómetro (mm), L_m es la lámina media de todas las observaciones (mm) y n representa la cantidad total de observaciones, siendo 16 observaciones, 8 por en el tratamiento 1 y 8 en el tratamiento 2, por cada riego aplicado (Figura 3).

Rendimiento (Ya) y Calidad (C). Se realizó un muestreo destructivo en un área útil de 3.2 m² (cuatro surcos de un metro lineal), en cada parcela experimental de los dos tratamientos. Para expresar el peso de las muestras en kg ha⁻¹, se utilizó la siguiente relación:

$$Ya = \frac{Pm}{Am} \times 10000 \quad (5)$$

Donde Ya representa el rendimiento estimado en kg ha⁻¹, Pm el peso de la muestra (kg) y Am representa el área muestreada (m²). Para determinar la calidad de tubérculos (C) se utilizó la metodología reportada por Sifuentes-Ibarra *et al.* (2023a) en cada muestra, los cuales clasificaron la calidad como se muestra en el Cuadro 1.

Para el análisis estadístico se utilizó el programa de cómputo SAS versión 10 (SAS Institute, 2019) con el cual se realizó un análisis de varianza de las variables rendimiento (Y) y calidad (C), considerando un arreglo en bloques completos al azar, además, se realizó una comparación de medias con la prueba de Tukey ($P \leq 0.05$).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Contenido Volumétrico de Humedad del Suelo (θv)

La Figura 4 muestra el comportamiento del contenido volumétrico de humedad del suelo en dos estratos (0-30 y 30-60 cm) para los dos modelos de aspersores antes de cada riego de auxilio. Se observa que el aspersor Xcell Wobbler registró valores más bajos de humedad de los 44 a los 71 dds respecto al Naan Dan 5022, en el estrato 30-60 cm, sin embargo, se observa menor variación que el Naan Dan a lo largo del ciclo, lo que indica un mejor desempeño reflejándose en una mejor distribución de humedad. En el estrato 0-30 cm, solo se observó un valor menor a los 51 dds de Xcell Wobbler, lo cual es congruente con el mayor contenido de humedad en el estrato inferior.



Figura 3. Toma de muestras de pluviometría.
Figure 3. Rainfall sampling.

Cuadro 1. Clasificación de tubérculos de papa con base en el diámetro ecuatorial utilizado en el norte de Sinaloa, México (Sifuentes, Cabrera, Macías, Marcial y Jiménez 2023b).
Table 1. Classification of potato tubers based on the equatorial diameter used in northern Sinaloa, México (Sifuentes, Cabrera, Macías, Marcial and Jiménez 2023b).

Calidad	Clave	Diámetro ecuatorial
		mm
Primera	C1	71-81
Segunda	C2	51-70
Tercera	C3	41-50
Cuarta	C4	31-40
Quinta	C5	21-30
Gigante	GIG	>80
Deformes	DEF	-
Rezagas	REZ	-

Vargas-Díaz, Wilches, Espitia, Franco y Mojica (2023) en su trabajo de evaluación de dos tipos de sistemas de riego (Xcell Wobbler y aspersor tradicional), reportó un aumento en la uniformidad y en la distribución del agua, presentando valores que se toman como aceptables, mientras que el tradicional indicó un menor desempeño. Las pérdidas por evaporación y viento son menores, lo que indica una mayor eficiencia de aplicación de agua al cultivo por parte del riego propuesto y esto lo corrobora el aumento de la eficiencia del riego propuesto comparado con el riego tradicional. Esto manejado con las recomendaciones de los fabricantes de cada uno de los aspersores evaluados en este trabajo, tanto en presiones como en instalación (Vargas-Díaz, Wilches, Espitia, Franco y Mojica, 2023).

El Cuadro 2 muestra los valores encontrados de los estadísticos: 1) promedio (Xm), 2) desviación estándar (DS) y 3) coeficiente de variación (CV), asociados a la humedad del suelo en dos estratos muestreados durante el ciclo del cultivo. Se observan valores más bajos de DS y CV en el aspersor Xcell Wobbler en el estrato 30-60 cm con respecto al aspersor Naan dan 5022, resultado de la mejor distribución de la humedad.

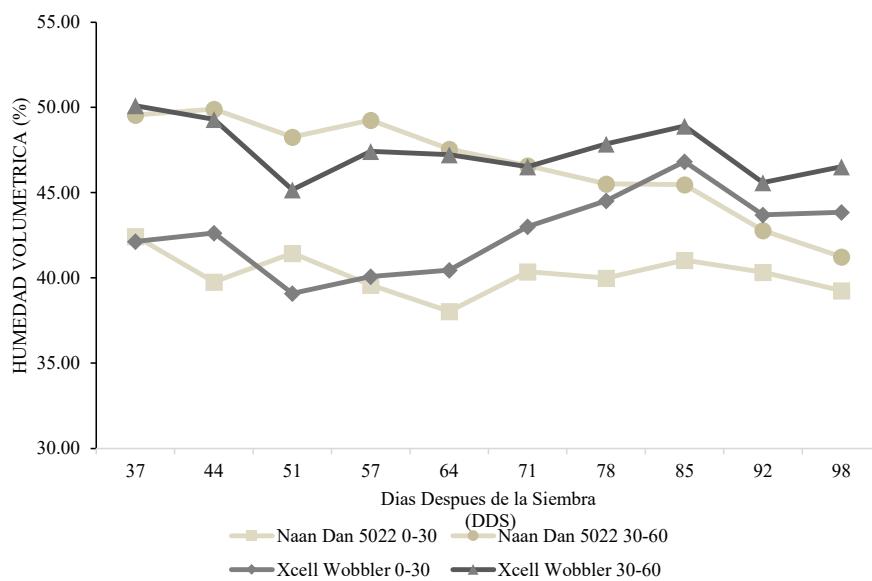


Figura 4. Humedad del suelo (estratos 0-30 y 30-60), en el área regada por los aspersores Naan Dan y Xcell Wobbler.
Figure 4. Soil moisture (strata 0-30 and 30-60), in the area irrigated by Naan Dan and Xcell Wobbler sprinklers.

Cuadro 2. Estadística del efecto de los aspersores Xcell Wobbler y Naan Dan 5022 en la humedad del suelo en dos estratos (0-30 y 30-60 cm) durante el ciclo de desarrollo del cultivo de papa OI 2021-2022, en el norte de Sinaloa, México.

Table. Statistics of Xcell Wobbler and Naan Dan 5022 sprinkler effect on soil moisture in two strata (0-30 and 30-60 cm) during the development cycle of the OI 2021-2022 potato crop, in northern Sinaloa, México.

Estadístico	Xcell Wobbler		Naan Dan 5022	
	(0-30)	(30-60)	(0-30)	(30-60)
Promedio (%)	42.6272	47.4622	40.2229	46.6108
Desviación Estándar (%)	2.3094	1.6025	1.2235	2.9074
Coeficiente de Variación (%)	5.4176	3.3763	3.0417	6.2376

Biomasa

La Figura 5 muestra el comportamiento de la biomasa durante el ciclo del cultivo, se observa un aumento constante hasta los 71 dds, esto relacionado probablemente a la movilización de los asimilados a los tubérculos (Rojas *et al.*, 2013). La diferencia de la producción de biomasa entre tratamientos dependió principalmente del peso seco de tubérculos, ya que estos representan entre 70 y 80% de la biomasa total de la planta. El tratamiento con el aspersor Xcell Wobbler obtuvo plantas de mayor biomasa a la cosecha y mayor producción y calidad de los tubérculos. A partir de la octava semana los valores fueron más constantes debido a que las plantas ya no presentaban un crecimiento acelerado y en algunos casos sin crecimiento, como se observa a los 71 dds. En la etapa de senescencia los valores de biomasa del muestreo siguiente disminuían. La figura indica una ganancia de biomasa que se acumula en hojas, tallos y raíces y que se moviliza hacia tubérculos. Lo anterior coincide con el trabajo realizado por Almeida *et al.* (2013), en el cual los valores máximos de Índice de concentración de clorofila (ICC) se alcanzaron en los primeros 20 dds y los valores menores a los 70 dds, debido a que las plantas iniciaban la fase de senescencia.

Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI)

El comportamiento del NDVI durante el ciclo de desarrollo del cultivo se muestra en la Figura 6, el cual es congruente con el comportamiento de la acumulación de Biomasa. Durante las primeras etapas de crecimiento cuando la superficie foliar verde es pequeña, los valores de NDVI fueron sensibles a los efectos del fondo del suelo, conforme aumentaron los valores de Biomasa, los valores se normalizaron. Los valores más altos del Naan Dan 5022 a los 58 y 72 dds estuvieron asociados al exceso de humedad por la variación en la uniformidad de aplicación en su área de mojado.

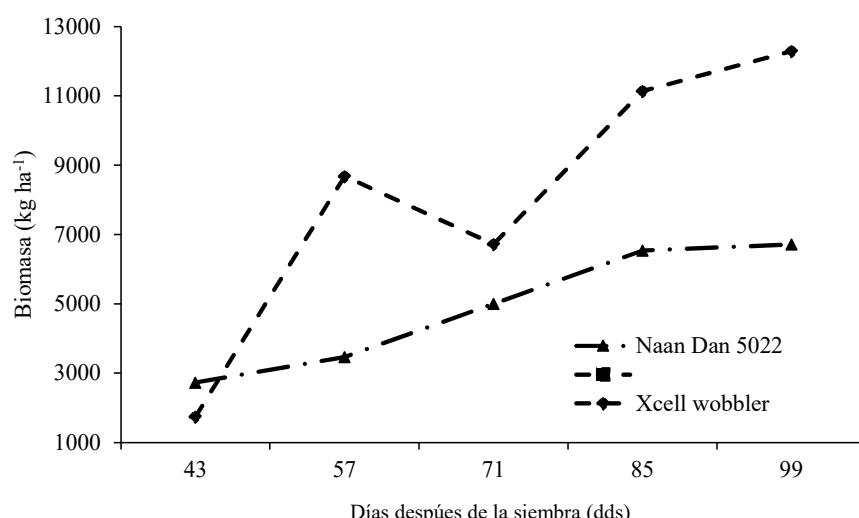


Figura 5. Producción de materia seca de papa bajo riego por aspersión fija con dos tipos de aspersores.

Figure. Dry matter production of potatoes under fixed irrigation with two types of sprinklers.

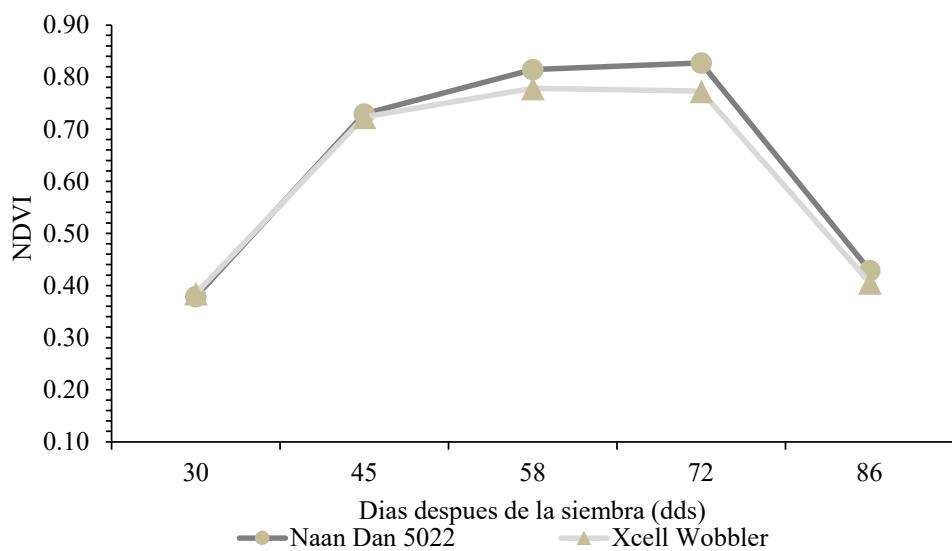


Figura 6. Comportamiento del Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI) en los dos tratamientos con la fecha de cada vuelo.

Table 6. Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) behavior in the two treatments with the date of each flight.

En el Cuadro 3 se presenta un resumen de los estadísticos: 1) Promedio, 2) Máximo, 3) Mínimo, 4) Desviación estándar y 5) Varianza, obtenidos durante el ciclo de la variable NDVI. Aunque los valores de los primeros cuatro fueron ligeramente mayores en Naan Dan 5022, se presentó una menor varianza en Xcell Wobbler.

La Figura 7 muestra la variabilidad espacial del NDVI en los dos tratamientos evaluados. se observan secciones con verde más intenso principalmente en el área de traslape de los dos aspersores.

La parte central de ambos tratamientos presento valores de verdor superior a los mismos, esto como consecuencia del traslape entre ambos aspersores que ocasionó contenidos de humedad elevados en comparación con las láminas de riego aplicadas. La humedad excesiva incremento el follaje de la planta lo que ocasiono como se observa en la figura anterior un índice de verdor más elevado.

Eficiencia de Aplicación (EA)

Se aplicó un riego de germinación por gravedad de 18 cm 15 días antes de la siembra con una eficiencia de aplicación de 61%. Los riegos de auxilio fueron 12 con láminas que fluctuaron de 0.76 a 5.24 cm para una lámina total de 40.47 cm (Cuadro 4), la eficiencia de aplicación promedio para los riegos de auxilio fue de 85%. La lámina total aplicada fue de 58.4 cm con una eficiencia de aplicación del 83.15%. El segundo y tercer riego sirvieron para uniformizar la humedad y emergencia del cultivo. El requerimiento del cultivo sin considerar el riego de

Cuadro 3. Resumen de cinco estadísticos calculados con datos de NDVI durante el ciclo de cultivo de papa, en el norte de Sinaloa, México. OI 2021-2022.

Table 3. Summary of five statistics calculated with Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) data during the potato growing season in northern Sinaloa, México. FW 2021-2022.

Estadístico	Xcell Wobbler	Naan Dan 5022
Promedio	0.6131	0.6357
Máximo	0.6995	0.7129
Mínimo	0.2613	0.2936
Desviación Estándar (DS)	0.0137	0.012
Varianza (VAR)	0.000181	0.000219

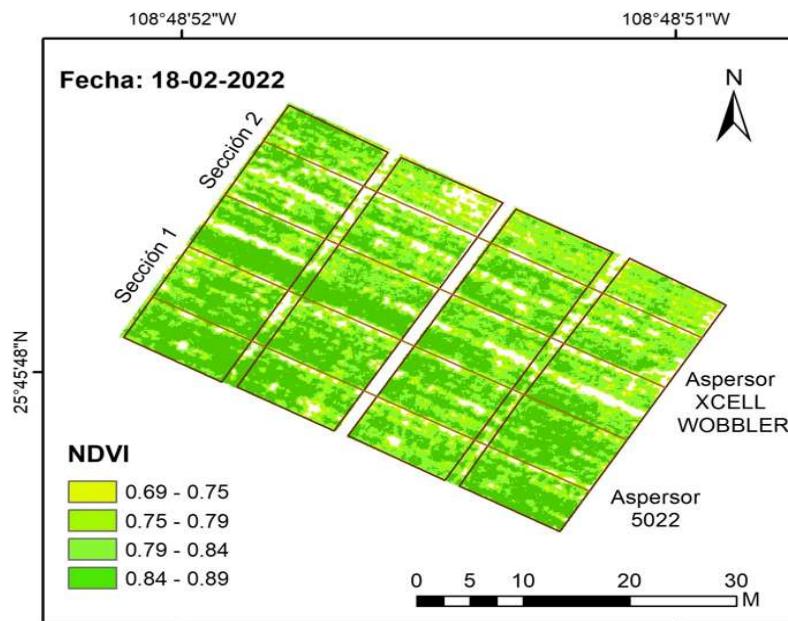


Figura 7. Comportamiento del Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI) en tratamientos de riego por aspersión en papa, utilizando drones.
Figure 7. Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) behavior in sprinkler irrigation treatments in potatoes, using drones.

Cuadro 4. Resumen de riegos aplicados, en lote experimental de papa.
Table 4. Summary of irrigation applied in an experimental potato plot.

Número de riego	Días al riego	Lámina neta	Lámina bruta	Eficiencia de aplicación	Grados-día desarrollo acumulados
		----- cm -----		%	° C
1*	- 15	10.87	18.00	60.38	0
2	7	0.57	0.76	75.00	134.8
3	37	3.91	5.24	74.61	598.7
4	44	2.31	2.65	87.16	711.12
5	51	2.26	2.60	86.92	803.9
6	57	2.36	2.72	86.76	884.7
7	64	3.15	3.62	87.01	976
8	71	2.91	3.35	86.86	1081.1
9	78	3.62	4.16	87.01	1182
10	85	3.84	4.41	87.07	1284.4
11	92	3.70	4.26	86.85	1380.5
12	98	3.31	3.81	86.87	1470.20
13	103	2.53	2.91	86.94	1552.9
Total	103	34.47, 45.34**	40.49, 58.49**	85.00, 83.03**	1552.9

* riego de germinación, ** valores que incluyen riego de germinación.
* Germination irrigation ** values that include germination irrigation.

germinación fue de 34.47 cm ($3447 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$), el ultimo riego se aplicó a los 103 dds (1552.9 GDDA). Según varios estudios realizados, se ha determinado el consumo de agua de un cultivo de papa; al respecto, la FAO en el año internacional de la papa en el 2008 declara que un cultivo de papa de 120 a 150 días requiere de 500 mm a 700 mm de agua. La misma FAO, en el 2012, declaró que los consumos de agua a campo abierto son de 350mm a 650 mm Al relacionar esto con el presente estudio encontramos que el consumo de agua en el sistema de riego por aspersión está dentro de los valores citados, muy cercano al límite inferior.

Eficiencia de Distribución (ED)

La Figura 8 muestra la eficiencia de distribución promedio para los 12 riegos aplicados, los valores más bajos los obtuvo el aspersor Naan Dan 5022 (34%) debido a que presento un problema en el mecanismo de giro del aspersor en los riegos 3 y 4 que bajo su eficiencia, sin embargo al omitir los errores en el funcionamiento, el promedio en eficiencia de distribución es del 81%, el modelo Xcell Wobbler obtuvo una eficiencia de distribución promedio total de 82%, valor que se encuentra dentro del rango sugerido por Montero et al. (2005) de 80% a 90% para ser considerado como un riego uniforme.

Rendimiento y Calidad

El tratamiento con el aspersor Xcell Wobbler obtuvo los valores más altos de rendimiento total con 42617 kg ha^{-1} , mientras que el área del aspersor Naan Dan 5022 fue más bajo con un rendimiento de 38617 kg ha^{-1} . El análisis estadístico de la variable de rendimiento indica que el tratamiento con el aspersor Xcell Wobbler (A2) registro el mayor rendimiento, sin embargo, el análisis de varianza no detecto diferencias estadísticas significativas para las medias de rendimiento entre los tratamientos ($a=0.10$) como se muestra en el Cuadro 5. Físicamente en el análisis (cosecha) de resultados se presentó una diferencia de 4000 kg ha^{-1} entre los tratamientos A1 y A2.

La Figura 9 Representa la distribución de la calidad de tubérculos, el tratamiento Xcell Wobbler presento más kg ha^{-1} en calidades primeras y segundas, mientras que el tratamiento con el aspersor Naan Dan 5022 presento mayor rendimiento en las calidades segundas y tercera.

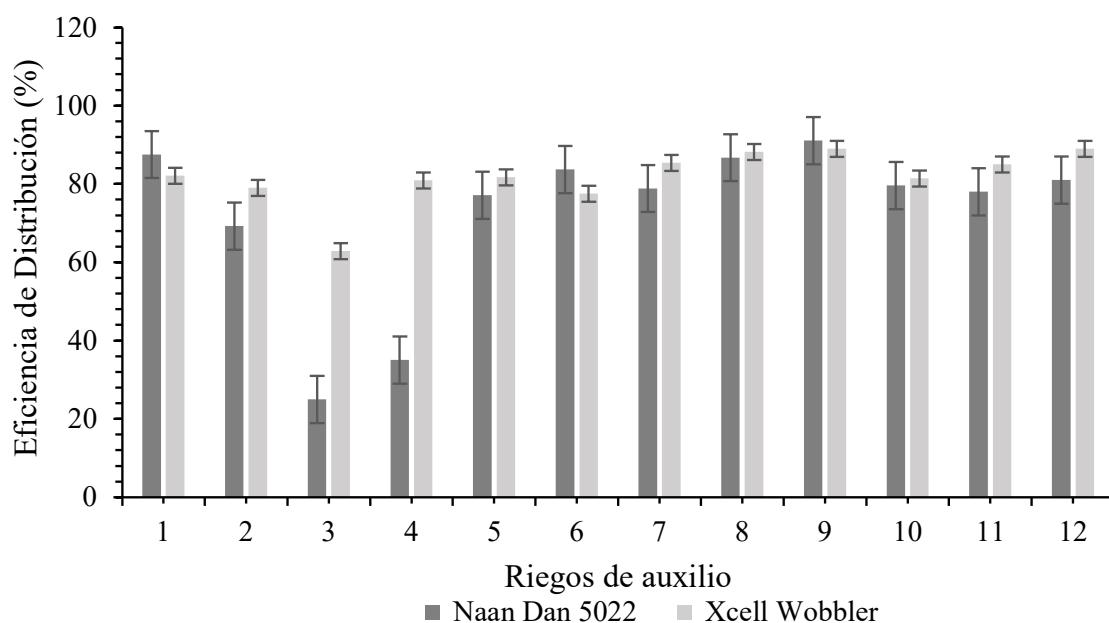


Figura 8 Eficiencia de distribución en el tratamiento Naan Dan 5022 y en el tratamiento Xcell Wobbler durante los riegos de auxilio.

Figure 8. Distribution efficiency in the Naan Dan 5022 treatment and Xcell Wobbler treatment during auxiliary irrigations.

Cuadro 5. Análisis de la varianza como bloques completos al azar de la variable rendimiento.
Table 5. Analysis of variance as randomized complete block design of the performance variable.

Tratamientos	Y	C1	C2	C3	C4	DEF	REZ
- - - - - kg ha ⁻¹ - - - - -							
A1	38617.19	9804.69	11054.69	11679.69	2914.06	78.13	3085.95
A2	42617.19	11406.25	14218.75	9882.81	3320.31	742.19	3046.88
DMS	16022.33	5203.13	9229.79	5793.1	1370.45	1878.05	2818.72
Tukey ($P < 0.10$)	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns

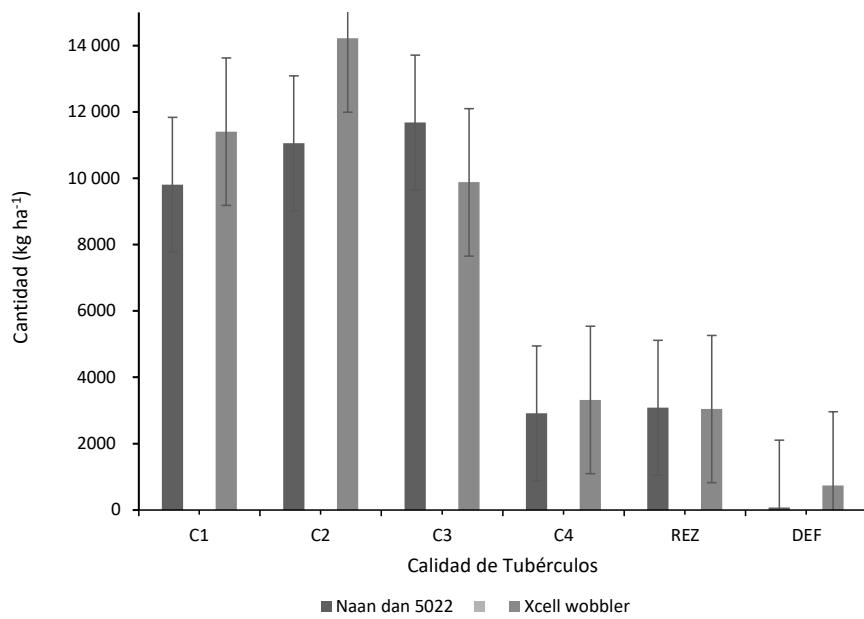


Figura 9. Efecto de los aspersores Naan dan 5022 y Xcell Wobbler en la calidad de tubérculos en papa, en el norte Sinaloa, ciclo OI 2021-2022.

Figure 9. Effect of Naan dan 5022 and Xcell Wobbler sprinklers on potato tuber quality, in northern Sinaloa, OI 2021-2022 cycle.

CONCLUSIONES

De las capacidades operativas de los dos tipos de aspersores, ambos presentan un coeficiente de uniformidad aceptable según los requerimientos del sistema, sin considerar las fallas presentadas en el aspersor Naan Dan 5022 que afectaron la distribución de láminas de riego en ambos estratos. Los valores de NDVI obtenidos llegan a mostrar mayor verdor en el aspersor Naan Dan 5022 debido a que la concentración de humedad no llegó a afectar de manera significativa la parte aérea de la planta o follaje, sin embargo, si se manifestó en el rendimiento y calidad del tubérculo debido a que, en etapas de tuberización la planta demanda uniformidad y cantidad de agua específicas por lo que las fallas registradas en el aspersor afectaron los resultados específicamente en esta variable. Se recomienda utilizar el aspersor Xcell Wobbler debido a su fiabilidad en funcionamiento, opera a menores presiones y en general y se adaptó a las demandas específicas de funcionamiento de la zona de estudio.

DECLARACIÓN DE ÉTICA

No aplicable.

CONSENTIMIENTO PARA PUBLICACIÓN

No aplicable.

DISPONIBILIDAD DE DATOS

No aplicable.

CONFLICTO DE INTERESES

No aplicable.

FINANCIACIÓN

Para la realización del presente trabajo se recibió apoyo mediante beca académica del CONHACYT.

CONTRIBUCIÓN DE LOS AUTORES

Conceptualización: metodología, software, validación, análisis formal, investigación, recursos, curación de datos, J.A.B.F., B.E.L.V., V.R.P., J.R.R.I., Q.A.A.A. y E.S.I. Escritura: preparación del borrador original, J.A.B.F., B.E.L.V., V.R.P., J.R.R.I., Q.A.A.A. y E.S.I. Escritura: revisión y edición, visualización, supervisión, J.A.B.F., B.E.L.V., V.R.P., J.R.R.I., Q.A.A.A. y E.S.I. Administración del proyecto, J.A.B.F., B.E.L.V., V.R.P., J.R.R.I., Q.A.A.A. y E.S.I. Adquisición de fondos, J.A.B.F., B.E.L.V., V.R.P., J.R.R.I., Q.A.A.A. y E.S.I.

AGRADECIMIENTOS

Se agradece el apoyo recibido del CONAHCYT a través de beca académica para la realización de estudios de maestría. Se agradece también al Posgrado del Colegio en Ciencias Agropecuarias por brindarme los conocimientos necesarios para concluir el grado de maestro en ciencias agropecuarias.

Al Instituto Nacional de Investigación Forestales, Agrícolas y Pecuarias (INIFAP) por haberme permitido realizar el presente trabajo dentro de sus instalaciones.

LITERATURA CITADA

- Almeida, J., Rodriguez, M., Garcia, E., Madriz, P. M., Figueroa, R., & Mantilla, J. E. (2013). Biomass comparison of two potato (*Solanum tuberosum* L.) varieties of different origin, sowed in Chirguá, Carabobo state, Venezuela. *Revista Científica UDO Agrícola*, 13(1), 39-49.
- Agisoft LLC. (2024). *Agisoft PhotoScan User's Manual*. San Petersburgo, Rusia: Agisoft.
- Berrío-Meneses, V., Alzate-Velásquez, D. F., Ramón-Valencia, J. A., & Ramón-Valencia, J. L. (2015). Sistema de optimización de las técnicas de planificación en agricultura de precisión por medio de drones. *Revista Espacios*, 39(45), 1-16.
- Camire, M. (2016). Potatoes and Human Health. In: J. Singh, & L. Kaur (Eds.). *Advances in Potato Chemistry and Technology* (pp. 685-704). Amsterdam, The Netherlands: Elsevier Inc.
- Cherlinka, V. (2020). Análisis De Suelo: Muestreo Y Lectura Del Resultado. Consultado el 20 de septiembre, 2024, desde <https://eos.com/es/blog/analisis-de-suelo/>
- CONAGUA (Comisión Nacional del Agua). (2018). Estadísticas agrícolas de los distritos de riego. Consultada el 18 de febrero, 2023, desde <https://www.gob.mx/conagua/documentos/estadisticas-agricolas-de-los-distritos-de-rieゴ>
- FAO (Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura). (2024). *Día internacional de la papa 2024*. Roma, Italy: FAO
- FAOSTAT (Food and Agriculture Organization Corporate Statistical Database). (2017). *Cantidades de producción de patatas y patatas por país*. Consultada el 28 de abril, 2024, desde <https://www.fao.org/faostat/es/#data/QC/visualize>
- Flores-Gallardo, H., Sifuentes, E., & Ojeda, W. (2007). Pronóstico del riego en el cultivo de papa (*Solanum tuberosum* L.) bajo un modelo basado en el concepto grados día (°D). *Multi-CIENCIA*, 2(2), 24-30.
- Flores-Gallardo, H., Ojeda-Bustamante, W., Flores-Magdaleno, H., Mejía-Sáenz, E., & Sifuentes-Ibarra, E. (2011). Grados día y la programación integral del riego en el cultivo de papa. *Terra Latinoamericana*, 30(1), 59-67.
- Gilletto, C., Ceroli, P., Esperón, L., Silva, S., Rodriguez, S., Cassino, N., ... & Lagos, G. (2023). Fertilización con magnesio: efecto sobre la calidad de tubérculos de papa. *Investigación Joven*, 10(2), 203-203.
- Manickam, J., Pillai, S. U., & Manickam, R. (2018). Water requirements for horticultural crops under micro irrigation. En N. K. Gontia, B. L. Gadhave, & M. L. Patel (Eds.). *Engineering interventions in sustainable trickle irrigation* (pp. 3-34). Oakville, ON, Canada: Apple Academic Press. <https://doi.org/10.1201/9781315184241-1>
- QGIS.org (2024). *QGIS Geographic Information System. User's Guide. Version 3.22*. Grüt, Switzerland: QGIS Association.

- Rendón, L., & Fuentes, C. (2007). Eficiencias de riego. En B. de León & B. David (Eds.), *Manual para diseño de zonas de riego pequeñas* (pp. 45-51). Jiutepec, Morelos, México: Instituto Mexicano de Tecnología del Agua.
- Rojas, J. A., Colmenares, M. R., Hernández, E. G., Madriz, P., Figueroa, R., & Mantilla, J. E. (2013). Comparación de la biomasa de dos cultivares de papa (*Solanum tuberosum* L.) de distintos orígenes, plantados en Chirgua, estado Carabobo, Venezuela. *Revista Científica UDO Agrícola*, 13(1), 39-49.
- SAS Institute. (2019). *Statistical Analysis System SAS/STAT User's Guide. version 10*. Cary, NC, USA: SAS Institute Inc.
- Sifuentes-Ibarra, E., Ojeda-Bustamante, W., Macías-Cervantes, J., Merino-Leyva, R. I., Preciado-Rangel, P., & Ruelas-Islas, J. D. R. (2023a). 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>
- Sifuentes, E., Cabrera, F., Macías, J., Marcial, M., & Jiménez, S. (2023b). *Programación integral y gestión del riego a través de Internet: Manual del usuario (Versión 3.0)*. Los Mochis, Sinaloa, México: INIFAP-CIRNO.
- Sifuentes, E., & Macías, J. (2022). ¿Cómo medir la eficiencia de aplicación de nuestros riegos? Los Mochis, Sinaloa, México: INIFAP.
- Steduto, P. (2012). Respuesta del rendimiento de los cultivos al agua. Rome, Italy: Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura.
- Vargas-Díaz, R., Wilches-Ortiz, W., Espitia-Malagón, E., Franco-Florez, C., & Mojica-Ramos, S. (2023). Evaluación del uso eficiente del agua y producción del cultivo de papa bajo dos técnicas de riego. *Revista Científica Dékamu Agropec*, 4(2), 89-93.