

PLANEACIÓN DE LA SUPERFICIE DE SIEMBRA, CASO DE ESTUDIO: RANCHO SANTA LUCIA, FRESNILLO, MÉXICO

David Vargas Cano²; Miguel Servin Palestina^{1*}; José Israel Casas-Flores¹; Jesús Antonio García²; Guillermo Medina-García¹

¹Campo experimental Zacatecas INIFAP, Ingeniería de riego, kilómetro 24.5, Zacatecas - Fresnillo, 98500 Zacatecas, México.

²Universidad Autónoma Chapingo. Carretera México-Texcoco km 38.5, CP 56230, Chapingo, Estado de México, México.

miguel.servin@hotmail.com (*Autor de correspondencia)

Resumen

En las regiones semiáridas, como el estado de Zacatecas, la escasez de agua y la sobreexplotación de acuíferos son problemas críticos que afectan la sostenibilidad de la producción agrícola. En este contexto, es esencial optimizar el uso del recurso hídrico en cultivos como el maíz, que requiere una adecuada gestión del riego para maximizar su rendimiento. El objetivo de este estudio fue determinar la superficie de siembra de maíz para el ciclo primavera-verano de 2024 en el Rancho Santa Lucía, asumiendo una precipitación nula para equilibrar la recarga del acuífero mediante el apagado de pozos durante la temporada de lluvias. Se utilizó un modelo de series de Fourier para estimar la evapotranspiración de referencia (ET_o) con un RMSE de 0.125 mm día⁻¹ y un R² de 0.91, y un modelo polinomial de tercer orden para calcular la evapotranspiración del cultivo (ET_c) con un RMSE de 0.028 mm día⁻¹ y un R² de 0.99. La lámina total de riego estimada fue de 680 mm, y se calculó una superficie de siembra ajustada de 43.49 ha, considerando una eficiencia de riego por goteo del 90% y un caudal disponible de 36 lps. Los resultados indicaron un incremento del 38% en el rendimiento del maíz, alcanzando 18 t ha⁻¹, en comparación con el ciclo anterior. Este estudio destaca la importancia de la gestión eficiente del agua en zonas semiáridas, ofreciendo beneficios para la sostenibilidad hídrica y la producción agrícola.

Palabras claves: Series de Fourier, evapotranspiración de cultivo, capacidad de siembra, sostenibilidad hídrica

Introducción

La planificación de la superficie de siembra en unidades de producción agrícola de riego es esencial para optimizar el uso de los recursos hídricos, maximizar la producción y asegurar la sostenibilidad de los sistemas agrícolas. Al seleccionar los cultivos, definir las áreas de siembra y determinar las cantidades, es necesario considerar factores que interactúan de manera compleja. La disponibilidad de agua es uno de los principales limitantes, ya que influye en qué cultivos son viables y en qué extensión (Medrano et al., 2007). Cada cultivo tiene requerimientos hídricos específicos, por lo que tanto la cantidad como la calidad del agua disponible son cruciales para el éxito de la producción. Además, el tipo de suelo, con sus propiedades físicas y químicas, afecta la retención de agua, la disponibilidad de nutrientes y el desarrollo radicular (Bauke et al., 2022), mientras que las condiciones climáticas (temperatura, precipitación y radiación solar) inciden directamente en el crecimiento de los cultivos y en la presencia de plagas y enfermedades.

Otro factor determinante en la elección de los cultivos es el mercado, ya que la demanda, los precios y las tendencias influyen en la rentabilidad (Adenso-Díaz et al., 2021). La disponibilidad de tecnologías, como sistemas de riego eficientes, maquinaria agrícola y fertilizantes, también mejora la productividad y la calidad de los cultivos. Una planificación adecuada no solo permite optimizar el uso del agua al asignarlo a los cultivos más adecuados y minimizar las pérdidas, sino que también incrementa los rendimientos al elegir cultivos adaptados a las condiciones locales y al mercado (Dorado et al., 2018). Además, la planificación eficiente reduce los costos de producción al optimizar el uso de insumos como fertilizantes y pesticidas, y fomenta la sostenibilidad agrícola al considerar el impacto ambiental y la conservación de los recursos naturales. Este proceso implica un análisis detallado de los recursos disponibles, incluyendo agua, suelo, mano de obra y otros insumos, así como un estudio de mercado para identificar oportunidades y desafíos.

En este contexto, la selección de cultivos y el diseño de rotaciones son fundamentales para mantener la fertilidad del suelo, controlar plagas y mitigar la erosión (Nischith et al., 2024). La estimación de los requerimientos hídricos de cada cultivo, junto con la disponibilidad de agua para riego, definen la superficie de siembra. El objetivo del presente estudio es determinar la superficie de siembra de maíz para el ciclo primavera-verano de 2024 en el Rancho Santa Lucía, ubicado en una región semiárida del estado de Zacatecas. Para ello, se asume una precipitación nula con el fin de equilibrar la recarga del acuífero mediante el apagado de pozos durante la temporada de lluvias.

Materiales y métodos

Descripción del área de estudio

Este trabajo se llevó a cabo en el Rancho Santa Lucía, ubicado en la comunidad de El Pardillo 3, Fresnillo, Zacatecas. La unidad de producción agrícola de riego (UPAR) tiene una superficie total de $S_T = 180$ ha y un aprovechamiento con un gasto de $Q_{PZO} = 56$ lps, localizándose en las coordenadas 23.17983589, -102.71653304. El suelo predominante

es de textura franco arcilloso, con valores promedio de 27.3% de capacidad de campo, 15% de punto de marchitez permanente, 1.3 g cm⁻¹ de densidad aparente y 1.4% de materia orgánica. En cuanto a la fertilidad del suelo, presenta, 31.2 ppm de nitrógeno inorgánico, 52.4 ppm de fósforo Olsen, 114.9 ppm de potasio, 143.8 ppm de sodio, 112.5 ppm de calcio y 51 ppm de magnesio, con un pH de 8.06 y una conductividad eléctrica (CE) de 1.3 dS/m. Los principales cultivos que se establecen en la UPAR son: ajo, maíz, frijol. En el ciclo 2024 se dispone de un gasto (Q_d) de 36 lps para el cultivo de maíz.

Datos climáticos

Para este trabajo se utilizó una base de datos de Evapotranspiración de referencia diaria (ET_o) por el método de Penman-Monteith (Monteith, 1981), promedio de 2005 al 2020 de la estación agroclimática automatizada El Pardillo 3 (Medina et al, 2007) ubicada dentro del rancho a una longitud: 102° 43' 01.0", latitud: 23° 10' 49.0" y altitud: 2077 msnm.

Modelos Series Fourier

Las series de Fourier permiten descomponer una función periódica, como la evapotranspiración anual, en una suma infinita de funciones sinusoidales y cosenoidales más simples. Cada una de estas funciones representa una onda con una frecuencia y amplitud específicas (Singh et al, 2017). Al sumar todas estas ondas, se reconstruye la forma original de la función, la ET_o tiene un ciclo periódico que se repite cada año. Para suavizar la curva se promedió la ET_o en decenas (36 decenas por año). Posteriormente la obtención de los parámetros del modelo se resolvió como un problema de optimización.

Para hacer la representación matemática de la evapotranspiración de referencia, se utilizó la ecuación 1, serie de Fourier con dos armónicas.

$$\widehat{ET}_o = a_0 + a_1c_1 + b_1s_1 + a_2c_2 + b_2s_2 \quad (1)$$

donde \widehat{ET}_o es la evapotranspiración de referencia estimada, promedio decenal en mm día⁻¹, a y b son coeficientes obtenidos mediante regresión, c y s son coseno y seno de la armónica, que se obtienen con las ecuaciones 2 y 3.

$$C_k = \cos \left[\frac{2k * \pi}{365} J \right] \quad (2)$$

$$S_k = \sin \left[\frac{2k * \pi}{365} J \right] \quad (3)$$

donde: k es el número de armónicas $k=[1 \ 2]$ para c o s en la ecuación, y J es el día juliano correspondiente en el año.

Material vegetativo

El cultivo que establecer a el ciclo primavera verano del 2024 es el híbrido Antílope de ASGROW. Las características agronómicas son: altura de mazorca de 130 a 150, altura de planta de 265 a 285, ciclo intermedio de 170 a 185 días, grano color blanco, sembrado del 22 de mayo al 30 mayo del 2024 con una sembradora de precisión a una densidad de 95 mil plantas por ha, establecido en camas de 1 metro a doble hilera de 30 cm entre

hileras y 21.05 cm entre plantas con riego por goteo con cintilla en el centro con un gasto de emisor de 1 lph y 20 cm entre emisores.

Evapotranspiración del cultivo

La evapotranspiración del cultivo ($ET_c(t)$) se calcula por medio de la ecuación 4.

$$ET_c(t) = Kc_i \cdot \widehat{ET}o_i \quad (4)$$

donde Kc es el coeficiente del cultivo, y $\widehat{ET}o$ es la evapotranspiración referencia estimada, i es el i -ésimo día, $i = 0$ al inicio de la siembra.

El modelo de Kc que se utilizó para el cultivo se describe mediante la ecuación 5.

$$Kc_i = -3.4596x_i^3 + 5.0424x_i^2 - 0.7508x_i + 0.3578 \quad (5)$$

donde x está en función del porcentaje de desarrollo del cultivo obtenido entre i -ésimo día y el ciclo de cultivo (fecha cosecha = 180 días).

Superficie de siembra

La superficie de siembra (Ecuación 6), se determina a partir de la relación entre el volumen de agua requerido por los cultivos para su desarrollo óptimo (VR) y el volumen de agua disponible en la fuente de riego (VD), considerando la eficiencia del sistema de riego.

$$SS = \frac{VD}{VR} \quad (6)$$

donde SS es la superficie de siembra en ha, VD es el volumen disponible en m^3 por día y VR es el volumen requerido en m^3 por ha.

El Volumen Requerido (VR) se obtiene multiplicando una hectárea ($10,000 m^2$) por el valor máximo de evapotranspiración de cultivo ($ET_{c_{max}}$). Este último se calcula derivando la función de evapotranspiración de cultivo con respecto al tiempo, y encontrando el punto donde dicha derivada se anula, lo que corresponde al momento de máxima evapotranspiración, como se expresa en la ecuación 7.

$$ET_{c_{max}} = \frac{\partial ET_c(t)}{\partial t} = \widehat{ET}o_i = 0 \quad (7)$$

El Volumen Disponible (VD) se obtiene multiplicando el caudal disponible del sistema de riego (Q_d), expresado en litros por segundo, por 3600 segundos/hora para convertirlo a litros por hora. Este valor se multiplica a su vez por el tiempo efectivo de riego diario (T_{ER}), expresado en horas, que en este caso se considera de 22 horas. Las 2 horas restantes se destinan a tareas de mantenimiento y reparación del sistema. VD se expresa en la ecuación 8.

$$VD = (Q_d \cdot 3600) \cdot T_{ER} \quad (8)$$

La superficie de siembra ajustada (Ecuación 9), se determina considerando la relación VD y VR, ajustada por la eficiencia del sistema de riego (Eff), es decir, la proporción de agua aplicada que realmente llega a las raíces de las plantas.

$$SS_{aj} = \frac{SS}{Eff} \quad (9)$$

La eficiencia de riego es una medida adimensional que cuantifica la proporción del agua aplicada a un cultivo que es efectivamente utilizada por las plantas y almacenada en la zona radicular. Se expresa como un porcentaje y refleja la relación entre el volumen de agua suministrada y el volumen de agua útil depositado en la zona radicular (cuadro1).

Cuadro 1. Eficiencias de Sistemas de Riego

Sistema de Riego	Eficiencia (%)	Observaciones
Goteo	90-95	Alta eficiencia, ideal para cultivos de alto valor.
Microaspersión	80-85	Buena eficiencia, adaptable a diferentes topografías.
Aspersión	70-80	Eficiencia variable, depende de la boquilla y la presión.
Inundación	60-70	Baja eficiencia, alta pérdida por evaporación y percolación.
Surcos	65-75	Eficiencia variable, depende de la pendiente y la textura del suelo.

Resultados y discusión

Modelo para estimar ETo

Se utilizó un modelo basado en dos armónicas para estimar la ETo promedio diario a lo largo de un periodo de 15 años. Este modelo predice que la ETo promedio en el área de estudio es de 4.95 mm día⁻¹, los coeficientes C₁ y S₁ corresponden a la primera armónica (coseno y seno respectivamente), capturando la variación estacional principal de la ETo. Por otro lado, los coeficientes C₂ y S₂ pertenecen a la segunda armónica, que modela variaciones estacionales más sutiles o fluctuaciones diarias de menor magnitud. Los valores de RMSE y R² fueron 0.125 mm día⁻¹ y 0.91 respectivamente, lo que sugiere que el modelo de series de Fourier es adecuado para estimar la ETo en el Rancho Santa Lucia. El modelo se expresa en la ecuación 10.

$$\widehat{ETo}_i = 4.9500 - 1.2282c_1 + 0.8445s_1 - 0.3386c_2 - 0.1885s_2 \quad (10)$$

Los coeficientes C₁, S₁, C₂ y S₂ se estiman con la ecuación 2 y 3 en función del día juliano (j) y con k=1 y 2.

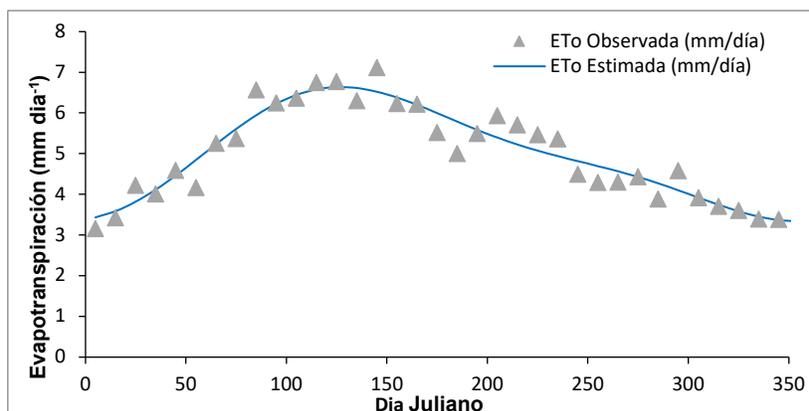


Figura 1. Evapotranspiración de referencia de la estación El Pardillo 3 observada y estimada con series de Fourier con dos armónicas

Estimación de la ETC

Para la estimación de ETC, se consideró el día juliano 143, correspondiente al 22 de mayo del 2024, fecha de siembra. El ciclo del cultivo se estimó en 180 días hasta alcanzar la madurez fisiológica, lo que ocurre en el día juliano 323, el 18 de noviembre del 2024. Se extrajeron los valores de ETo entre los días 143 y 323 y se multiplicaron por el coeficiente del cultivo (K_c , de acuerdo con la ecuación 5). La suma de la demanda de agua para todo el ciclo del cultivo resultó en una lámina total de riego de 680 mm. A partir de los resultados, se ajustó un modelo polinomial de tercer orden, utilizando como variable dependiente la ETC y como variable independiente los días después de la siembra (DDS). El modelo fue resuelto como un problema de optimización para encontrar los parámetros que minimizaran el error. Se obtuvo un RMSE = 0.028 mm/día y un $R^2 = 0.99$, lo que indica un excelente ajuste del modelo. La ecuación resultante para la estimación de la Etc se expresa en la ecuación 11.

$$ETc = -3.117e - 06 DDS^3 + + 0.000745DDS^2 - 0.02242 DDS + 0.3578 \quad (11)$$

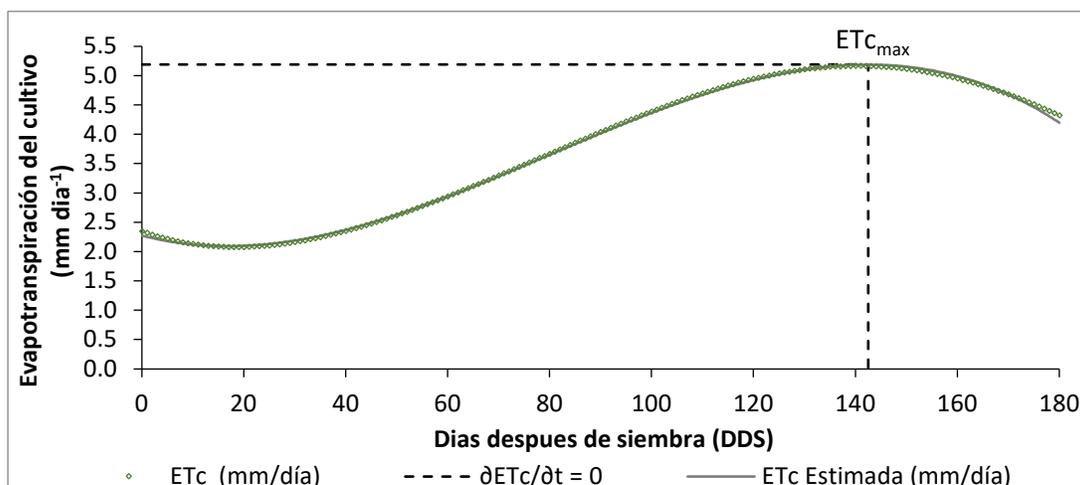


Figura 2. Evapotranspiración del cultivo de maíz (puntos), derivada = 0 del modelo de ETc (línea punteada) de Rancho Santa Lucia

Posteriormente se obtuvo la derivada del modelo de ETc con respecto a los días después de la siembra y se igualó a cero (ecuación 7). Este procedimiento permitió identificar el punto en el que la tasa de cambio de la ETc es máxima, concluyendo que el valor de DDS = 142.5. Al sustituir en la ecuación 11, se obtuvo que el ETC_{max} es de 5.9 mm día^{-1} .

Capacidad de siembra

El Volumen Requerido de agua (VR) para el riego se calcula multiplicando una hectárea ($10,000 \text{ m}^2$) por el valor máximo de evapotranspiración de cultivo (ETC_{max}), expresado en m por día.

$$VR = 10,000 (\text{m}^2) \cdot ETC_{max} (\text{m día}^{-1}) = 10,000 \cdot 0.0059 = 59 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1} \text{ día}^{-1} \quad (12)$$

El Volumen Disponible (VD) se obtiene multiplicando el caudal de agua disponible en el sistema de riego, que es de 36 lps, es decir, $0.036 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$. Este valor se multiplica por el tiempo efectivo de riego diario de 22.

$$VD = (0.036 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1} \cdot 3600 \text{ s h}^{-1}) \cdot 22 \text{ h día}^{-1} = 2851.2 \text{ m}^3 \text{ día}^{-1} \quad (13)$$

La superficie de siembra (SS) y superficie de siembra ajustada (SS_{aj}) fue calculada a partir de la relación entre VD y VR, considerando una sistema de riego por goteo con una eficiencia $Eff = 0.9$ (cuadro 1).

$$SS = \frac{2851.2 \text{ m}^3 \text{ día}^{-1}}{59 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1} \text{ día}^{-1}} = 48.33 \text{ ha} \quad (14)$$

$$SS_{aj} = \frac{48.33 \text{ ha}}{0.9} = 43.49 \text{ ha} \quad (15)$$

Se determinó que el rendimiento del pozo (R) es de **0.74** litros por hectárea para una eficiencia del 100%, aunque en la práctica no es alcanzable. Con riego por goteo, el rendimiento fue de 0.83 litros por hectárea.

Cuadro 2. Superficie de siembra por sistema de riego y rendimiento del pozo

Sistema de riego	Eff (%)	SS (ha)	R (l/ha)
Goteo	90	43.49	0.83
Aspersión	80	38.66	0.93
Multicompuestas	65	31.41	1.15

Con base en los resultados del presente estudio, se sembraron un total de 43.2 hectáreas de maíz Antílope con riego por goteo en el Rancho Santa Lucia durante el ciclo primavera-verano de 2024. Los lotes sembrados se muestran en figura 3.



Figura 3. Lotes sembrados de maíz antílope en el Rancho Santa Lucia en el ciclo primavera-verano de 2024

Los resultados preliminares indican que se espera obtener un rendimiento promedio de 18 t ha^{-1} , lo que representa un aumento del 38% en comparación con el ciclo primavera-verano de 2023, cuando se sembraron 53 ha con caudal disponible de 32 lps. Hasta la fecha, se ha aplicado un lamina de riego de 312 mm debido a las precipitaciones efectivas del ciclo que totalizaron 280 mm, lo que permitió suspender temporalmente el uso de los pozos.

Conclusiones

El estudio ofrece un enfoque integral para estimar los requerimientos de agua de los cultivos y optimizar la gestión del riego para el cultivo de maíz. Los resultados demuestran el potencial para mejorar la eficiencia del uso del agua y el rendimiento de los cultivos mediante la toma de decisiones basada en datos. No obstante, se recomienda realizar

investigaciones adicionales para validar estos hallazgos en diferentes tipos de suelos y condiciones climáticas, y para evaluar otros factores que podrían influir en la demanda de agua de los cultivos, tales como la rotación de cultivos, la variabilidad climática a largo plazo y la dinámica del suelo. Asimismo, será necesario analizar la optimización del riego cuando se consideren patrones de siembra con múltiples cultivos, con el fin de maximizar el uso eficiente del agua a nivel regional.

Referencias bibliográficas

- Adenso-Díaz, B., & Villa, G. (2021). Crop planning in synchronized crop-demand scenarios: A biobjective optimization formulation. *Horticulturae*, 7(10), 347. <https://doi.org/10.3390/horticulturae7100347>
- Bauke, S. L., Amelung, W., Bol, R., Brandt, L., Brüggemann, N., Kandeler, E., ... & Vereecken, H. (2022). Soil water status shapes nutrient cycling in agroecosystems from micrometer to landscape scales. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 185(6), 773-792.
- Dorado, H., Delerce, S., Jimenez, D., & Cobos, C. (2018). Finding optimal farming practices to increase crop yield through global-best harmony search and predictive models, a data-driven approach. In *Advances in Computational Intelligence: 17th Mexican International Conference on Artificial Intelligence, MICAI 2018, Proceedings, Part II 17* (pp. 15-29).
- Medina G. G.; Báez G. A. D., y Ramos G. J. L. 2007. Red de monitoreo agroclimático del estado de Zacatecas. Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias, Centro de Investigación Regional Norte Centro, Campo Experimental Zacatecas, México. (Desplegable informativa No. 15).
- Medrano, H., Bota, J., Cifre, J., Flexas, J., Ribas-Carbó, M., & Gulías, J. (2007). Eficiencia en el uso del agua por las plantas. *Investigaciones geográficas*, (43), 63-84.
- Monteith, J. L. (1981). Evaporation and surface temperature. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 107(451), 1-27.
- Nischith, B., & Kavitha, R. (2024). The impact of soil quality on plant growth and crop yields. *International Research Journal of Modernization in Engineering Technology and Science*, 6(03), 1602-1616
- Singh, P., Joshi, S. D., Patney, R. K., & Saha, K. (2017). The Fourier decomposition method for nonlinear and non-stationary time series analysis. *Proceedings of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 473(2199), 20160871.