



AJUSTE DE LOS REQUERIMIENTOS HÍDRICOS DE DOS GENOTIPOS DE MAÍZ, APOYADO CON DRONES

Jaasiel Martínez Santiago^{1*}, Ernesto Sifuentes Ibarra², Jaime Macías Cervantes², Mariana de Jesús Marcial Pablo³, José Simón Nieblas González¹, Adolfo Ignacio Ruiz Muñoz⁴

¹Facultad de Agricultura Valle del Fuerte. Universidad Autónoma de Sinaloa. Juan José Ríos, C.P. 81386, Sinaloa, México.

jaasiel_99@hotmail.com – 6871962568 (*Autor de correspondencia).

²Campo Experimental Valle del Fuerte-INIFAP. Carretera México-Nogales Km. 1609, Juan José Ríos, C.P. 81110, Sinaloa, México.

³Centro Nacional de Investigación Disciplinaria en Relación Agua-Suelo-Planta-Atmósfera (CENID-RASPA)-INIFAP, Km. 6.5 Margen Derecha del Canal Sacramento, Gómez Palacio, C.P. 35079, Durango, México.

⁴Bayer de México S.A. de C.V.

Resumen

La alta competencia por el agua y la baja disponibilidad de este recurso es cada vez más frecuente en las zonas de riego en México, lo que hacen necesaria una programación eficiente de los requerimientos hídricos de los cultivos. El maíz es el de mayor superficie cosechada y consumo de agua en el norte de Sinaloa y con la aparición de nuevos genotipos en las regiones de riego, requiere un ajuste de sus requerimientos hídricos para una calendarización efectiva, para esto, se necesita contar con herramientas precisas, rápidas, prácticas y de bajo costo en las zonas de riego, como los sensores remotos. En este trabajo se realizó un ajuste de los requerimientos hídricos del maíz en dos híbridos: H1 de porte normal y H2 de porte bajo, usando coeficientes de cultivo (Kc) en función de NDVI y CV, determinados con imágenes digitales capturadas con dron. Los Kc obtenidos sirvieron para ajustar los Kc de un modelo integral para la programación del riego en tiempo real basado en grados-día desarrollo (GDD) en un tratamiento de 5 auxilios (5A), el cual es un calendario común en la zona de estudio y representa un escenario sin déficit hídrico. Los requerimientos de riego (RR) estimados para H1 fueron de 465.81 mm y 459.82 para H2 mm. Se observó también diferencia en el comportamiento de la curva de Kc durante el ciclo lo cual justifica el ajuste. Aplicando solo los RR obtenidos se puede evitar el estrés hídrico o reducir enfermedades por exceso de agua. El uso de drones demostró ser una herramienta precisa, rápida y de bajo costo para la generación de curvas de Kc fundamentales en la planeación y manejo de zonas bajo riego.

Palabras claves: Coeficiente de cultivo (Kc), sensores remotos, planeación del riego, escenarios hídricos.



Introducción

En México, el maíz para grano es de alta importancia, siendo Sinaloa el principal productor en el ciclo otoño-invierno (OI), con una superficie cosechada de 400,000 ha en el año agrícola 2017-2018 (SADER, 2018). Sin embargo, la agricultura de riego cada vez más se enfrenta a problemas de sostenibilidad debido a la disminución de la disponibilidad de agua. Un desafío importante para el sector agrícola de México es la producción de los cultivos con menos agua aumentando su productividad (Sifuentes-Ibarra et al., 2021). México; no está exento a sequías, que afectan principalmente al sector agropecuario; sobre todo en las zonas áridas y semiáridas del país, donde por naturaleza el agua es escasa (Ortega-Gaucin, 2018).

Los requerimientos hídricos de los cultivos se pueden estimar a partir de la evapotranspiración de los cultivos o la combinación de la transpiración de la planta más la evaporada directamente desde la superficie del suelo (Vega-Gatti, 2004), las cuales representan la necesidad de agua usada por las plantas en un periodo de tiempo conocido; una calendarización efectiva debe permitir el ajuste de la frecuencia y cantidad del riego basada en factores del suelo, ambiente, planta y manejo del riego (Ojeda-Bustamante et al., 2006). Debido a la fuerte dinámica de aparición de nuevos genotipos en las regiones productoras la calendarización debe basarse en los requerimientos hídricos de cada etapa de crecimiento para no bajar su producción (Çakir, 2004).

Por otra parte, se requiere contar con herramientas precisas para ajuste rápidos de los requerimientos hídricos en las zonas de riego, ya que los procedimientos tradicionales son lentos y de alto costo. El desarrollo de los sensores remotos actualmente permite estimar con precisión variables que intervienen en los requerimientos de riego de los cultivos como el coeficiente de cultivo (K_c), al respecto Kamble et al. (2013) desarrollaron un modelo en el cual estimaron los K_c de diferentes cultivos, utilizando una regresión lineal simple con la cual establecieron una relación general entre el índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI) a partir de datos satelitales de resolución moderada (MODIS) y el coeficiente de cultivo (K_c) calculado por la FAO. Marcial-Pablo et al. (2021) obtuvieron los valores del K_c del maíz mediante la fracción vegetal y el NDVI utilizando imágenes multiespectrales tomadas con un dron, para continuar con evaluación de la ETr y apoyar a la programación del riego en zonas agrícolas.

El uso de imágenes digitales obtenidas con un dron permite ajustar en forma rápida y precisa las curvas de coeficiente de cultivo (K_c) para los diferentes genotipos de maíz, y estimar sus requerimientos hídricos necesarios para el manejo eficiente del riego en zonas agrícolas. En este sentido se determinaron los requerimientos hídricos de dos híbridos de maíz de reciente incorporación al mercado a partir de imágenes digitales obtenidas con dron, como base para el manejo eficiente del riego en el norte de Sinaloa.



Materiales y Métodos

Caso de estudio

El experimento se realizó durante el ciclo agrícola otoño-invierno (OI) 2020-2021 en el Campo Experimental Valle del Fuerte (CEVAF) del Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (INIFAP), ubicado en Juan José Ríos, Guasave, Sinaloa a la altura del km 1,609 de la carretera internacional México-Nogales, en la parte norte del estado de Sinaloa. Se evaluaron cuatro tratamientos-calendarios de riego aplicados con los métodos de riego Goteo (G), Gravedad tecnificado (T) y Gravedad convencional (C) para el cultivo de maíz; los calendarios de riego son: cinco auxilios (5A), cuatro auxilios (4A), tres auxilios (3A) y dos auxilios (2A), aplicados en las fases fenológicas más sensibles al estrés hídrico de acuerdo con Steduto et. al. (2014). (cuadro 1).

Cuadro 1. Fases fenológicas críticas y grados día-desarrollo acumulados donde se aplicaron los riegos de auxilio.

Tratamiento	No. de riego de Auxilio	Fases fenológicas	Clave de fase fenológica	Grados día-desarrollo acumulados (GDDA)
5A	1	4 hojas	V4	335
	2	10 hojas	V10	638
	3	floración (jilote)	R1	858
	4	grano lechoso	R3	1162
	5	grano masoso	R4	1260

Para el presente estudio se utilizó el tratamiento 5A en riego por gravedad convencional, el cual es un calendario común en la zona de estudio y representa un escenario sin déficit hídrico. En cada tratamiento se establecieron dos híbridos de maíz: un híbrido de porte normal al que se le denominó H1 y un híbrido de porte bajo, de nueva generación, identificado como H2, los cuales son de reciente incorporación al mercado.

En la figura 1 se muestra el croquis del experimento en el que se indica la distribución física de los 3 métodos y los 18 tratamientos de riego, además de los híbridos en el terreno. La siembra se realizó el 23 de diciembre de 2020 con un manejo agronómico convencional.

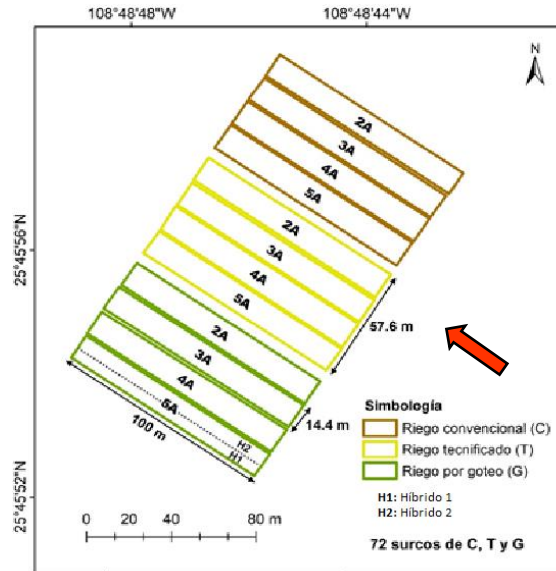


Figura 1. Croquis del experimento.

Variables medidas

Las imágenes se obtuvieron con un Drone eBee, equipado con cámara Parrot sequoia con bandas espectrales del verde (G), rojo (R), borde rojo (IR) e infrarrojo cercano (NIR), así como con un sensor RGB, realizándose vuelos entre las 10:00 y 12:00 horas durante la estación de crecimiento del cultivo. A partir de las imágenes individuales, por cada fecha, y usando el software Agisoft Metashape se obtuvo un ortomosaico georreferenciado. La corrección geométrica se llevó a cabo mediante 12 puntos de control terrestres (PCT) con coordenadas que se obtuvieron con un GPS RTK; mientras que la calibración radiométrica se llevó a cabo tomando en cuenta la imagen de un espectralón de reflectancia conocido, esta imagen se tomó antes y después de cada vuelo. A partir de cada ortomosaico se obtuvo el NDVI y la cobertura vegetal (CV).

Índice Normalizado de Desarrollo de Vegetación (NDVI).

El NDVI fue calculado mediante la ecuación (1) (Jiang et al., 2008), utilizando el software QGIS (<https://qgis.org/es/site/>)

$$NDVI = \frac{NIR-R}{NIR+R} \quad (1)$$

Donde NIR representa la reflectancia o radiancia del dosel en el infrarrojo cercano y R la reflectancia del dosel en el rojo (R).



Cobertura Vegetal

Esta variable representa un parámetro de gran importancia en el seguimiento de los cultivos, relacionado de forma directa con la evapotranspiración, debido a que la evolución de la cobertura vegetal indica las fases de la evaluación del coeficiente de cultivo (K_c). Para determinar la CV se evaluó el NDVI, a partir del cual se obtuvo el histograma de intensidades y se calculó un valor umbral que permitió separar la imagen en dos clases propuestas: vegetación y no vegetación. El valor umbral se determinó en forma automática mediante los algoritmos de umbralización de Otsu-Valley (Otsu, 1979) siguiendo la metodología empleada por Marcial-Pablo et al (2019). En base a la clasificación de los píxeles con vegetación, se determinó la fracción de la cobertura vegetal (CV) durante el desarrollo de cada híbrido como la relación entre los píxeles clasificados como vegetación y los píxeles totales de un área delimitada, como se representa en la ecuación (2).

(2)

$$CV = \frac{\text{Área clasificada con vegetación}}{\text{Área total delimitada}} \times 100$$

Modelo de coeficiente de cultivo (K_c)

Los valores de K_c son diferentes para cada cultivo e incluso para el mismo cultivo, y varía a lo largo del período de crecimiento debido a cambios en la vegetación y la cobertura del suelo (Reddy, 2015). Las características espectrales de la vegetación pueden proporcionar una estimación indirecta del K_c . En el presente estudio la estimación del K_c se realizó a partir de la relación entre K_c medido y la cobertura vegetal por el NDVI obtenido de los ortomosaicos multiespectrales, generando la función $K_c = f(CV \times NDVI)$, esto para tener una mejora en la estimación del K_c .

Cálculo de requerimientos hídricos

Una vez ajustado el K_c , se estimaron los requerimientos hídricos de cada híbrido con el modelo de programación integral del riego (Ojeda-Bustamante et al., 2006), el cual es un modelo que usa el concepto de Grados días de desarrollo (GDD), estima las variables Coeficiente de cultivo (K_c), Profundidad de la raíz (Pr) y factor de abatimiento (f) o máximo déficit permitido (MDP) con los Grados días de desarrollo acumulados (GDDA). Dicho modelo está integrado en una hoja de cálculo. Se ajustó el K_c en el modelo con el K_c generado en función de NDVI y cobertura vegetal para cada híbrido, y se estimaron los requerimientos diarios y acumulados de riego utilizando el clima que se presentó durante el ciclo de estudio.

Resultados

En la figura 2 se puede observar el NDVI calculado con imágenes tomadas por dron, observándose que los valores de este fueron diferentes significativamente entre híbridos y siempre mayores en el H1, especialmente en las etapas vegetativas, reduciéndose a partir de la floración (VT), se comportaron similares en las etapas de grano lechoso (R3) y masoso (R4) hasta igualarse en grano dentado (R5). Esta fluctuación en el valor de NDVI resalta además valores muy diferentes durante la estación de crecimiento, maximizándose en la etapa reproductiva y a partir de esta disminuir de forma significativa hasta alcanzar la madurez fisiológica. Los valores entre híbridos son en general diferentes y son atribuibles al porte-arquitectural y altura de planta característico de cada uno; lo que sugiere diferencias en las necesidades o requerimientos de riego entre híbridos, como entre etapas fenológicas.

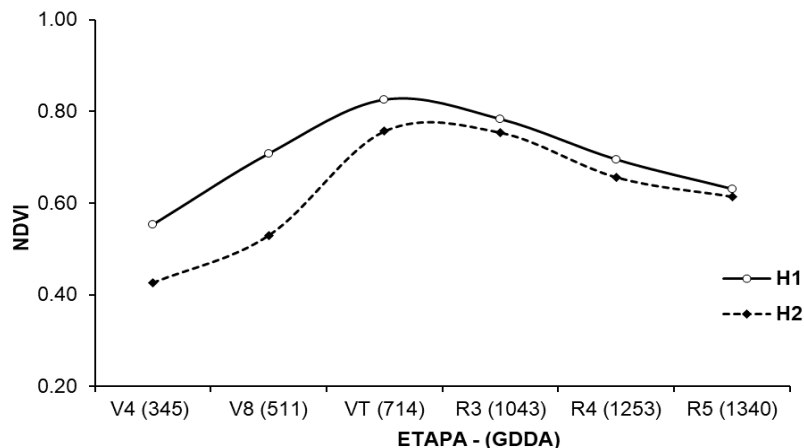


Figura 2. Índice Normalizado de Desarrollo de Vegetación (NDVI) calculado con imágenes espectrales tomadas con dron en el tratamiento de cinco auxilios (5A).

Los valores de cobertura vegetal registrados en el tratamiento sin restricción de agua (5A) que se observan en la figura 3, presentan diferencias importantes entre híbridos hasta la floración, y similares durante el llenado de grano, para cada una de las etapas y siempre fueron mayores con el H1. La fluctuación de la cobertura vegetal durante la estación de crecimiento fue similar entre híbridos, sin embargo, esta se maximizó en la floración (VT) en el H1 y hasta grano lechoso (R3) con el H2, y son evidentes las diferencias en los valores entre las distintas etapas fenológicas, coincidente a lo observado en los valores de NDVI con las mismas implicaciones en las necesidades o requerimientos de riego entre híbridos y etapas fenológicas.

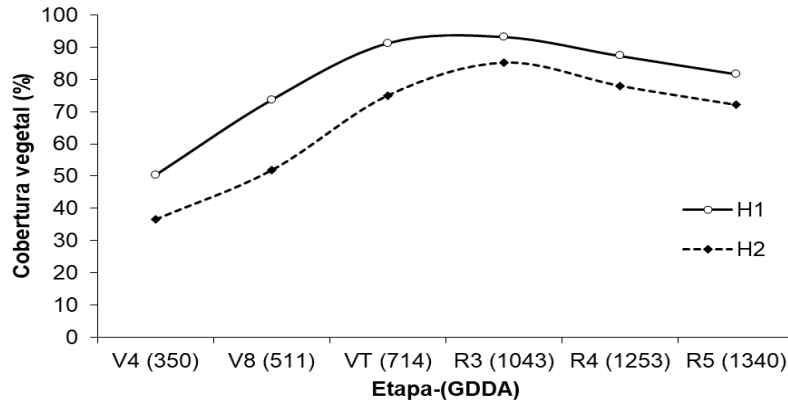


Figura 3. Cobertura Vegetal calculada con imágenes de dron en el tratamiento 5RA en dos híbridos.

Para la estimación del K_c de los dos híbridos se obtuvieron, para cada curva, ecuaciones de regresión de acuerdo con el diagrama de dispersión, en función de la $CV \cdot NDVI$, como se muestra en el cuadro 2. El coeficiente de correlación (R^2) para el H1 fue mayor a 0.90 y para el H2 mayor a 0.85; en el caso del H1 el valor de R^2 aumentó cuando se consideró dentro de la función la CV, lo que no ocurrió con el H2. Lo anterior indica que existe una alta relación entre ambos parámetros y que el NDVI, con la inclusión de CV, mejoran la capacidad estimativa de la función de regresión, explicando significativamente gran parte de la varianza de K_c

Cuadro 2. Funciones para la estimación de K_c de dos híbridos de maíz en riego convencional con cinco auxilios, a partir de NDVI y CV

Híbrido	Variable	Función	R^2
H1	NDVI	$K_c = 2.34 (NDVI) - 0.73$	0.90
H2	NDVI	$K_c = 1.71 (NDVI) - 0.14$	0.85
H1	CV, NDVI	$K_c = 1.36 (CV \times NDVI) + 0.14$	0.96
H2	CV, NDVI	$K_c = 1.21 (CV \times NDVI) + 0.42$	0.85

Al considerar las funciones del cuadro 2 se optó por utilizar la función donde se considera la CV. El K_c resultante aparece en la figura 4, se puede observar que este se maximiza antes en H1 respecto al H2; este comportamiento está asociado al menor o mayor consumo de agua por el cultivo, por lo que es necesaria una programación de riego en base a los requerimientos que cada híbrido demande en una determinada etapa.

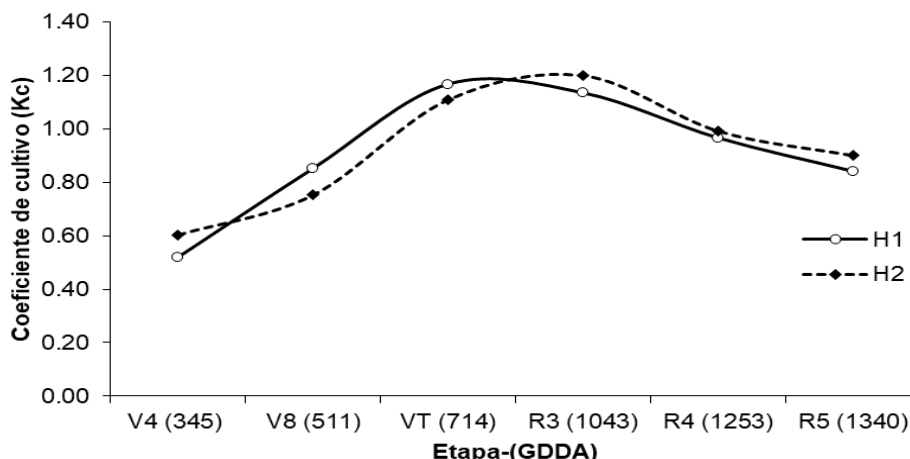


Figura 4. Coeficiente de cultivo (Kc) calculado en función de la Cobertura vegetal y NDVI resultante de imágenes de dron

Con el Kc resultante se hizo el cálculo de requerimientos hídricos de todos los tratamientos, el cuadro 3 muestra un resumen del cálculo de los requerimientos, se puede observar que la Evapotranspiración acumulada (ET_{racum}) aumenta a mayor número de riegos, también la Evapotranspiración máxima en un día ($ET_{r\max}$) se presentó hasta con 1mm de diferencia entre híbridos, también se observa que a mayor número de riegos es mayor la $ET_{r\max}$. Para la $ET_{r\text{med}}$ se comportó de forma parecida en todos los tratamientos, y la $ET_{r\min}$ fue igual entre tratamientos de riego.

Cuadro 3. Requerimientos hídricos en cuatro calendarios de riego de dos híbridos en el ciclo otoño- invierno (OI) 2020-21

No. Riegos de auxilio	ET_{racum} (mm)		$ET_{r\min}$ (mm/d ⁻¹)		$ET_{r\max}$ (mm/d ⁻¹)		$ET_{r\text{med}}$ (mm/d ⁻¹)	
	H1	H2	H1	H2	H1	H2	H1	H2
2	387.69	390.45	0.16	0.19	6.45	5.93	2.36	2.38
3	407.84	408.70	0.16	0.19	6.48	5.91	2.49	2.49
4	453.68	458.63	0.16	0.19	7.35	6.81	2.77	2.80
5	465.81	459.82	0.19	0.19	7.26	6.73	2.84	2.82

Conclusiones

El uso de imágenes digitales obtenidas con dron demostró ser una herramienta precisa, rápida y de bajo costo que facilita la generación de curvas de coeficiente de cultivo (Kc), fundamentales en la planeación y manejo de del agua en zonas bajo riego.

El comportamiento de las curvas de Kc puede servir para identificar donde ajustar el estrés del cultivo, alargando el intervalo de tiempo del primer riego. En este caso, los resultados sugieren el periodo vegetativo para ello. Al realizar un análisis de la demanda de recursos hídricos se encontró que el H2 tiene menor demanda que el H1, lo que sugiere que el primero puede ser utilizado en escenarios de baja disponibilidad hídrica.



Referencias Bibliográficas

- Cakir, R. (2004). Effect of water stress at different development stages on vegetative and reproductive growth of corn. *FielCrop Research*, 89(1), 1-16.
- Jiang, Z., Huete, A. R., Didan, K., & Miura, T. (2008). Development of a two-band enhanced vegetation index without a blue band. *Remote sensing of Environment*, 112(10), 3833-3845.
- Kamble, B., Kilic, A., & Hubbard K. (2013). Estimating Crop Coefficients Using Remote Sensing-Based Vegetation Index. *Remote Sensing*. 5(4), 1588-1602.
- Marcial-Pablo, M., González-Sánchez, A., Jiménez-Jiménez, S. I., Ontiveros-Capurata, R. E., & Ojeda-Bustamante, W. (2019). Estimation of vegetation fraction using RGB and multispectral images from UAV. *International Journal of Remote Sensing*, 40(2), 420-438.
- Marcial-Pablo, M.d.J., Gonzales-Sanchez, A., Jiménez-Jiménez S. I., Ontiveros-Capurata, R.E., & Ojeda-Bustamante. W. (2019). Estimation of vegetation fraction using RGB and multispectral images from UAV. *International Journal of Remote Sensing*, 40(2).
- Marcial-Pablo, M.d.J., Ontiveros-Capurata, R.E., Jiménez-Jiménez, S.I., Ojeda-Bustamante, W. (2021). Maize Crop Coefficient Estimation Based on Spectral Vegetation Indices and Vegetation Cover Fraction Derived from UAV-Based Multispectral Images. *Agronomy*, 11(4), 668.
- Ojeda-Bustamante, W., Sifuentes-Ibarra, E., & Unland-Weiss, H. (2006). Programación integral del riego en maíz en el norte de Sinaloa, México. *Agrociencia*, 40(1), 13-25.
- Ortega-Gaucin, D. (2018). Medidas para afrontar la sequía en México: Una visión retrospectiva. *Revista del Colegio de San Luis*, 8(15), 77-105.
- Otsu, N. (1979). A Threshold Selection Method from Gray-Level Histograms. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*, 9(1), 62-66.
- Reddy, K. C. (2015). Development of crop coefficient models of castor and maize crops. *European Journal of Agronomy*, 69, 59-62.
- SADER, C. I. (2018). Sistema de Información Sobre el Uso del Agua de Riego a Nivel Nacional. [En línea]
- Sifuentes-Ibarra, E., Ojeda-Bustamante, W., Macías-Cervantes, J., Mendoza-Pérez, C., & Preciado-Rangel, P. (2021). Water deficit considering phenology, effect on yield and water use efficiency. *Agrociencia*, 53(3), 209-226.



Steduto P., Raes D., Hsiao T. y Fereres E. 2014. AquaCrop: conceptos, fundamento y funcionamiento. Capítulo 3: Respuesta del rendimiento de cultivos herbáceos al agua: el modelo de simulación AquaCrop. En: Respuesta del rendimiento de los cultivos al agua. Estudio FAO 66. ISSN 0254-5284. Roma, Italia. p510.

Vega-Gatti, I. (2004). Fundamentos del Riego. Cap IX. Manejo y Conservación del Suelo: Fundamentos y Prácticas (págs. 413-483). PRONAMACHS.