

Simulación del rendimiento del trigo CIRNO-C2008 en el Valle del Yaqui mediante AquaCrop

Roberto Cora-Gil¹
Arturo Francisco Orozco-Campos¹
Marisol Ayala-Zepeda¹
Fannie Isela Parra-Cota²
María Isabel Estrada-Alvarado¹
Sergio de los Santos-Villalobos^{1,§}

1 Instituto Tecnológico de Sonora. 5 de febrero 818, Ciudad Obregón, Sonora, México. CP. 85000.

2 Campo Experimental Norman E. Borlaug-INIFAP. Norman E. Borlaug km 12, Ciudad Obregón, Sonora, México. CP. 85000.

Autor para correspondencia: sergio.delossantos@itson.edu.mx.

Resumen

A nivel mundial, el trigo es uno de los cereales más utilizados en la alimentación humana y en México ocupa el segundo lugar en producción después del maíz. Sin embargo, su productividad se ve afectada por la baja eficiencia de los fertilizantes químicos y la pérdida de nutrientes en el suelo, lo que provoca problemas ambientales. Es necesario buscar alternativas para reducir el uso de fertilizantes inorgánicos y mantener o mejorar el rendimiento del cultivo sin afectar la calidad del grano. Este estudio calibró y validó el modelo de simulación AquaCrop para el desarrollo y rendimiento del cultivo de trigo. Se realizaron experimentos en el Valle del Yaqui, México, durante el ciclo 2019-2020 con la variedad de trigo CIRNO C2008 (*Triticum turgidum* L.), bajo diferentes dosis de nitrógeno usando urea (240, 120 y 0 kg N ha⁻¹) para evaluar el impacto del estrés nutrimental sobre el desarrollo y rendimiento del cultivo. El análisis de varianza mostró que no hubo diferencias significativas ($p < 0.05$) entre los rendimientos simulados (7 189 t ha⁻¹, 6 638 t ha⁻¹ y 4 436 t ha⁻¹ para las dosis de 240, 120 y 0 kg N ha⁻¹, respectivamente) y los rendimientos observados (7.2 ± 0.007 t ha⁻¹, 6.6 ± 0.02 t ha⁻¹, 4.21 ± 0.16 t ha⁻¹, respectivamente). Los resultados demostraron que se calibró con éxito el modelo de simulación del rendimiento para el cultivo de trigo utilizando AquaCrop.

Palabras clave:

estrés, fertilidad del suelo, fisiología vegetal, sostenibilidad.



License (open-access): Este es un artículo publicado en acceso abierto bajo una licencia **Creative Commons**

Introducción

El ritmo acelerado del cambio climático, así como el aumento de la población amenazan la seguridad alimentaria en todo el mundo. Por otra parte, las prácticas agrícolas intensivas no sostenibles junto a la contaminación del ambiente y el abatimiento de los recursos naturales (Ochoa-Noriega, 2022) da una perspectiva más amplia del reto del sector agrícola.

En este contexto, es crucial considerar la importancia de cultivos como el trigo, que es uno de los más importantes a nivel mundial y el cereal más utilizado en la alimentación humana. En el noroeste de México, principalmente en el Valle del Yaqui en Sonora, el trigo se cultiva en condiciones de riego (Félix-Fuentes, 2010). De esta manera, existen diversos retos para la producción de este cultivo, como la baja disponibilidad del agua y la lixiviación de fertilizantes, lo que reduce significativamente los rendimientos y la capacidad del suelo para almacenar y completar el ciclo de los nutrientes y el agua (FAO, 2009).

Por otra parte, los cambios en los patrones de lluvia aumentan la probabilidad de obtener bajos rendimientos a corto y largo plazo (Nelson *et al.*, 2009). Así, surge la necesidad de desarrollar herramientas que integren la información del cultivo, y que además permitan analizar y cuantificar las relaciones que existen entre los factores bióticos y abióticos en los agroecosistemas.

Estas herramientas también podrían servir para evaluar diferentes manejos productivos o analizar uno o varios factores de interés mientras se mantienen los otros constantes, por ejemplo, manejos como: calendarización del riego, fertilización, las fechas de siembra, así como la simulación del impacto del cambio climático sobre el cultivo (Hernández *et al.*, 2011), en la actualidad estas herramientas son conocidas como modelos de simulación.

En este sentido, surge el modelo AquaCrop modelo de cultivo para simular la respuesta del rendimiento al agua' de la Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación (FAO), que permite simular el rendimiento de los cultivos a través de un modelo de productividad del agua, el cual a su vez simula la producción de biomasa con base en la cantidad de agua transpirada de la cobertura vegetal (González-Robaina, 2019).

Un estudio sobre el maíz BM709 en Altillanura, usando AquaCrop 5.0 adaptado a la zona, mostró alta precisión (> 90%) en la simulación del crecimiento y rendimiento. La eficiencia en la producción de materia seca dependió de la capacidad del cultivo para usar la radiación solar, favorable en Altillanura, concluyendo que, a 40 °C, el maíz puede mantener o aumentar su productividad gracias a la alta concentración de CO₂ (Cantillo *et al.*, 2019).

Lo anterior es un ejemplo del enfoque actual sobre el desarrollo de alternativas para mejorar la productividad de los agroecosistemas, y proveer alimentos más nutritivos. Además, se busca reducir la contaminación derivada de la aplicación incrementada de agroinsumos, sus riesgos a la salud y la degradación del suelo. El objetivo de este trabajo fue simular y correlacionar el rendimiento del cultivo de trigo (*Triticum turgidum* L.) variedad CIRNO C2008 bajo diferentes dosis de urea como fertilización nitrogenada mediante la validación del modelo AquaCrop.

Materiales y Métodos

Sitio de estudio y diseño experimental

El estudio se desarrolló durante el ciclo de invierno, diciembre 2019-mayo 2020, en el Centro Experimental y Transferencia de Tecnología (CETT) del Instituto Tecnológico de Sonora (27° 22' 01.3" latitud norte 109° 54' 55.1" longitud oeste), ubicado en el municipio de Cajeme, Sonora. El tipo de suelo fue vertisol, y presentó una textura arcillo-arenosa en los primeros 25 cm, franco-arcillo arenosa hasta los 100 cm de profundidad y franca de 100 a 170 cm (Valenzuela-Aragon *et al.*, 2019). El pH del suelo fue 7.9, 0.8% de materia orgánica y una densidad aparente de 1.15 g cm⁻³ (Zepeda *et al.*, 2024).

El contenido inicial de nitrógeno en el suelo, previo al establecimiento del experimento, fue de 123 kg N ha⁻¹. El clima fue medido mediante la estación meteorológica HOBO U30 NRC, el cual indicó un clima de lluvias variables, cuya temperatura media fue de 25.5 °C y una precipitación media de 308 mm. La variedad estudiada de trigo cristalino (*Triticum turgidum* L.) fue CIRNO C2008 y se sembró en una densidad de 120 kg ha⁻¹.

El manejo del cultivo se llevó a cabo de manera convencional utilizada por los productores (labranza primaria; arado de vertedera que voltea y rompe el suelo a profundidades significativas (20-30 cm), subsolado que rompe las capas compactadas profundas sin invertir completamente el suelo; gradas de discos que se utilizan después del arado para romper terrones grandes y nivelar el suelo, riego por gravedad y manejo integrado de la maleza) (Prasad, 2018).

El diseño experimental consistió de tres tratamientos, con cuatro réplicas cada uno, el experimento de campo se llevó a cabo con un diseño experimental que constaba de 12 parcelas distribuidas en tres tratamientos, cada uno con cuatro repeticiones. Cada parcela tenía dimensiones de 10 m x 6.4 m. Los tratamientos evaluados incluyeron tres niveles de fertilización nitrogenada con urea: 240 kg N ha⁻¹, 120 kg N ha⁻¹ y 0 kg N ha⁻¹, junto con fosfato monoamónico (MAP) 100 kg ha⁻¹. Cada parcela, que medía ocho surcos (0.8 m de ancho) por 10 m de largo.

Los tratamientos consistieron en aplicaciones de 0, 120 y 240 kg N ha⁻¹ (equivalentes al 0, 50 y 100% de nitrógeno, respectivamente), administrados en forma de urea. Los riegos realizados fueron por gravedad, incluyendo uno antes de la siembra y tres adicionales como riegos de auxilio. La fertilización nitrogenada (urea) se aplicó al voleo, fraccionada en tres etapas: 33% en la siembra, 33% en el primer riego, que fue 45 días después de la siembra (dds) y 33% en el segundo riego, 80 dds (Zepeda *et al.*, 2024). Finalmente, los tratamientos fueron cosechados para el cálculo del rendimiento de grano.

Obtención de datos

Datos climáticos

Se utilizó una base de datos histórica de la Red de Estaciones Meteorológicas Automáticas de Sonora (REMAS) estación ubicada en el block 910), seleccionando el periodo temporal 1995-2019. A nivel de campo, se instaló una estación meteorológica HOBO U30 'New CETT' para medir los parámetros climáticos durante el experimento como temperatura y humedad del aire, velocidad del viento, evapotranspiración referente al cultivo (Eto) y precipitación. Las mediciones de Eto fueron obtenidas de la calculadora de Eto del modelo AquaCrop, utilizando los parámetros de humedad del aire, velocidad del viento y radiación o datos de sol, necesarios para calcular la Eto (Boudhina *et al.*, 2019).

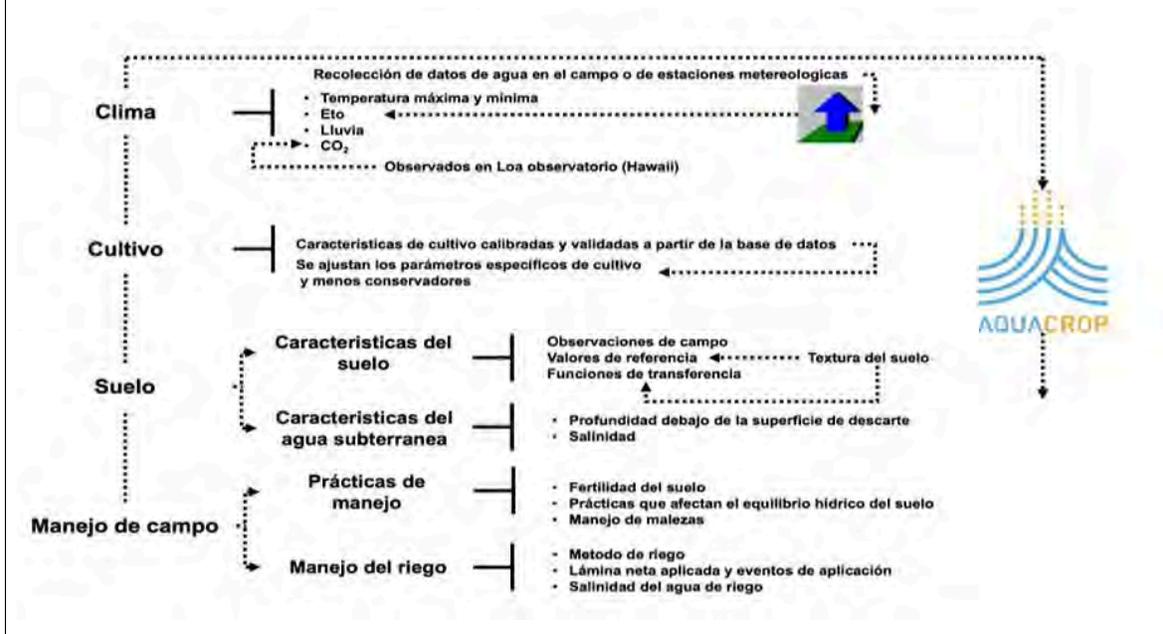
Datos del cultivo

Los datos del desarrollo del cultivo fueron obtenidos mediante la observación y medición con la escala Zadoks 'código decimal', basada en 10 etapas importantes del desarrollo (Boudhina *et al.*, 2019). Asimismo, se midió la cobertura del dosel con la cámara 'go pro-7 semi profesional', tomando fotografías tres veces por semana para obtener los datos de fenología y cobertura durante la duración del ciclo.

Simulación en AquaCrop

De acuerdo con lo reportado por Raes *et al.* (2009), el modelo AquaCrop consta de varias ecuaciones que, con datos de clima, densidad de población, características genéticas del cultivo, tipo de suelo, nivel de fertilización y nivel de déficit hídrico, simulan el crecimiento y rendimiento del cultivo. En la Figura 1, se mostró el esquema de simulación empleado en AquaCrop. En la simulación del desarrollo del cultivo, la expansión del dosel se distinguió de la expansión de la zona de raíces.

Figura 1. Esquema general empleado en la simulación con AquaCrop.



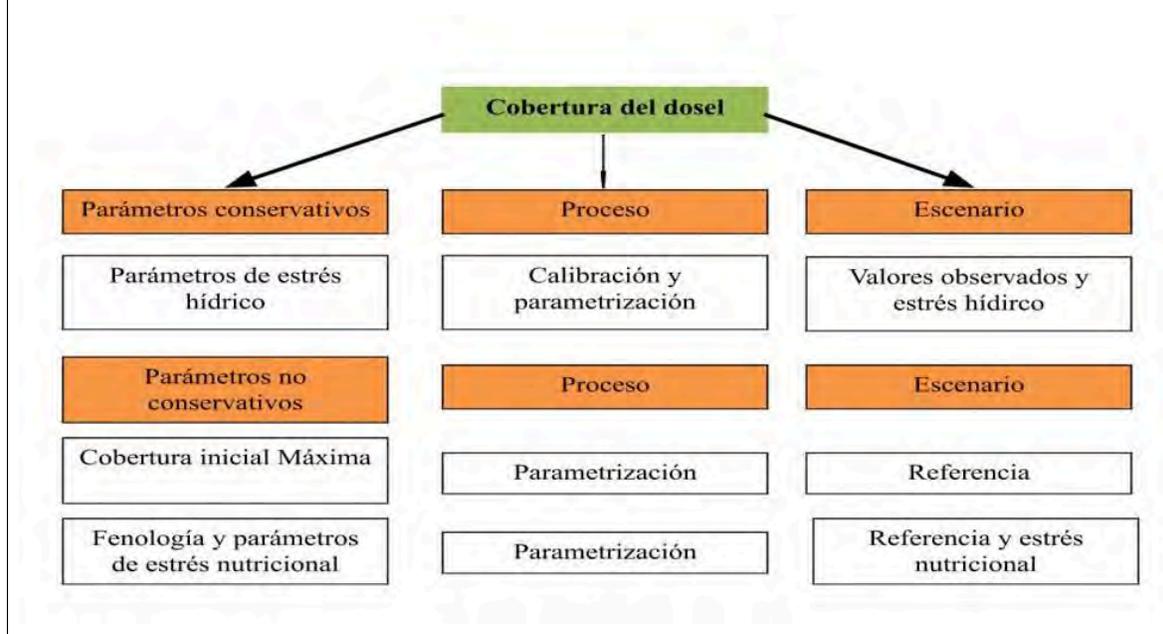
AquaCrop utiliza la cubierta de dosel verde para describir el desarrollo del cultivo, mediante su expansión, su madurez, conductancia y senescencia, determina la cantidad de agua transpirada, que a su vez determina la cantidad de biomasa producida y el rendimiento final (Porras-Jorge, 2019). Si ocurre estrés hídrico, la cobertura del dosel (CC) simulada será menor que la cobertura de dosel potencial (CC_{pot}) para condiciones sin estrés y es posible que no se alcance la profundidad máxima de enraizamiento.

Calibración de cobertura del dosel en AquaCrop

El proceso de la calibración de la cobertura del dosel se muestra en la Figura 2.



Figura 2. Calibración y simulación de la cobertura del dosel en el cultivo de trigo bajo tres dosis de fertilización nitrogenada.



Resultados y discusión

Parametrización de variables del cultivo

Para llevar a cabo la simulación del rendimiento del cultivo de trigo primeramente se determinaron los diversos parámetros no conservativos en los tratamientos, con las diferentes dosis de fertilización, los cuales se observan en el Cuadro 1.

Cuadro 1. Valores parametrizados del cultivo de trigo (*Triticum turgidum* L.) CIRNO C2008.

Parámetros no conservativos	240 (kg N ha ⁻¹)	120 (kg N ha ⁻¹)	0 (kg N ha ⁻¹)	Valor medio	Unidad
Temperatura mínima	0.4	0.4	0.4	0.4	°C
Temperatura máxima	38	38	38	38	°C
Cobertura del dosel inicial	0	0	0	0	%
Máxima cubierta del dosel	98	75.63	93.5	89.04	%
Coefficiente de transpiración del cultivo	1	1	1	1	°C
Productividad del agua normalizada	19.5	19.5	19.5	19.5	g m ⁻²
Índice de cosecha	50	56	50	52	%
Fecha de madurez	126	126	126	126	DDS

Parámetros no conservativos	240 (kg N ha ⁻¹)	120 (kg N ha ⁻¹)	0 (kg N ha ⁻¹)	Valor medio	Unidad
Profundidad máxima de la raíz	1.25	1.25	1.25	1.25	m
Densidad de plantación	126	126	126	126	kg ha ⁻¹

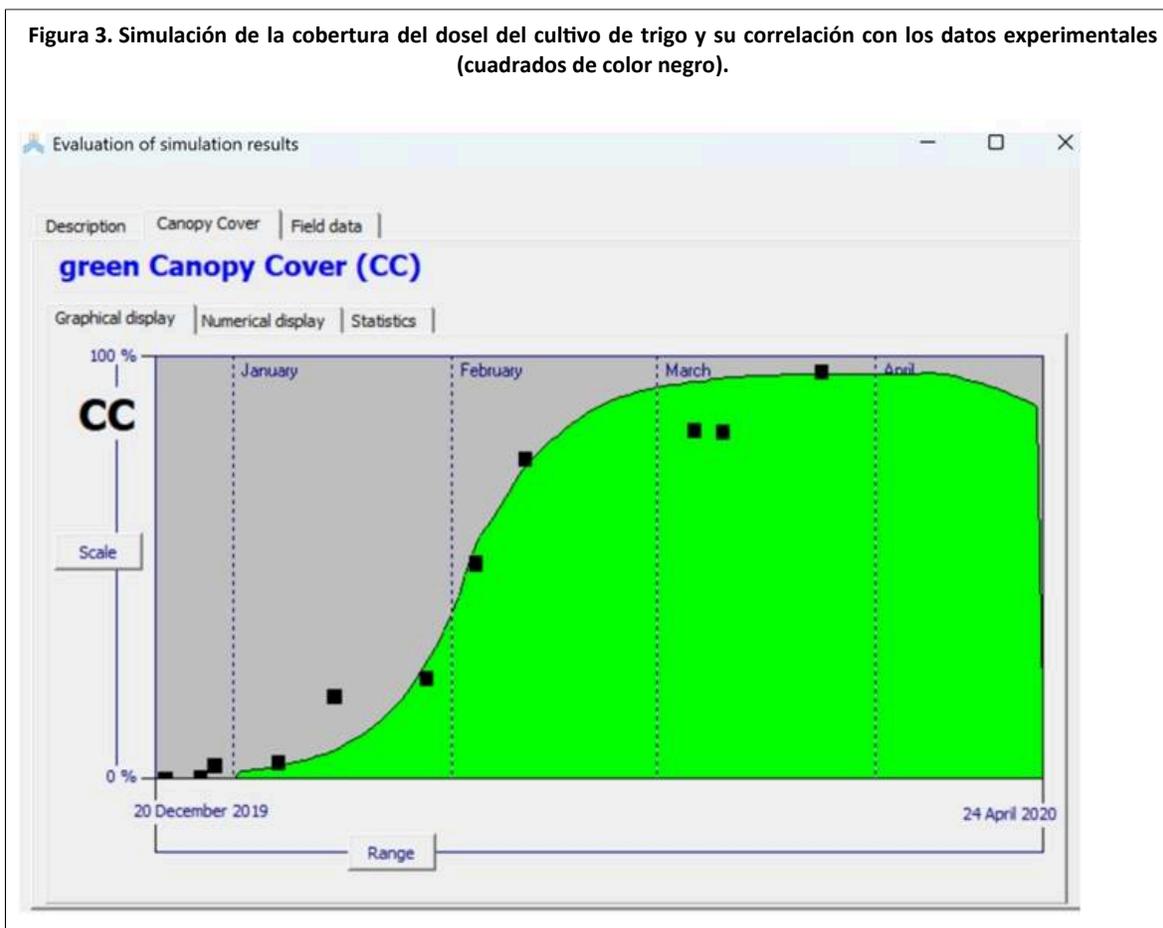
Productividad del agua

Cultivos C3, como el trigo, presentan valores de WP (productividad del agua) en el rango de 13-20 g m⁻². El modelo tiene un valor predeterminado de 15 g m⁻² para la productividad del agua normalizada. Sin embargo, en este trabajo en particular, se ajustó la productividad del agua mediante AquaCrop para tener en cuenta la concentración de CO₂ atmosférico, por lo cual, el valor utilizado fue de 19.5 g m⁻².

Cobertura del dosel

La cobertura del dosel se expresa como el porcentaje de la superficie total del cultivo cubierto por la proyección vertical de las plantas (Farfán, 2019). Los resultados indicaron un 98% de cobertura del suelo en la etapa de madurez del cultivo como se expresa en la Figura 3, en donde los cuadrados de color negro indican la cobertura del dosel observada en campo y los valores presentados en la gráfica de color verde son los valores simulados por el modelo AquaCrop, con valores de cobertura inicial de 2.6%.

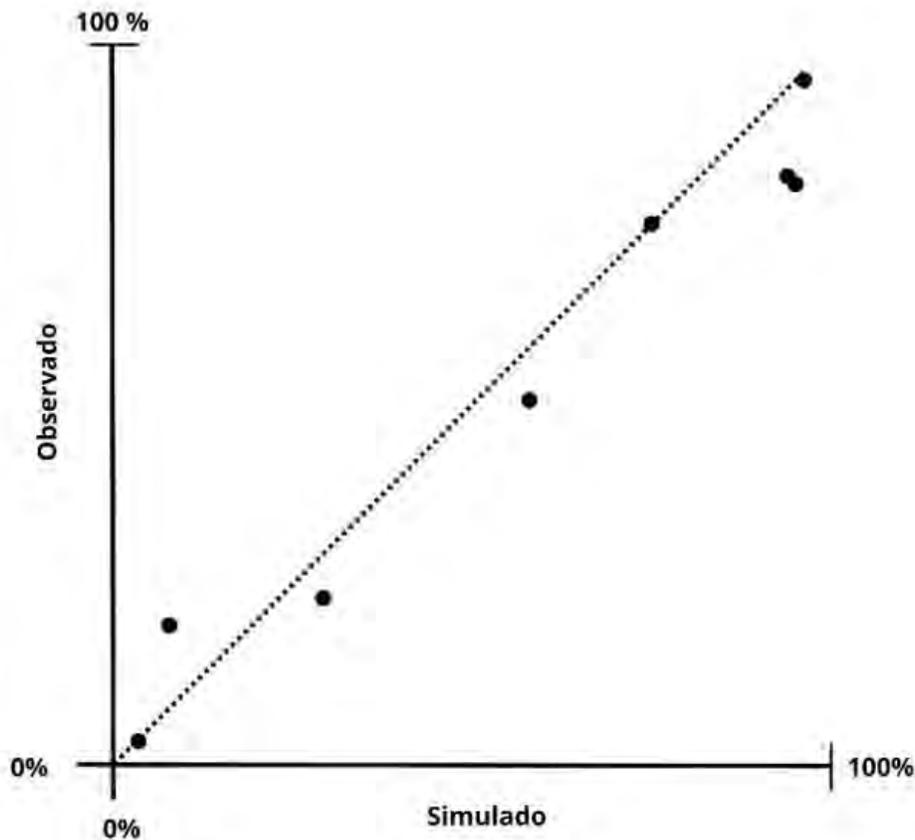
Figura 3. Simulación de la cobertura del dosel del cultivo de trigo y su correlación con los datos experimentales (cuadrados de color negro).



Aquellos parámetros relacionados con la duración de las diferentes etapas de desarrollo del cultivo sufrieron variaciones con respecto a los usados como valores de inicio para comenzar la calibración; destacándose el parámetro de días después de siembra (DDS) para lograr la máxima cobertura (77 DDS), el inicio de la floración (81 DDS) y senescencia (112 DDS).

En la Figura 4, se muestran los indicadores estadísticos de las simulaciones de la cobertura del dosel con relación a lo observado en campo, obteniendo un coeficiente de correlación r de Pearson de 0.99 siendo el mismo orden en las dos variables. De igual forma se analizó el error de raíz cuadrada media (RMSE), que es la desviación estándar de los valores residuales (errores de predicción). Los valores obtenidos indicaron que el modelo AquaCrop tiene una alta sensibilidad al simular la cobertura del dosel real del cultivo de trigo variedad CIRNO C2008.

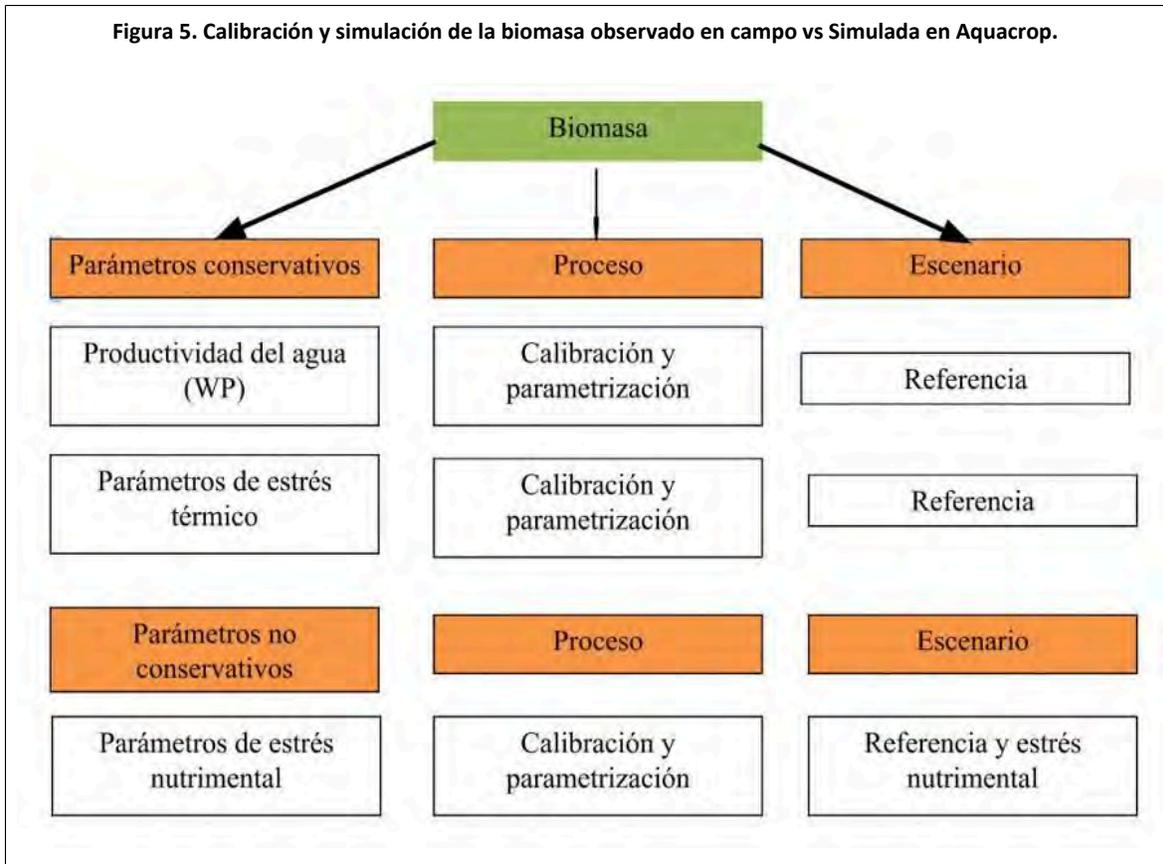
Figura 4. Gráfico lineal de la calibración de cobertura del dosel, simulado vs observado en campo.



Calibración y simulación de biomasa

La cantidad acumulada de agua transpirada se traduce en una cantidad proporcional de biomasa producida, por lo que la productividad del agua para la demanda atmosférica y las concentraciones de CO_2 en el aire, expresa la fuerte relación entre la asimilación de CO_2 fotosintético, producción de biomasa y la transpiración independientemente de las condiciones climáticas, como se muestra en la Figura 5 (Ordoñez-Paz, 2016).





AquaCrop utiliza en la simulación de la biomasa seca un modelo lineal altamente contrastado donde se relaciona la biomasa seca con la transpiración del cultivo a través de la variable productividad del agua (WP) (Steduto *et al.*, 2009). Con la intención de normalizar dicha variable, se incluyó en esta relación la evapotranspiración de referencia (ET_0). De forma general se considera que la simulación de las fases de desarrollo fue satisfactoria, pues los indicadores estadísticos para la ET_0 son significativos.

Con respecto a los valores de la biomasa se obtuvo un r^2 de 0.99, el error cuadrático medio normalizado (NRMSE), también conocido como índice de dispersión se encontró dentro de los límites de $\pm 20\%$. Los valores de EF (eficiencia del modelo) y d (índice de Willmott) son altos según los criterios de Moriasiet *al.* (2007). Así, utilizando la información proporcionada en las secciones anteriores, se logró calibrar el modelo, lo que permitió obtener un conjunto de parámetros estándar no conservativos para el cultivo de trigo variedad CIRNO C2008.

Rendimientos observados vs simulados en Aquacrop

Los rendimientos obtenidos en campo se muestran en el Cuadro 2, donde se pueden comparar con los valores simulados en Aquacrop para los tres tratamientos de estudio; es decir, para el tratamiento bajo 240 kg N ha^{-1} el rendimiento obtenido fue 7.2 t ha^{-1} mientras que el rendimiento simulado fue 7.189 t ha^{-1} . En el tratamiento bajo 120 kg N ha^{-1} , el rendimiento simulado fue 6.638 t ha^{-1} y el obtenido en campo fue 6.6 t ha^{-1} . El rendimiento simulado para el tratamiento 0 kg N ha^{-1} fue de 4.436 t ha^{-1} , en comparación con el rendimiento obtenido en campo 4.2 t ha^{-1} .



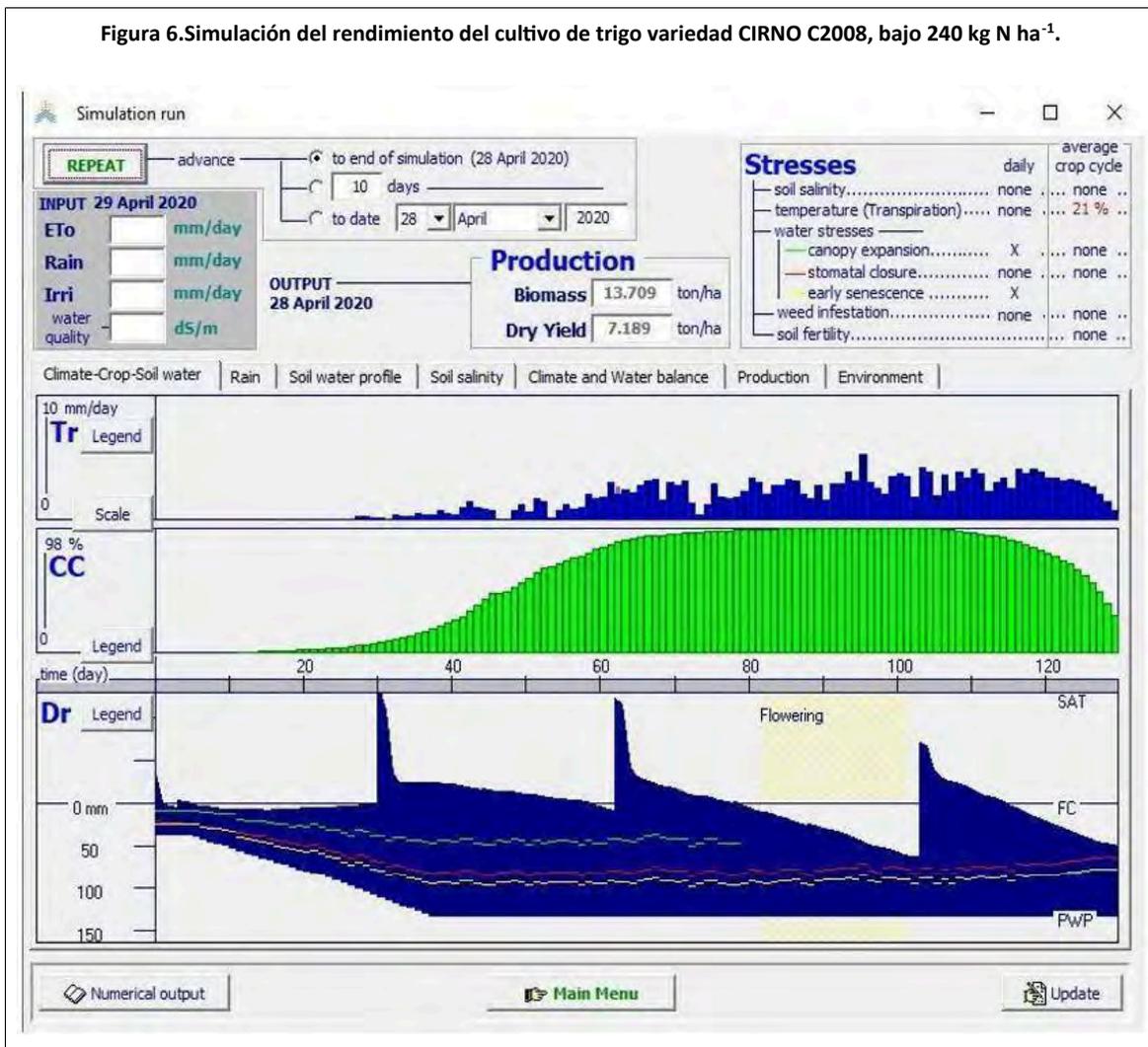
Cuadro 2. Rendimientos Obtenidos y simulados en los tres tratamientos en estudio.

Tratamiento	Rendimiento simulado (t ha ⁻¹)	Rendimientos obtenidos en campo (t ha ⁻¹)
240 kg ha ⁻¹	7.189	7.2 ±0.7
120 kg ha ⁻¹	6.638	6.6 ±0.02
0 kg ha ⁻¹	4.436	4.2 ±0.16

La producción simulada del cultivo de trigo variedad CIRNO C2008 bajo 240 kg N ha⁻¹ mostró un rendimiento de 7.189 t ha⁻¹. Se ha reportado que la aplicación de fertilizantes químicos tiene un efecto positivo y significativo en la producción de granos, contribuyendo tanto al incremento en los rendimientos como a la calidad de estos (Nahar *et al.*, 2017; Grageda-Cabrera *et al.*, 2018).

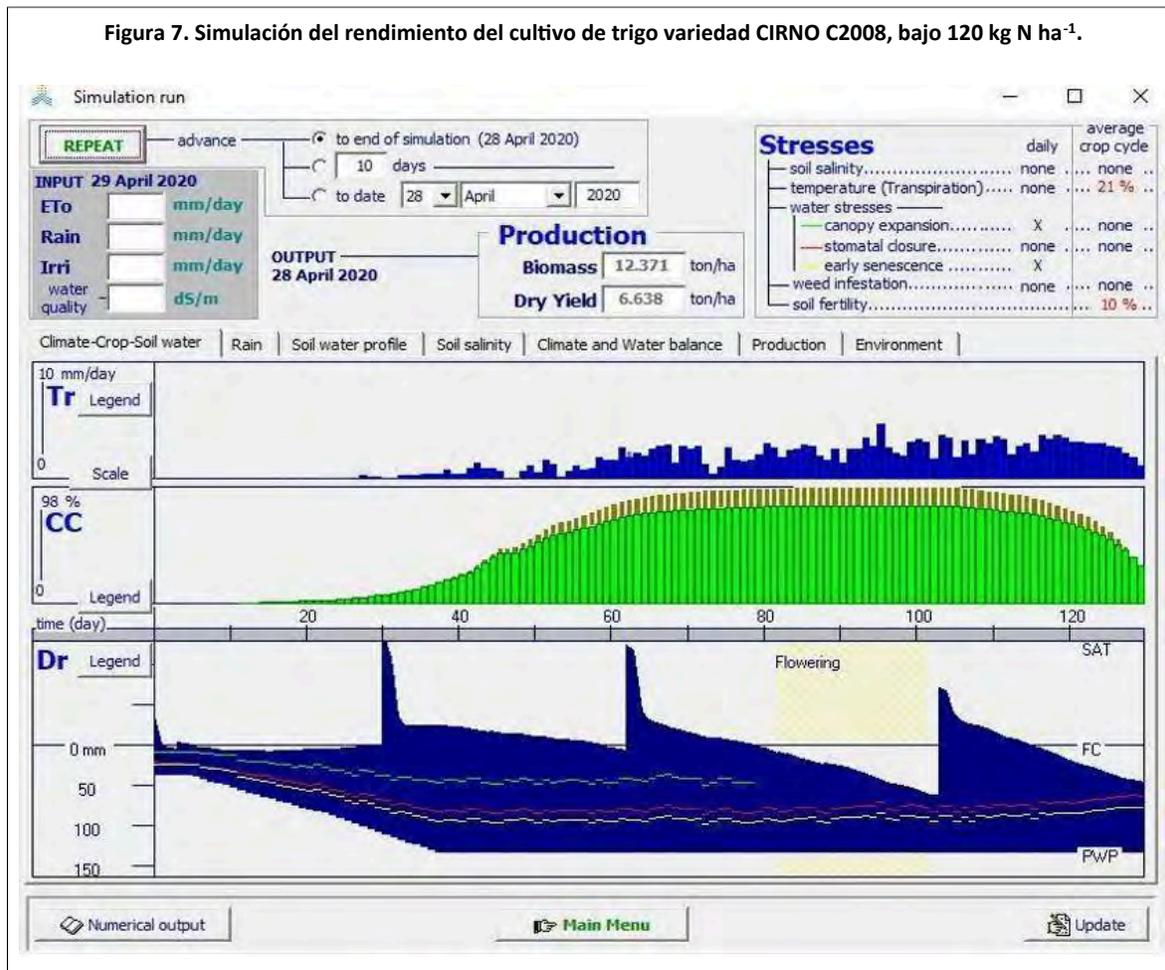
Además, el estrés térmico modificó las relaciones hídricas y la tasa de transpiración del cultivo. Por otra parte, no se presentó el cierre de estomas, ya que éstos se abrieron con el aumento en la concentración de los nutrientes (Zahra, 2023). Finalmente, no se presentó déficit de nutrientes ya que la proporción de estos fue la correcta, siguiendo el principio de 4R por sus siglas en inglés, que quiere decir que la fertilización fue con la fuente, dosis, momento y sitio correcto (Figura 6) (Baseca, 2020).

Figura 6. Simulación del rendimiento del cultivo de trigo variedad CIRNO C2008, bajo 240 kg N ha⁻¹.



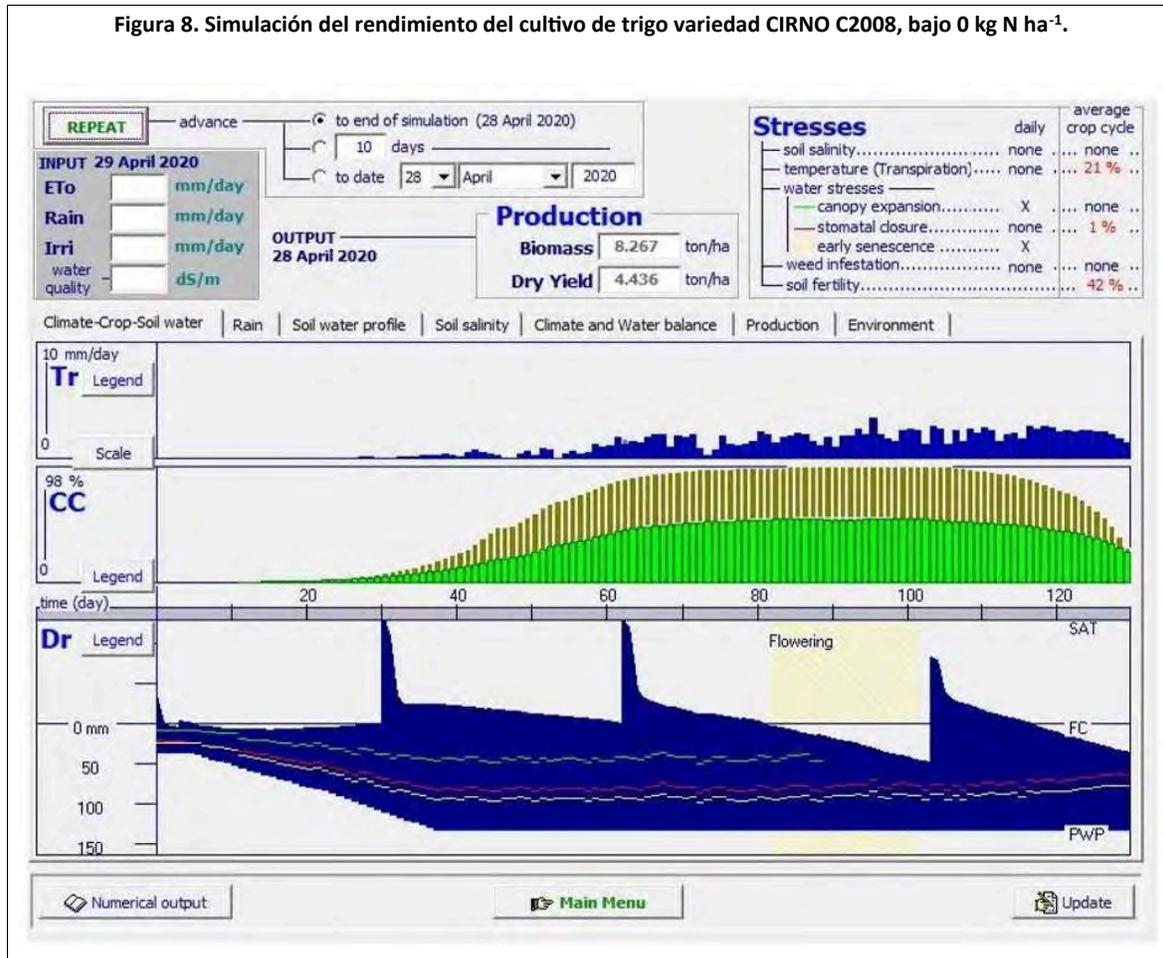
La insuficiencia de nitrógeno desencadena una serie de modificaciones en diversos procesos fisiológicos de las plantas, con especial énfasis en la fotosíntesis, el metabolismo de los azúcares y la distribución de fotoasimilados en función de las fuentes y requerimientos correspondientes (Sun, 2020). Esta carencia nutricional reduce la capacidad fotosintética de las plantas, afectando su habilidad para capturar y transformar la energía solar en compuestos orgánicos esenciales para su crecimiento y desarrollo (Acevedo, 2020).

Además, la alteración en el metabolismo de los azúcares influye en la producción de carbohidratos y otros compuestos vitales para el funcionamiento óptimo de las plantas. La asignación perturbada de fotoasimilados, como resultado de la deficiencia de nitrógeno, puede afectar la distribución de nutrientes y la respuesta a la demanda metabólica en diferentes partes de la planta, influyendo así en su crecimiento y rendimiento general (Alcántara-Cortés, 2019). Estos efectos fisiológicos interconectados denotan la importancia crucial del nitrógeno como nutriente esencial para el desarrollo saludable y productivo de las plantas, como se observó en el rendimiento obtenido vs simulado para el cultivo de trigo bajo una dosis de 120 kg N ha⁻¹ (Cuadro 2 y Figura 7).



En este tratamiento, se modificaron las relaciones hídricas, tasa de transpiración, el balance fotosíntesis-respiración, eficiencia del uso de agua, la síntesis proteica, la actividad enzimática y en consecuencia disminuyeron los rendimientos agrícolas (Martínez *et al.*, 2017). Baseca (2020) reportó que la deficiencia identificada ocasiona la disfunción de componentes vitales dentro de la estructura de la planta o la ausencia de estos elementos, lo que tiene como consecuencia un desarrollo deficiente, manifestándose en patrones de crecimiento, la aparición de tonos amarillentos y la predisposición de las plantas a ser más susceptibles a enfermedades.

En situaciones de carencia de nutrientes, como en el tratamiento del cultivo de trigo variedad CIRNO C2008 bajo 0 kg N ha⁻¹ (Figura 8), las plantas experimentaron una disminución significativa en el crecimiento y alargamiento celular, junto con una reducción en la síntesis de proteínas, factores esenciales que influyen en su crecimiento adecuado y funcionamiento óptimo. En situaciones de deficiencia de nitrógeno más aguda se observa marchitamiento de las hojas inferiores y clorosis general en toda la planta (Díaz-Franco, 2018).



El cierre de las estomas en presencia del ácido abscísico (ABA) y las actividades de los canales de calcio durante la respuesta al estrés, generan importancia a las variaciones del calcio, pues en las células guarda, las oscilaciones de Ca²⁺ regulan la apertura de las estomas. La sequía es uno de los mayores problemas de estrés en la agricultura. Su deficiencia provoca significativas disminuciones en el crecimiento de las plantas y si ésta persiste, muchas plantas muestran síntomas de clorosis, especialmente en las hojas maduras (Taiz *et al.*, 2020).

Conclusiones

La calibración y validación del modelo AquaCrop para el cultivo de trigo (*Triticum turgidum* L.) variedad CIRNO C2008, bajo las condiciones del Valle del Yaqui, México y utilizando tres dosis de fertilización nitrogenada se realizó exitosamente; a través, del uso de datos experimentales. Lo anterior, representó una herramienta efectiva y confiable para la evaluación y predicción del rendimiento del cultivo de trigo para la determinación de prácticas de manejo, tales como la elección óptima de fechas de siembra, diseño de estrategias de riego y fertilización, entre otras.

Agradecimientos

Las y los autores agradecen al proyecto FAO/IAEA-RLA5077 'Enhancing Livelihood through Improving Water Use Efficiency Associated with Adaptation Strategies and Climate Change Mitigation in Agriculture (ARCAL CLVIII)' por el financiamiento otorgado. Además, al Consejo Nacional de Humanidades, Ciencia y Tecnología (CONAHCYT) por las becas de maestría (Núm. 1149773 a Roberto Cora Gil) y doctorado (Núm. 605648 a Marisol Ayala Zepeda).

Bibliografía

- 1 Acevedo, F. E. 2020. Ecología química de interacciones entre plantas, insectos y controladores naturales de plagas herbívoras. Ed. Cenicafé. 116 p.
- 2 Alcántara-Cortés, J. S.; Acero-Godoy, J.; Alcántara-Cortés, J. D. y Sánchez-Mora, R. M. 2019. Principales reguladores hormonales y sus interacciones en el crecimiento vegetal. *Nova*. 17(32):109-129. <http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci-arttext&pid=S179424702019000200109&lng=en&tlng=es>.
- 3 Baseca, C. 2020. Plataforma tecnológica multimedia para la agricultura de precisión (platem precision agricultura). Doctoral dissertation, Universitat Politècnica de València. 156 p.
- 4 Boudhina, N.; Masmoudi, M. M.; Alaya, I.; Jacob, F. y Mechli, N. B. 2019. Use of AquaCrop model for estimating crop evapotranspiration and biomass production in hilly topography. *Arabian Journal of Geosciences*. 12(8):259-1-7. <https://doi.org/10.1007/s12517-019-4434-9>.
- 5 Cantillo, J. A. R.; Vélez, E. B.; Hernández, J. F. C. y Pizarro, R. J. 2019. Aplicación del modelo Aquacrop para un cultivo de maíz (*Zea mays* L). *Revista Sistemas de Producción Agroecológicos*. 10(2):19-49. <https://doi.org/10.22579/22484817.730>.
- 6 Díaz-Franco, A.; Espinosa-Ramírez, M. y Ortiz-Cháirez, F. E. 2018. Corrección de la clorosis férrica con quelato EDDHA en cultivos sembrados en suelo alcalino y calcáreo. *Terra Latinoamericana*. 36(1):23-30.
- 7 FAO. 2009. 2050. Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación. High-level experts forum: documentos de expertos. <http://www.fao.org/wsfs/forum2050/wsfsbackgrounddocuments/wsfexpertpapers/es/>.
- 8 Farfán, F. F. 2019. Descripción de la estructura del dosel arbóreo al interior de un sistema agroforestal con café. Centro Nacional de Investigaciones de Café (Cenicafé).
- 9 Félix-Fuentes, J.; Figueroa-López, P.; Fuentes-Dávila, G.; Valenzuela-Herrera, V.; Chávez-Villalba, G. y Alberto Mendoza-Lugo, J. 2010. CIRNO C2008: nueva variedad de trigo cristalino con alto rendimiento potencial para el estado de Sonora. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*. 1(5):739-744. <http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci-arttext&pid=S200709342010000500016&lng=es&nrm=iso&tlng=es>.
- 10 González-Robaina, F.; López-Vargas, D.; Cisneros-Zayas, E.; Herrera-Puebla, J. y Cid-Lazo, G. 2019. Calibración y análisis de sensibilidad del modelo Aquacrop para frijol en suelo ferralítico rojo compactado. *Revista Ingeniería Agrícola*. 9(4):3-12.
- 11 Grageda-Cabrera, O. A.; González-Figueroa, S. S.; Vera-Nuñez, J. A.; Aguirre-Medina, J. F. y Peña-Cabriales, J. J. 2018. Efecto de los biofertilizantes sobre la asimilación de nitrógeno por el cultivo de trigo. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*. 9(2):281-289. <https://doi.org/10.29312/remexca.V9i2.1071>.
- 12 Hernández, N., Soto, F. and Caballero, A. 2009. Modelos de simulación de cultivos. Características y usos. *Cultivos Tropicales*. 30(1):73-82.
- 13 Moriasi, D. N.; Arnold, J. G.; Liew, M. W. V.; Bingner, R. L.; Harmel, R. D. and Veith, T. L. 2007. Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations. *Transactions of the ASABE*. 50(3):885-900. Doi: 10.13031/2013.23153.

- 14 Nahar, S.; Zain, M. F. M.; Kadhum, A. A. H.; Hasan, H. A. and Hasan, M. R. 2017. Advances in photocatalytic CO₂ reduction with water: a review. *Materials*. 10(6):629. <https://doi.org/10.3390/MA10060629>.
- 15 Nelson, G. C.; Rosegrant, M. W.; Koo, J.; Robertson, R.; Sulser, T.; Zhu, T.; Ringler, C.; Msangi, S.; Palazzo, A.; Batka, M.; Magalhaes, M.; Valmonte-Santos, R.; Ewing, M. and Lee, D. 2009. Climate change. impact on agriculture and costs of adaptation. https://doi.org/10.2499/0896295354_9-11.
- 16 Ochoa-Noriega, C. A. 2022. Análisis económico-social de la sostenibilidad del modelo de desarrollo agrícola de la Costa de Hermosillo, México. <https://repositorio.ual.es/bitstream/handle/10835/13721/01.%20Tesis.pdf?sequence=1&isAllowed=y>.
- 17 Ordoñez-Paz, C. M. 2016. Efecto del cambio climático en la evapotranspiración y rendimiento del cultivo de papa, variedad Única bajo condiciones de La Molina. 80 p.
- 18 Porras-Jorge, Z. R. 2019. Desempeño del modelo Aquacrop para el cultivo de arroz bajo condiciones de humedecimiento y secado alternados en La Molina, Perú. In Universidad Nacional Agraria La Molina. <http://190.119.243.88/handle/20.500.12996/4113>.
- 19 Prasad, G.; Singh, S. M.; Patel, C.; Nema, A. K.; Singh, R. S.; Yadav, M. K. and Singh, K. K. 2018. Impact of temperature and solar radiation on wheat crops for Varanasi region of Uttar Pradesh. *VayuMandal*. 44(2):47-52.
- 20 Raes, D.; Steduto, P.; Hsiao, T. C. and Fereres, E. 2009. Aqua crop is the FAO crop model to simulate yield response to water: II. Main algorithms and software description. *Agronomy Journal*. 101(3):438-447. <https://doi.org/10.2134/agronj2008.0140s>.
- 21 Steduto, P.; Hsiao, T. C.; Raes, D. y Fereres, E. 2009. Aqua crop is the FAO crop model to simulate yield response to water: I. concepts and underlying principles. *Agronomy Journal*. 101(3):426-437 Doi: 10.2134/agronj2008.0139s.
- 22 Sun, X.; Chen, F.; Yuan, L. and Mi, G. 2020. The physiological mechanism underlying root elongation in response to nitrogen deficiency in crop plants. *Planta*. 251(4):1-14. <https://doi.org/10.1007/s00425-020-03376-4/metrics>.
- 23 Valenzuela-Aragón, B.; Parra-Cota, F. I.; Santoyo, G. and Arellano-Wattenbarger, G. and Santos-Villalobos, S. 2019. Plant-assisted selection: a promising alternative for *in vivo* identification of wheat (*Triticum turgidum* L. subsp. Durum) growth promoting bacteria. *Plant and Soil*. 367-384 pp. 10.1007/s11104-018-03901-1.
- 24 Zahra, N.; Hafeez, M. B.; Ghaffar, A.; Kausar, A.; Zeidi, M. A; Siddique, K. H. M. and Farooq, M. 2023. Plant photosynthesis under heat stress: effects and management. *Environmental and Experimental Botany*. 206. 105178. <https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2022.105178>.
- 25 Zepeda, M. A.; Ruiz, V. V.; Cota, F. I. P.; Chinchilla-Soto, C.; Cruz-Torres, E.; Ibba, M. I.; Alvarado, M. I. E. and Santos-Villalobos, S. 2024. genomic insights of a native bacterial consortium for wheat production sustainability. *Current Research in Microbial Sciences*. 6:100230-2. <https://doi.org/10.1016/j.crmicr.2024.100230>.



Simulación del rendimiento del trigo CIRNO-C2008 en el Valle del Yaqui mediante AquaCrop

Journal Information
Journal ID (publisher-id): remexca
Title: Revista mexicana de ciencias agrícolas
Abbreviated Title: Rev. Mex. Cienc. Agríc
ISSN (print): 2007-0934
Publisher: Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias

Article/Issue Information
Date received: 01 July 2024
Date accepted: 01 October 2024
Publication date: 11 January 2025
Publication date: Nov-Dec 2024
Volume: 15
Issue: 8
Electronic Location Identifier: e3850
DOI: 10.29312/remexca.v15i8.3850
Funded by: Consejo Nacional de Humanidades, Ciencia y Tecnología
Funded by: 605648
Award ID: 1149773

Categories

Subject: Artículo

Palabras claves:

Palabras claves:

estrés
fertilidad del suelo
fisiología vegetal
sostenibilidad

Counts

Figures: 8
Tables: 2
Equations: 0
References: 25
Pages: 0