

Evaluación Comparativa del Índice de Estrés Hídrico Total (TWSI) y la Eficiencia del Requerimiento de Riego (WREI) en Cultivos Agrícolas Utilizando Huellas Hídricas e Información Meteorológica

Comparative Assessment of the Total Water Stress Index (TWSI) and Water Requirement Efficiency (WREI) in Agricultural Crops Using Water Footprints and Meteorological Information

Carlos López-López¹, Adolfo Antenor Exebio-García¹, Jorge Flores-Velázquez¹,
Martín Alejandro Bolaños-González¹ y Juan Enrique Rubiños-Panta¹

¹ Colegio de Postgraduados. Carret. México-Texcoco km 36.5, Montecillo. 56264 Texcoco, Estado de México, México: (C.L.L.), (A.A.E.G.), (J.F.V.), (M.A.B.G.), (J.E.R.P.).
† Autor para correspondencia: carlos.lopez@colpos.mx; carlos.lopez165@gmail.com

RESUMEN

Existen múltiples índices para evaluar la escasez hídrica en la agricultura de riego, como el Crop Water Stress Index (CWSI), el Agricultural Water Stress Index (AWSI), los índices tridimensionales (WSIGreen, WSIBlue, WSIGrey) y el Índice de Eficiencia del Uso del Agua (WUEI). Sin embargo, estos índices no consideran el estrés hídrico acumulado a lo largo del ciclo agrícola ni integran las huellas hídricas reales bajo condiciones de escasez. El objetivo fue evaluar el Estrés Hídrico Total (TWSI) y la Eficiencia del Requerimiento de Riego (WREI) en cultivos agrícolas de un módulo de riego, utilizando información meteorológica y fisiológica para la Línea Base (LB), así como datos hidrométricos, agrícolas y de huellas hídricas para la Condición Real (CR). La investigación, fue de tipo empírico-asociativo, con diseño no experimental, analizó estadísticas agrícolas, hidrométricas, huellas hídricas (verde, azul y total) en los escenarios LB y CR. A partir de datos meteorológicos simulados por el generador climático WXGEN se procesaron en el software CROPWAT para calcular los requerimientos de riego en ambos escenarios. Los resultados incluyen cuatro expresiones matemáticas para calcular el TWSI y el WREI. En la LB, la huella hídrica total del módulo fue de 12 504.57 m³ Mg⁻¹, mientras que en la CR fue de 8075.78 m³ Mg⁻¹. El TWSI promedio fue de 45.43% y el WREI de 54.57%. Las principales limitaciones incluyeron la falta de datos meteorológicos y fisiológicos medidos *in situ*. Aun así, los índices TWSI y WREI demostraron ser herramientas efectivas para cuantificar el estrés hídrico total y la eficiencia del requerimiento de riego. Ya que el TWSI y WREI, calculados mediante las huellas hídricas potenciales de LB y reales de CR, proporcionaron un marco metodológico sólido para la gestión hídrica sostenible en la agricultura de riego con escasez de agua y variabilidad climática.

Palabras clave: agricultura de riego, colores del agua (verde, azul, gris), eficiente del agua, gestión hídrica sostenible, manejo recursos de agua en la agricultura.

SUMMARY

Multiple indexes are used to assess water scarcity in irrigated agriculture, such as the Crop Water Stress Index (CWSI), the Agricultural Water Stress Index (AWSI), the three-dimensional indices (WSIGreen, WSIBlue, WSIGrey), and the Water Use Efficiency Index (WUEI). However, these indices do not account for the cumulative water stress throughout the agricultural cycle, nor do they integrate real water footprints under scarcity conditions. This study aimed to evaluate the Total Water Stress Index (TWSI) and the Water Requirement Efficiency Index (WREI) in agricultural



Cita recomendada:

López-López, C., Exebio-García, A. A., Flores-Velázquez, J., Bolaños-González, M. A., & Rubiños-Panta, J. E. (2025). Evaluación Comparativa del Índice de Estrés Hídrico Total (TWSI) y la Eficiencia del Requerimiento de Riego (WREI) en Cultivos Agrícolas Utilizando Huellas Hídricas e Información Meteorológica. *Terra Latinoamericana*, 43, 1-21. e2209. <https://doi.org/10.28940/terra.v43i.2209>

Recibido: 21 de enero de 2025.
Aceptado: 1 de abril de 2025.
Artículo. Volumen 43.
Septiembre de 2025.

Editor de Sección:
Dr. Juan Pedro Flores Margez

Editor Técnico:
Dr. José Gregorio Joya Dávila



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/>).

crops of an irrigation module, using meteorological and physiological information for the Baseline (LB) and hydrometric, agricultural, and water footprint data for the Real Condition (CR). The research was empirical-associative in nature, with a non-experimental design, and analyzed agricultural and hydrometric statistics as well as water footprints (green, blue, and total) under both LB and CR scenarios. Furthermore, meteorological data simulated by the WXGEN climate generator were processed in the CROPWAT software to calculate crop irrigation requirements in both scenarios. The results include four mathematical expressions for calculating the TWSI and the WREI. Under LB, the module's total water footprint was $12\,504.57\text{ m}^3\text{ Mg}^{-1}$, while under CR it was $8\,075.78\text{ m}^3\text{ Mg}^{-1}$. The average TWSI was 45.43%, and the average WREI was 54.57%. The main limitations were the lack of *in situ* measured meteorological and physiological data. Nevertheless, the TWSI and WREI indices proved to be effective tools for quantifying total water stress and irrigation requirement efficacy, since the TWSI and WREI, calculated using the potential water footprints of the Baseline (LB) and the real water footprints of the Real Condition (CR), provided a robust methodological framework for sustainable water management in irrigated agriculture under conditions of water scarcity and climatic variability.

Index words: irrigated agriculture, water color (green, blue, grey), efficient water management, sustainable water management, water resources in agriculture.

INTRODUCCIÓN

La agricultura de riego utiliza aproximadamente el 70% del agua dulce extraída a nivel global (FAO, 2017a, b) y el 76% en México (CONAGUA, 2018). Esta enfrenta desafíos críticos debido a la creciente escasez hídrica aunada a las bajas eficiencias de riego. La elaboración de estudios de investigación sobre las dosis óptimas de aplicación en conjunto con las láminas de riego, con base en los sistemas de riego utilizados en el área agrícola es una de las estrategias para disminuir las pérdidas de agua (Buenrostro-Curiel *et al.* 2025). Esta situación afecta negativamente la productividad agrícola y compromete tanto la seguridad alimentaria como los medios de vida de los agricultores, especialmente en regiones con alta variabilidad climática (Banco Mundial, 2010; Raj, Roodbar, Brinkley y Wolfe, 2022).

La medición y gestión del estrés hídrico en cultivos han evolucionado significativamente desde que Selye (1936) introdujo el concepto de estrés en el año de 1936. Este término fue adaptado al ámbito vegetal por Levitt (1980), quien definió el estrés hídrico como una condición ambiental que limita el desarrollo fisiológico de las plantas y afecta su productividad. Este enfoque inicial marcó el inicio de un amplio desarrollo metodológico que forma parte del estado del arte, lo cual incluye herramientas como el Índice de Estrés Hídrico del Cultivo (CWSI, Crop Water Stress Index, por sus siglas en inglés) de Idso, Jackson, Pinter, Reginato y Hatfield (1981). El cual se basa en la temperatura del dosel como indicador del nivel de estrés. Validado en estudios empíricos como los de López, Arteaga, Vázquez, López y Sánchez (2009) y Vories *et al.* (2021), el CWSI ha demostrado ser una herramienta clave para la programación del riego en contextos agrícolas diversos.

Paralelamente, los avances en la estimación de los requerimientos de agua de los cultivos han sido esenciales para la gestión eficiente del riego. Modelos como el de Blaney y Criddle (1950) y Hargreaves y Samani (1985) sentaron las bases para esta estimación, sin embargo, fue el método FAO Penman-Monteith (Allen, Pereira, Raes y Smith, 2006) el que estableció un estándar robusto para calcular la evapotranspiración de referencia (ET_o), definiendo así el estado del arte en los métodos para su cálculo. Este método, complementado con coeficientes de cultivo (K_c) ajustados a fases fenológicas y descrito ampliamente en el Manual FAO 56 (Allen *et al.*, 2006), ha sido validado en estudios empíricos en Asia Central (Zhang, Kimball, Nemani y Running, 2010), demostrando su utilidad para optimizar el uso del agua en regiones con alta variabilidad climática.

El concepto de huella hídrica introducido por Hoekstra, Chapagain, Aldaya y Mekonnen (2009) marcó un cambio paradigmático en el análisis del uso del agua en la producción agrícola. Este enfoque considera componentes verde, azul y gris para medir el consumo de agua a lo largo de toda la cadena de producción. Estudios como los de Mekonnen y Hoekstra (2011) han identificado cultivos como trigo, arroz y maíz con las mayores huellas hídricas en regiones con déficits de agua. Recientemente, investigaciones como las de Xinchun *et al.* (2017) y Yan, Wang, Chen, Zhang y Sun (2023) han refinado este concepto, consolidando el estado del arte en indicadores como el AWSI (Agricultural Water Stress Index) y los IT (Índices Tridimensionales), para evaluar la sostenibilidad hídrica, integrando dimensiones ambientales y económicas.

Por otro lado, la Eficiencia del Riego (ER) ha sido un área crítica en la investigación agrícola. Israelsen (1932) fue pionero en el desarrollo de métodos para medir la eficiencia del riego, mientras que estudios contemporáneos como los de Burt *et al.* (1997) y Howell (2005) han establecido modelos que consideran la eficiencia de conducción, distribución y aplicación. El estado del arte en este tema se enfoca en el uso de tecnologías avanzadas, como inteligencia artificial y el empleo de vehículos aéreos no tripulados (UAVs, Unmanned Aerial Vehicles, por sus siglas en inglés), que han permitido ajustar en tiempo real la gestión hídrica, optimizando su uso en regiones áridas (Sherif, Singh, Sefelnasr y Abrar, 2023). Para modelar la escasez de agua para riego se definieron dos escenarios operativos del riego en la presente investigación: Línea Base (LB): Representa el suministro hídrico ideal, en el que los cultivos reciben la cantidad completa de agua necesaria para un óptimo desarrollo. Condición Real (CR): Refleja el manejo del riego en campo, incorporando limitaciones en la disponibilidad de agua, eficiencia del sistema y otros factores operativos. En este contexto se definen dos índices claves: TWSI (Total Water Stress Index): Un indicador que cuantifica, de forma integral, el déficit de suministro de agua en relación con el potencial teórico, evaluando el estrés hídrico acumulado durante todo el ciclo productivo del cultivo. WREI (Water Requirement Efficiency Index): Un indicador que mide la eficacia con que el agua aplicada (tanto de fuentes naturales, precipitación efectiva) como artificiales (riego), satisface los requerimientos hídricos del cultivo.

A pesar de los avances en la evaluación del estrés hídrico y la eficiencia del riego mediante índices como el CWSI, AWSI, ER e IT, persisten limitaciones significativas. Estos índices no integran el estrés hídrico acumulado a lo largo del ciclo agrícola ni las huellas hídricas reales bajo condiciones de escasez. Tampoco existe un marco metodológico que combine huellas hídricas teóricas y reales en escenarios de LB y CR. Lo que limita la capacidad de diseñar estrategias resilientes para la gestión hídrica. Por lo tanto, el objetivo general de esta investigación fue evaluar el TWSI y la WREI en los cultivos agrícolas de un módulo de riego. Para ello se utilizó información meteorológica y fisiológica para elaborar la LB. Esto se complementó con información hidrométrica, datos de producción agrícola y huellas hídricas de los cultivos para estimar la CR. Además se desarrollaron cinco objetivos específicos que consistieron en: (1) Evaluar la distribución de la producción agrícola en el módulo de riego; (2) Evaluar los requerimientos netos (RRn) y brutos de riego (RRb) en la LB; así como las láminas de riego netas (LRNa) y brutas aplicadas (LRBa) a los cultivos en la CR; (3) Evaluar los volúmenes de agua netos (CWUNrLB) y brutos requeridos (CWUBrLB) por los cultivos en la LB; así como los volúmenes de agua netos (CWUNaCR) y brutos aplicados (CWUBaCR) a los cultivos en la CR; (4) Evaluar las huellas hídricas potenciales verde, azul y total de los cultivos en la LB; así como las huellas hídricas reales verde, azul y total en la CR, y (5) Evaluar el TWSI y el WREI para los cultivos del módulo de riego, utilizando las expresiones matemáticas deducidas en el presente estudio. La hipótesis central plantea que el TWSI y la WREI pueden ser evaluados de manera efectiva en los cultivos agrícolas de un módulo de riego, mediante un enfoque comparativo que integre información meteorológica y fisiológica para la Línea Base (LB), así como, empleando información hidrométrica, estadísticas de producción agrícola y huellas hídricas de los cultivos para la Condición Real (CR).

MATERIALES Y MÉTODOS

Selección de Participantes

El análisis se focalizó en los cultivos cíclicos establecidos en el Módulo de Riego III-4 a lo largo de los ciclos agrícolas 2002-2003 a 2019-2020: Maíz amarillo y blanco (*Zea mays* L.), sorgo grano (*Sorghum spp.*), algodón (*Gossypium hirsutum* L.), soya frijol (*Glycine max* L.) y pasto rye grass (*Lolium multiflorum* L.).

Diseño y Tipo de Investigación

Este estudio adoptó un enfoque cuantitativo, con un diseño no experimental y de carácter empírico-asociativo. El tipo de investigación es aplicada.

Técnicas de Recolección de Datos

Para la recolección de datos se emplearon: observación directa, entrevistas estructuradas, encuestas, análisis del repositorio de datos secundarios (incluyendo información hidrométrica, agrícola y meteorológica), y análisis geoespacial mediante QGIS (QGIS.org, 2021), utilizado para mapear el riego, la producción agrícola y la infraestructura hidroagrícola.

Instrumentos de Medición

Los datos fueron recolectados utilizando estaciones meteorológicas y molinetes hidrométricos para la medición de caudales en canales de riego. Las mediciones se realizaron mediante el uso de variables métricas y nominales, garantizando la precisión y consistencia en la captura de la información.

Procedimientos (Escenarios y Fases)

El estudio se desarrolló en dos fases principales: La Fase de Campo incluyó la realización de recorridos en el área de estudio, entrevistas con el personal del módulo y la recopilación de datos directamente en sitio. Posteriormente, la Fase de Gabinete comprendió el análisis del repositorio de datos secundarios, la definición de los escenarios de *LB* y *CR*, así como, la deducción de los índices TWSI y WREI mediante el desarrollo de expresiones matemáticas.

Análisis Estadísticos

Se realizaron análisis descriptivos (tablas, gráficos de frecuencias, medidas de tendencia central y dispersión) y se evaluó la normalidad de las variables mediante la prueba Shapiro y Wilk (1965). En el análisis inferencial, se aplicó ANOVA de una vía para comparar variables métricas dentro de cada escenario (*LB* o *CR*) correspondientes a los objetivos 1, 2, 3 y 5; y, para el objetivo 4, se utilizó la prueba T para muestras emparejadas para detectar diferencias entre *LB* y *CR*. La homogeneidad de varianzas se verificó mediante la prueba de Levene, y se realizaron análisis post hoc (Tukey y Games-Howell) según el valor del estadístico de Levene. Todos los análisis se efectuaron utilizando SPSS (IBM SPSS Statistics 2022), JAMOVI (The jamovi project, 2021), G*Power (Faul, Erdfelder, Buchner y Lang, 2009) y Microsoft Excel®.

Descripción del Área de Estudio

El área de estudio, correspondiente al Módulo de Riego III-4 "Hidráulica Los Ángeles, A.C.", pertenece al Distrito de Riego 025 Bajo Río Bravo Tamaulipas (DR-025) (Figura 1a). Este módulo de riego se encuentra localizado al oeste del DR-025 (Figura 2b), abarca 22 833.44 ha, organizadas en 10 secciones de riego. Opera una red de 40 canales, que en total tienen una longitud de 156.67 km, cuenta con 8 drenes que miden 70.305 km (ANUR, 2020) (Figura 2a). El suministro de agua en el módulo proviene de la presa internacional "La Amistad" y es distribuido a través de la presa Falcón y el canal Anzalduas, cuya operación está a cargo de la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA, 2024). Este módulo se encuentra dentro de la región hidrológica 24 "Bravo-Conchos" y utiliza aguas superficiales y subterráneas provenientes del acuífero Río Bravo (CONAGUA, 2024) (Figura 1b).

Descripción Biofísica del Módulo III-4

Suelos. En el Módulo III-4 se identificaron siete tipos principales de suelos según la clasificación WRB 2014 Serie II: la combinación *Chernozem vértico sódico-Vertisol pélico cálcico-Chernozem lúvico cálcico* abarca 12 745.17 ha (53.68%); *Chernozem cálcico vértico-Vertisol hiposódico cálcico* se extiende por 4 293.86 ha (18.08%); *Chernozem lúvico cálcico-Chernozem hiposódico vértico* comprende 2965.47 ha (12.49%); los *Vertisoles pélicos hiposódicos* ocupan 2527.03 ha (10.64%); *Chernozem cálcicos vérticos-Vertisoles hiposódicos pélicos* abarcan 753.45 ha (3.17%); *Vertisoles cálcicos endogléticos-Chernozem lúvicos cálcicos-Chernozem hiposódicos cálcicos* se distribuyen en 451.40 ha (1.90%); y *Chernozem lúvicos cálcicos-Vertisoles cálcicos-Chernozem hiposódicos cálcicos* se limitan a 4.71 ha (0.02%) (INEGI, 2014a). Figura 3a.

Diagrama ombrotérmico. El diagrama ombrotérmico refleja un periodo seco prolongado en el que, durante la mayor parte del año, la precipitación es inferior al doble de la temperatura media, con la única excepción en septiembre. Este comportamiento resalta el marcado déficit hídrico estacional característico de la región (Gausson y Bagnouls, 1957) Figura 3b.

Climas. El área de estudio se caracteriza por la presencia de dos tipos de climas: templado semicálido subhúmedo y seco cálido semiseco, ambos con lluvias concentradas en verano y menos del 5% de precipitación durante el invierno. La temperatura media anual en la región es de 22.7 °C, alcanzando una máxima promedio de 28.7 °C. La precipitación anual promedio es de 682.69 mm, mientras que la evapotranspiración potencial anual promedio asciende a 1 844 mm (INEGI, 2014b; Vargas, Hernández, Gutiérrez, Plácido y Jiménez 2007; CONAGUA, 2012).

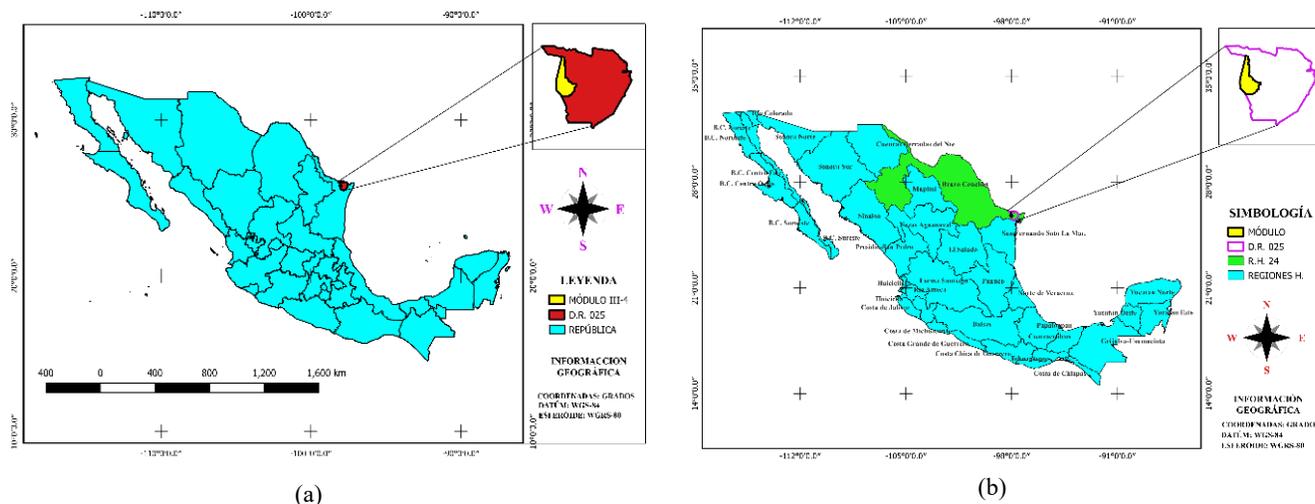


Figura 1. Ubicación nacional del Distrito de Riego 025 Bajo Río Bravo y caracterización hidrológica del Módulo de Riego III-4: (a) Localización nacional del Módulo de Riego III-4; (b) Caracterización hidrológica del Módulo de Riego III-4.
Figure 1. National location of Irrigation District 025 Bajo Río Bravo and hydrological characterization of Irrigation Module III-4: (a) National location of Irrigation Module III-4; (b) Hydrological characterization of Irrigation Module III-4.

Localización de las Estaciones Meteorológicas

Para el análisis agroclimático del área de estudio, se utilizaron datos provenientes de tres estaciones meteorológicas. La estación S.J. 3-47 Río Bravo (1951-2010) (25.96° N, 98.13° O) (SMN, 2020), cuya información se considera representativa para áreas comprendidas entre un radio mínimo de 3.1 km y un radio máximo de 100 km (NMX-AA-166/2-SCFI-2015) (SECOFI, 2015); la simulación realizada mediante el generador climático WXGEN del modelo SWAT (1979-2014) (25.77° N, 98.02° O); y la estación Automatizada del Módulo III-4 (2016-2020) (25.95° N, 98.04° O). Las tres fuentes proporcionaron información climática con resoluciones diaria, mensual y anual.

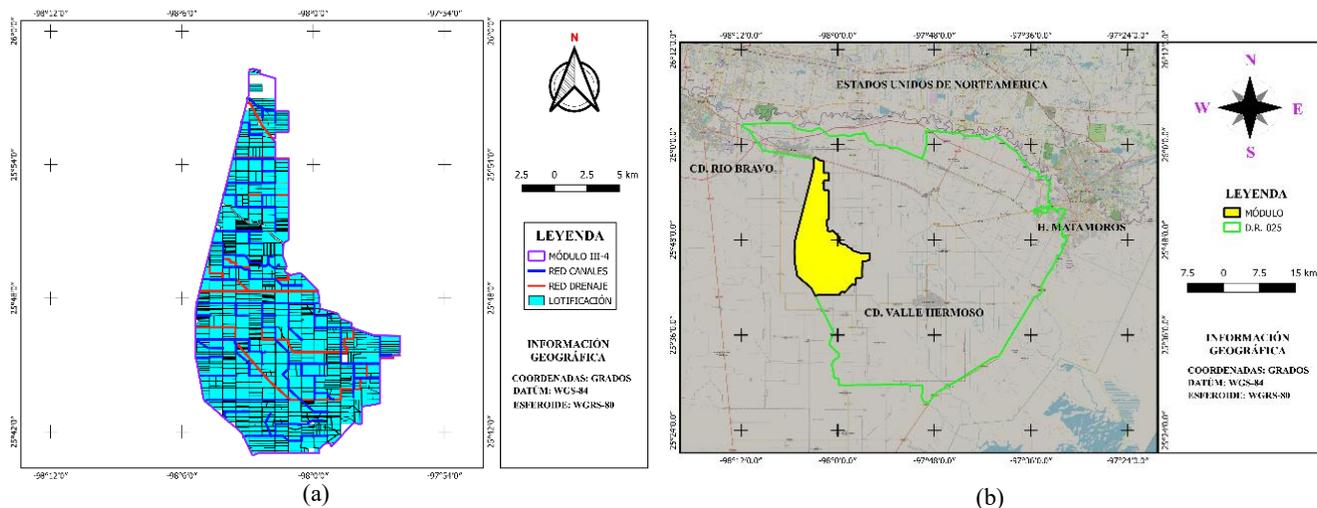


Figura 2. Localización distrital e infraestructura hidroagrícola del Módulo de Riego III-4: (a) Configuración espacial de la infraestructura hidroagrícola del Módulo de Riego III-4; (b) Microlocalización del Módulo de Riego III-4.
Figure 2. District location and hydro-agricultural infrastructure of Irrigation Module III-4: (a) Spatial configuration of the hydro-agricultural infrastructure of Irrigation Module III-4; (b) Microlocalization of Irrigation Module III-4.

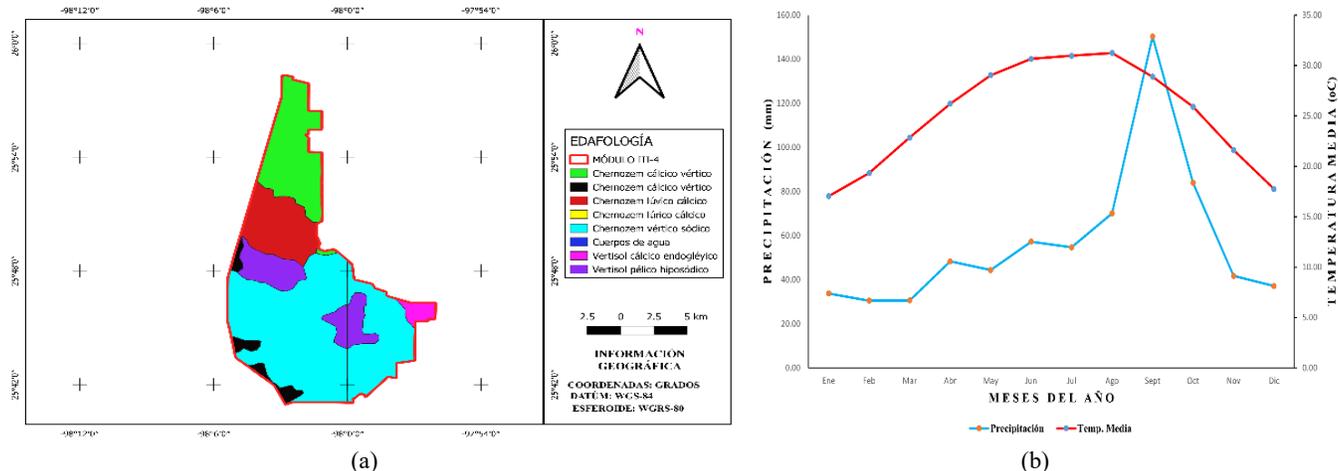


Figura 3. Caracterización edafológica y climática del Módulo III-4: (a) Clasificación de suelos predominantes en el Módulo III-4 según la WRB-2014; (b) Diagrama ombrotérmico relación precipitación y temperatura media anual Módulo III-4.
Figure 3. Soil and climatic characterization of Module III-4: (a) Predominant soil classification in Module III-4 based on WRB-2014; (b) Ombrothermic diagram relationship between precipitation and annual mean temperature Module III-4.

Ciclos y Subciclos de Producción Agrícola

Se analizaron estadísticas de producción agrícola del Módulo de Riego, abarcando ocho ciclos (2012-2013 a 2019-2020) y estadísticas hidrométricas de 18 ciclos (2002-2003 a 2019-2020), evaluando superficies regadas, volúmenes netos y brutos, láminas de riego y eficiencia (calculadas por el personal del módulo y supervisadas por CONAGUA). La diferencia en los ciclos estudiados se debió a la disponibilidad de datos. La información la organiza el Módulo de Riego III-4 con los formularios denominados EAS de CONAGUA (Hidráulica Los Ángeles, A.C., 2020¹). Los rendimientos óptimos se obtuvieron de los paquetes tecnológicos desarrollados por el Centro de Investigación Regional del Noreste, específicamente en el Campo Experimental Río Bravo del INIFAP (INIFAP, 2023).

Cálculo de la Evapotranspiración del Cultivo de Referencia (ET_o)

Para estimar la evapotranspiración del cultivo de referencia (ET_o) en el Módulo de Riego III-4 se aplicó el método FAO Penman-Monteith (Allen *et al.*, 2006) utilizando el software CropWat 8.0. (FAO, 2010). Con este programa se procesaron datos de tres estaciones meteorológicas (temperatura máxima y mínima, humedad relativa, velocidad del viento e insolación) para calcular la ET_o mediante la Ecuación 1:

$$ET_o = \frac{0.408 \Delta (R_n - G) + \gamma \frac{900}{T + 273} u_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma (1 + 0.34 u_2)} \quad (1)$$

Donde: ET_o es la Evapotranspiración del cultivo de referencia, mm día⁻¹; R_n es la Radiación neta en la superficie del cultivo, MJ m⁻² día⁻¹; G es el Flujo del calor de suelo, MJ m⁻² día⁻¹; T es la Temperatura media del aire a 2 metros de altura, °C; u₂ es la Velocidad del viento a 2 metros de altura, m s⁻¹; e_s significa la presión de vapor de saturación, kPa; e_a es la Presión real de vapor, kPa; e_s-e_a es el déficit de presión de vapor, kPa; Δ es la pendiente de la curva de presión de vapor, kPa; γ es la Constante psicrométrica (kilopascales por grado Celsius, kPa °C⁻¹).

Cálculo de la precipitación efectiva (Pe)

La precipitación efectiva (Pe) se estimó utilizando el modelo FAO implementado en CropWat 8.0, que integra la precipitación total mensual para ofrecer resultados detallados y confiables (Allen *et al.*, 2006). Este software aplica el método del USDA (1970) para evaluar áreas agrícolas bajo riego, calculando mensualmente la Pe mediante las Ecuaciones 2, 3, 4, 5.

¹ Hidráulica Los Angeles, A.C. (2020). Estadística y Concentrado de Ciclos Anteriores en Cultivos y Volumen Utilizado. Ciudad Río Bravo, Tamaulipas, México: Hidráulica Los Angeles, A.C.

$$P_e = (1.25247 * P_t^{0.82416} - 2.93522) * 10^{0.00095*U} * f \quad (2)$$

Donde: P_e es la precipitación efectiva mensual, mm; P_t es la precipitación total mensual, mm; U es el uso consuntivo medio mensual, mm; Δ_s es la lámina de riego neta, mm; y f es una constante.

$$f = 0.531747 + 0.011621 * \Delta_s - ((8.9 * 10^{-5}) * \Delta_s^2) + (2.3 * 10^{-7} * \Delta_s^3) \quad (3)$$

Pt < 250 mm

$$P_e = P_t \left(125 - \frac{0.2 P_t}{125} \right) \quad (4)$$

Para Pt > 250 mm

$$P_e = 125 + 0.1 P_t \quad (5)$$

Cálculo de la Evapotranspiración del Cultivo (ETc)

La evapotranspiración del cultivo (ETc) se calculó para cada uno de los seis cultivos analizados en este estudio. El procedimiento incluyó, en primer lugar, la determinación de la evapotranspiración de referencia (ETo) para cada ciclo agrícola correspondiente a los cultivos estudiados, calculada como se explicó anteriormente. Posteriormente, se elaboraron gráficos detallados de los coeficientes de cultivo (Kc) para cada etapa fenológica. De acuerdo con la metodología del Manual 56 de la FAO (Allen *et al.*, 2006), la ETc fue calculada utilizando la Ecuación 6.

$$ET_c = ET_o * K_c \quad (6)$$

Donde: ETc es la Evapotranspiración del Cultivo en el periodo analizado, mm; ETo es la Evapotranspiración del Cultivo de Referencia en el periodo analizado, mm; Kc es el Coeficiente del Cultivo en el periodo analizado, adimensional.

Evapotranspiración Verde y Azul de los Cultivos en la CR

El cálculo de la evapotranspiración verde (ETverdeCR) se realizó para la Condición Real (CR) en los cultivos del módulo de riego. Estos valores se obtuvieron de acuerdo con la metodología reportada por Hoekstra *et al.* (2009). Se utilizó la Ecuación 7 para tal fin.

$$ET_{VerdeCR} = \text{Min}(ET_c, P_e) \quad (7)$$

Donde: $ET_{VerdeCR}$ = Evapotranspiración verde del cultivo en la Condición Real, mm; ET_c = Evapotranspiración del cultivo, mm; P_e = Precipitación efectiva, mm; Min = Representa el valor mínimo entre ETc y Pe

La evapotranspiración azul (ETAzulCR) se determinó utilizando la lámina de riego neta aplicada al cultivo. Este valor se obtuvo a partir de las estadísticas hidrométricas reportadas por el módulo de riego, las cuales son generadas conforme a los anexos de operación establecidos por la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA, 2018). Se utilizó la Ecuación 8 para obtener su valor.

$$ET_{AzulCR} = LRNa \quad (8)$$

Donde: ET_{AzulCR} = Evapotranspiración azul del cultivo en la Condición Real, mm; LRNa = Lámina de riego neta aplicada, mm.

Requerimientos Netos y Brutos de Riego (RRn y RRb)

Los requerimientos netos de riego (RRn) fueron calculados para los seis cultivos analizados en este estudio. El proceso incluyó, en primer lugar, la determinación de la precipitación efectiva (P_e) para cada etapa fenológica de los cultivos, tal como se explicó anteriormente. Posteriormente, los RRn se calcularon empleando la metodología propuesta por la FAO en el Boletín 56 (Allen *et al.*, 2006). Los requerimientos brutos de riego (RRb) se estimaron para cada uno de los seis cultivos estudiados. El cálculo consideró, en primer lugar, la eficiencia de riego (ER) reportada por el Módulo de Riego III-4, cuyo valor promedio histórico obtenido a partir de las estadísticas hidrométricas fue del 65%. De acuerdo con la metodología del Manual 56 de la FAO (Allen *et al.*, 2006) y la propuesta por Israelsen (1932), los requerimientos netos y brutos de riego se calcularon con la Ecuación 9 y 10 respectivamente.

$$RR_n = ET_C - P_e \quad (9)$$

Donde: RRn es el Requerimiento de Riego Neto del cultivo en el periodo analizado, mm; ET_C es la Evapotranspiración del Cultivo en el periodo analizado, mm; P_e es la Precipitación Efectiva en el periodo analizado (milímetros, mm).

$$RR_b = \frac{RR_n}{ER} \quad (10)$$

Donde: RRb es el Requerimiento de Riego Bruto en el periodo analizado, mm; RRn es el Requerimiento de Riego Neto en el periodo analizado, mm; ER es la Eficiencia de Riego promedio histórica del módulo, Fracción.

Láminas de Riego Netas y Brutas Aplicadas (LRNa y LRBa)

Las láminas de riego netas aplicadas (LRNa) fueron calculadas para los seis cultivos analizados a partir de los volúmenes netos de agua aplicados, reportados en la estadística hidrométrica del Módulo de Riego III-4. Para este cálculo, se utilizó la metodología propuesta por Israelsen (1932). Por otro lado, las láminas de riego brutas aplicadas (LRBa) fueron estimadas para cada uno de los cultivos considerando la eficiencia de riego (ER) media histórica del módulo, cuyo valor fue del 65% según las estadísticas hidrométricas del Módulo de Riego III-4. Dichos cálculos se realizaron con la Ecuación 11 y 12.

$$LRNa = \frac{CWUN_{ap}CR}{Sup} \quad (11)$$

Donde: LRNa es la lámina de riego neta aplicada al cultivo, mm; $CWUN_{ap}CR$ es el volumen neto aplicado al cultivo por hectárea en la Condición Real, $m^3 ha^{-1}$; Sup es la superficie de una hectárea regada (metros cuadrados, m^2).

$$LRBa = \frac{LRNa}{ER} \quad (12)$$

Donde: LRBa es la lámina de riego bruta aplicada al cultivo, mm; LRNa es la lámina de riego neta aplicada al cultivo, mm; ER es la eficiencia de riego promedio histórica del módulo, Fracción.

Volúmenes de Agua Netos y Brutos Requeridos por los Cultivos en la LB

Los volúmenes de agua netos requeridos ($CWUNrLB$) fueron calculados para los seis cultivos analizados utilizando los valores previamente determinados de la evapotranspiración del cultivo (ET_C). Este cálculo se realizó mediante la metodología propuesta en el Boletín 56 de la FAO (Allen *et al.*, 2006). Asimismo, los volúmenes de agua brutos requeridos ($CWUBrLB$) fueron estimados considerando la eficiencia de riego (ER) media histórica del módulo, cuyo valor fue del 65% de acuerdo con las estadísticas hidrométricas del Módulo de Riego III-4. Los cálculos se realizaron con las Ecuaciones 13 y 14.

$$CWUNrLB = \left(\frac{ET_c}{1000} \right) * Sup \quad (13)$$

Donde: CWUNrLB es el volumen de agua neto requerido por el cultivo en la LB, m³ ha⁻¹; ET_c es la Evapotranspiración del Cultivo en el periodo analizado, mm; Sup es la superficie de una hectárea, m².

$$CWUBrLB = \frac{CWUNrLB}{ER} \quad (14)$$

Donde: CWUBrLB es el volumen de agua bruto requerido por el cultivo en la LB, m³ ha⁻¹; CWUNrLB es el volumen de agua neto requerido por el cultivo en la LB, m³ ha⁻¹; ER es la eficiencia de riego promedio histórica del módulo, Fracción.

Volúmenes Netos de Agua Verde y Azul Requeridos por los Cultivos en la LB

Los volúmenes netos de agua verde y azul requeridos por los cultivos fueron calculados mediante la metodología propuesta en el Manual de Huellas Hídricas (Hoekstra et al. 2009); adaptando las ecuaciones a las condiciones de la Línea Base. Ecuación 15 y 16:

$$CWU_{vr}LB = \frac{Pe}{1000} * Sup \quad (15)$$

Donde: CWU_{vr}LB es el volumen de agua verde neto requerido por el cultivo en la LB, m³ ha⁻¹; Pe es la Precipitación Efectiva en el periodo analizado, mm; Sup es la superficie de una hectárea (10 000 metros cuadrados, m²).

$$CWU_{ar}LB = \frac{RRn}{1000} * Sup \quad (16)$$

Donde: CWU_{ar}LB es el volumen de agua azul neto requerido por el cultivo, m³ ha⁻¹; RRn es el Requerimiento de Riego Neto del cultivo en el periodo analizado, mm; Sup es la superficie de una hectárea, 10 000 m².

Volúmenes Netos de Agua Verde y Azul Aplicados a los Cultivos en la CR

Los volúmenes netos de agua verde y azul aplicados a los cultivos fueron calculados mediante la metodología propuesta en el *Manual de Huellas Hídricas* (Hoekstra et al. 2009); adaptando las ecuaciones a la Condición Real (CR). Ecuación 17 y 18:

$$CWU_{va}CR = \frac{Pe}{1000} * Sup \quad (17)$$

Donde: CWU_{va}CR es el volumen de agua verde neto aplicado al cultivo en la CR, m³ ha⁻¹; Pe es la Precipitación Efectiva en el periodo analizado, mm; Sup es la superficie de una hectárea, 10 000 m².

$$CWU_{ap}CR = \frac{LRNa}{1000} * Sup \quad (18)$$

Donde: CWU_{ap}CR es el volumen de agua azul neto aplicado al cultivo, m³ ha⁻¹; LRNa es la lámina de riego neta aplicada al cultivo, mm; Sup es la superficie de una hectárea, 10 000 m².

Volúmenes de Agua Netos y Brutos Aplicados a los Cultivos en la CR

Los volúmenes totales de agua netos aplicados a los cultivos en la CR (CWUNapCR) fueron estimados para los seis cultivos analizados, utilizando los volúmenes netos reportados en las estadísticas hidrométricas del Módulo de Riego III-4. Este cálculo se realizó mediante la metodología propuesta en el Boletín 56 de la FAO

(Allen *et al.*, 2006). De manera análoga, los volúmenes de agua brutos aplicados a los cultivos en la CR (CWUBapCR) se calcularon considerando la eficiencia de riego (ER) promedio histórica del módulo, cuyo valor fue del 65%, según las estadísticas hidrométricas del Módulo de Riego III-4. Los cálculos se realizaron con las Ecuaciones 19 y 20.

$$CWUNapCR = \left(\frac{Pe + LRNa}{1000} \right) * Sup \quad (19)$$

Donde: CWUNapCR es el volumen de agua neto aplicado al cultivo en la CR, m³ ha⁻¹; P_e es la Precipitación Efectiva en el periodo analizado, mm; LRNa es la lámina de riego neta aplicada al cultivo, mm. Sup es la superficie de una hectárea, 10 000 m².

$$CWUBapCR = \frac{CWUNapCR}{ER} \quad (20)$$

Donde: CWUBapCR es el volumen de agua bruto aplicado al cultivo en la CR, m³ ha⁻¹; CWUNapCR es el volumen de agua neto aplicado al cultivo en la CR, m³ ha⁻¹; ER es la eficiencia de riego promedio histórica del módulo, Fracción.

Huellas Hídricas de los Cultivos para la Línea Base (LB) y la Condición Real (CR)

La metodología seguida en este estudio se fundamenta en el manual de huellas hídricas (Hoekstra *et al.*, 2009), adaptando las ecuaciones a las condiciones de la Línea Base (LB) y la Condición Real (CR). Línea Base (LB): En la Línea Base, las huellas hídricas de los cultivos se calcularon como el cociente entre el volumen de agua requerido y el rendimiento potencial del cultivo (Ecuaciones 21, 22, 23). Condición Real (CR): En la Condición Real, se consideraron los volúmenes de agua aplicados y los rendimientos reales de los cultivos (Ecuaciones 24, 25, 26).

Línea Base (LB)

Huellas hídricas verdes (HHvLB).

$$HHvLB = \frac{CWUvrLB}{RPcLB} \quad (21)$$

Donde: HHvLB es la huella hídrica verde del cultivo en la LB, m³ Mg⁻¹; CWUvrLB es el volumen de agua verde neto requerido por el cultivo en la LB, m³ ha⁻¹; RPcLB es el rendimiento potencial del cultivo en la LB (megagramos por hectárea Mg ha⁻¹).

Huellas hídricas azules (HHaLB)

$$HHaLB = \frac{CWUarLB}{RPcLB} \quad (22)$$

Donde: HHaLB es la huella hídrica azul del cultivo en la LB, m³ Mg⁻¹; CWUarLB es el volumen de agua azul neto requerido por el cultivo, m³ ha⁻¹; RPcLB es el rendimiento potencial del cultivo en la LB, Mg ha⁻¹.

Huellas hídricas totales (HHtLB)

$$HHtLB = \frac{CWUNrLB}{RPcLB} \quad (23)$$

Donde: HHtLB es la huella hídrica total del cultivo en la LB, m³ Mg⁻¹; CWUNrLB es el volumen de agua neto total requerido por el cultivo en la LB, m³ ha⁻¹; RPcLB es el rendimiento potencial del cultivo en la LB, Mg ha⁻¹.

Condición Real (CR)**Huellas hídricas verdes (HHvCR)**

$$HHvCR = \frac{CWUvaCR}{RPcCR} \quad (24)$$

Donde: HHvCR es la huella hídrica verde del cultivo en la CR, m³ Mg⁻¹; CWUvaCR es el volumen de agua verde neto aplicado al cultivo en la CR, m³ ha⁻¹; RPcCR es el rendimiento promedio del cultivo en la CR, Mg ha⁻¹.

Huellas hídricas azules (HHaCR)

$$HHaCR = \frac{CWUapCR}{RPcCR} \quad (25)$$

Donde: HHaCR es la huella hídrica azul del cultivo en la CR, m³ Mg⁻¹; CWUapCR es el volumen de agua azul neto aplicado al cultivo en la CR, m³ ha⁻¹; RPcCR es el rendimiento promedio del cultivo en la CR, Mg ha⁻¹.

Huellas hídricas totales (HHtCR)

$$HHtCR = \frac{CWUNapCR}{RPcCR} \quad (26)$$

Donde: HHtCR es la huella hídrica total del cultivo en la CR, m³ Mg⁻¹; CWUNapCR es el volumen de agua neto total aplicado al cultivo, m³ ha⁻¹; RPcCR es el rendimiento promedio del cultivo en la Cr, Mg ha⁻¹

Índice de Estrés Hídrico Total (TWSI) e Índice de Eficiencia del Requerimiento de Riego (WREI)

Para desarrollar y formular las expresiones matemáticas que permiten calcular el TWSI y el WREI, se consideraron dos escenarios de manejo del riego en los cultivos analizados: Línea Base (LB): Representa un suministro ideal de agua de riego, asegurándose que los cultivos reciban la cantidad óptima de agua para su desarrollo. Condición Real (CR): Refleja el suministro de agua bajo las condiciones reales del Módulo de Riego, considerando la disponibilidad de agua y la eficiencia del sistema de riego. Para la LB, se calcularon variables fundamentales como la (ET_o), (ET_c), (ET_{verdeLB}), (ET_{azulLB}), (CWUN_{rLB}), (CWU_vrLB), (CWU_arLB), (RP_cLB), (HH_tLB), (HH_vLB) (HH_aLB). Estas variables se calcularon a partir de datos meteorológicos y fisiológicos de los cultivos. Para la CR, se emplearon datos hidrométricos y de producción agrícola del módulo para calcular las mismas variables, adaptadas a las condiciones reales de manejo. Una vez calculadas las variables antes mencionadas para ambos escenarios (LB y CR) para los seis cultivos estudiados, se procedió a deducir las expresiones matemáticas del TWSI y el WREI mediante un análisis de proporciones relativas normalizadas (APRN) de las variables ET_c, Pe, LRN, CWU y las huellas hídricas calculadas en ambos escenarios.

Índice de Estrés Hídrico Total (TWSI). Se dedujeron cuatro expresiones matemáticas para calcular el TWSI, cada una basada en diferentes variables: Ecuación 27, 28, 29, 30.

TWSI en función de la ET_c (TWSI_{etc})

$$TWSI_{etc} = 100 - \left\{ \left[\frac{ET_{verdeCR} + ET_{azulCR}}{ET_c} \right] * 100 \right\} \quad (27)$$

Donde: TWSI_{etc} es el índice de estrés hídrico total del cultivo en función de la ET_c, %; ET_{verdeCR} es la evapotranspiración verde del cultivo en la CR, mm; ET_{azulCR} es la evapotranspiración azul del cultivo en la CR, mm; ET_c es la Evapotranspiración del Cultivo en el periodo analizado, mm.

TWSI en función de la Pe (TWSI_{pe})

$$TWSI_{pe} = 100 - \left\{ \left[\frac{Pe + LRNa}{ETc} \right] * 100 \right\} \quad (28)$$

Donde: TWSI_{pe} es el índice de estrés hídrico total del cultivo en función de la Pe, %; Pe es la Precipitación Efectiva en el periodo analizado, mm; LRNa es la lámina de riego neta aplicada al cultivo, mm; ETc es la Evapotranspiración del Cultivo en el periodo analizado, mm.

TWSI en función de los CWU (TWSI_{cwu})

$$TWSI_{cwu} = 100 - \left\{ \left[\frac{CWU_{vaCR} + CWU_{apCR}}{CWUNrLB} \right] * 100 \right\} \quad (29)$$

Donde: TWSI_{cwu} es el índice de estrés hídrico total del cultivo en función de los CWU, %; CWU_{vaCR} es el volumen neto de agua verde aplicada al cultivo en la CR, m³ ha⁻¹; CWU_{apCR} es el volumen neto de agua azul aplicada al cultivo en la CR, m³ ha⁻¹; CWUNrLB es el volumen neto de agua requerido por el cultivo en la LB, (metros cúbicos por hectárea (metros cúbicos por hectárea, m³ ha⁻¹).

TWSI en función de las HH (TWSI_{hh})

$$TWSI_{hh} = 100 - \left\{ \left[\frac{HHvCR + HHaCR}{HHtLB} \right] * 100 \right\} \quad (30)$$

Donde: TWSI_{hh} es el índice de estrés hídrico total del cultivo en función de las huellas hídricas, %; HHvCR es la huella hídrica verde del cultivo en la CR, m³ Mg⁻¹; HHaCR es la huella hídrica azul del cultivo en la CR, m³ Mg⁻¹; HHtLB es la huella hídrica total del cultivo en la LB, m³ Mg⁻¹.

Índice de eficiencia del requerimiento de riego (WREI). El WREI evalúa la eficiencia del suministro de agua para satisfacer el requerimiento hídrico de los cultivos. Se dedujeron cuatro expresiones matemáticas basadas en diferentes variables; Ecuación 31, 32, 33, 34.

WREI en función de la ETc (WREI_{etc})

$$WREI_{etc} = \left\{ \left[\frac{ET_{verdeCR} + ET_{azulCR}}{ETc} \right] * 100 \right\} \quad (31)$$

Donde: WREI_{etc} es el índice de Eficiencia del Requerimiento de Riego en función de la ETc, %; ET_{verdeCR} es la evapotranspiración verde del cultivo en la CR, mm; ET_{azulCR} es la evapotranspiración azul del cultivo en la CR, mm; ETc es la Evapotranspiración del Cultivo en el periodo analizado, mm.

WREI en función de la Pe (WREI_{pe})

$$WREI_{pe} = \left\{ \left[\frac{Pe + LRNa}{ETc} \right] * 100 \right\} \quad (32)$$

Donde: WREI_{pe} es el índice de Eficiencia del Requerimiento de Riego en función de la Pe, %; P_e es la Precipitación Efectiva en el periodo analizado, mm; LRNa es la lámina de riego neta aplicada al cultivo, mm; ETc es la Evapotranspiración del Cultivo en el periodo analizado, mm.

WREI en función de los CWU (WREI_{cwu})

$$WREI_{cwu} = \left\{ \left[\frac{CWU_{vaCR} + CWU_{apCR}}{CWUNrLB} \right] * 100 \right\} \quad (33)$$

Donde: WREI_{cwu} es el índice de Eficiencia del Requerimiento de Riego en función de los CWU, %, CWU_{verdeCR} es el volumen neto de agua verde aplicada al cultivo en la CR, m³ ha⁻¹, CWU_{azulaplCR} es el volumen neto de agua azul aplicada al cultivo en la Cr, m³ ha⁻¹, CWU_{Nr} es el volumen neto de agua requerido por el cultivo, m³ ha⁻¹.

WREI en función de las HH (WREI_{hh})

$$WREI_{hh} = \left\{ \left[\frac{HHvCR + HHaCR}{HHtLB} \right] * 100 \right\} \quad (34)$$

Donde: WREI_{hh} es el índice de Eficiencia del Requerimiento de Riego en función de las huellas hídricas, %; HHvCR es la huella hídrica verde del cultivo en la CR, m³ tn⁻¹; HHaCR es la huella hídrica azul del cultivo en la CR, m³ Mg⁻¹; HHtLB es la huella hídrica total del cultivo en la LB, m³ Mg⁻¹.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Distribución de la Producción Agrícola en el Módulo de Riego

Superficies. La aplicación de la prueba ANOVA indicó diferencias significativas entre las superficies sembradas ($p < 0.001$). La verificación de la normalidad, mediante la prueba de Shapiro-Wilk ($p > 0.05$), respaldó el uso de procedimientos paramétricos; la prueba de Levene evidenció heterogeneidad de varianzas ($p < 0.001$), lo cual justificó el uso de la prueba post hoc de Games-Howell. Este análisis reveló diferencias significativas entre maíz blanco y sorgo; sorgo y algodón; sorgo y soya; sorgo y pastos; y, finalmente, soya y pastos. El sorgo grano ocupa la mayor superficie con un promedio de 11 765.38 ha ($> 60\%$ del total), luego el maíz amarillo (5 462.53 ha) y, en menor proporción, la soya frijol (58.93 ha). Estos resultados se alinean con estudios previos (Montes-García *et al.*, 2014). Para mayor detalle ver Cuadro 1.

Rendimientos: La aplicación de la prueba ANOVA indicó diferencias significativas entre los rendimientos ($p < 0.001$). La verificación de la normalidad se realizó mediante la prueba de Shapiro-Wilk ($p > 0.05$), la prueba de Levene evidenció homogeneidad de varianzas ($p = 0.591$), lo cual justificó el uso de la prueba post hoc de Tukey. Este análisis reveló diferencias significativas entre todos los cultivos, excepto entre maíz amarillo

Cuadro 1. Superficies sembradas por tipo de cultivo en el Módulo III-4.

Table 1. Cultivated areas by crop in Module III-4.

Ciclo agrícola	Maíz-Amarillo	Maíz-Blanco	Sorgo-Grano	Algodón	Soya-Frijol	Rye-Gras	Total
----- ha -----							
2012-2013	1097.76	-	19 033.00	10.00	85.50	-	20 226.26
2013-2014	824.87	-	18 685.48	609.80	19.50	-	20 139.65
2014-2015	8934.60	-	1420.87	-	51.00	-	10 406.47
2015-2016	10 908.62	-	8148.97	793.55	77.00	-	19 928.14
2016-2017	3486.78	-	14 547.00	2065.22	88.50	-	20 187.50
2017-2018	9612.52	-	7991.85	2372.50	65.00	5.00	20 041.87
2018-2019	8260.70	1163.66	7945.39	2693.35	20.00	5.00	20 088.10
2019-2020	574.39	422.26	16 350.48	1529.59	64.90	-	18 941.62
Media	5462.53	792.96	11 765.38	1439.14	58.93	5.00	18 744.95
DE (ha)	4393.56	524.24	6306.29	999.28	27.02	0.00	3394.86
CV (%)	0.80	0.66	0.53	0.69	0.46		0.18

Los valores corresponden a los ciclos en los que se estableció cada cultivo; "-" indica que no hubo establecimiento del cultivo en ese ciclo. DE = desviación estándar; CV = coeficiente de variación.

The values correspond to the cycles in which each crop was established; "-" indicates that the crop was not established in that cycle. SD = standard deviation; CV = coefficient of variation.

con maíz blanco, sorgo con algodón, algodón con soya, algodón con pastos y soya con pastos. El maíz blanco alcanzó el rendimiento más alto (7.115 Mg ha⁻¹), seguido del maíz amarillo (6.719 Mg ha⁻¹) y el sorgo grano (4.610 Mg ha⁻¹), mientras que la soya frijol presentó el rendimiento más bajo (2.200 Mg ha⁻¹). La ventaja en productividad, atribuida al uso de riego complementario, respalda la eficacia de estas prácticas en la región (Montes-García *et al.*, 2014). Cuadro 2.

Producción económica. La aplicación de la prueba ANOVA indicó diferencias significativas en la producción económica entre los cultivos ($p = 0.003$). La normalidad de los datos fue confirmada mediante la prueba de Shapiro-Wilk ($p > 0.05$); sin embargo, la prueba de Levene evidenció heterogeneidad de varianzas ($p < 0.001$), lo cual justificó el empleo de la prueba post hoc de Games-Howell para las comparaciones múltiples. Este análisis reveló diferencias significativas entre los siguientes pares de cultivos: maíz blanco versus sorgo, sorgo versus soya, sorgo versus pastos y soya versus pastos. En promedio, la producción económica del módulo fue de \$387.48 millones de pesos, destacándose el sorgo grano (\$163.296 millones) y el maíz amarillo (\$131.089 millones) como los principales generadores de valor, mientras que el pasto rye-grass aportó significativamente menos (\$0.016 millones) (Montes-García *et al.*, 2014). Para mayor detalle se remite al Cuadro 3.

Requerimientos de riego netos y brutos. Los RRn y RRb fueron mayores en algodón y menores en pastos. Las DE para los RRn variaron entre 21.16 mm y 46.82 mm, reflejando estabilidad en los datos, respaldada por un bajo CV (0.05 en todos los cultivos). La prueba de Shapiro-Wilk confirmó la normalidad de las variables ($p > 0.05$), y la ANOVA mostró diferencias significativas entre cultivos ($p = 0.001$). Se asumió homogeneidad de varianzas según la prueba de Levene ($p = 0.936$). La prueba post hoc de Tukey reveló diferencias significativas entre algodón y todos los cultivos, así como, entre pastos y los demás. Los resultados indican que las características fisiológicas de los cultivos influyen en sus demandas hídricas: el algodón, con mayor demanda y ciclo largo, registró los valores más altos, mientras que los pastos, con menor demanda y ciclo corto, tuvieron los más bajos, en concordancia con Allen *et al.* (2006). Estos resultados se detallan en el Cuadro 4.

Láminas de riego netas y brutas aplicadas. Los pastos registraron las mayores LRNa y LRBa, con promedios de 366.15 mm y 516.93 mm, respectivamente, mientras que el sorgo tuvo los valores más bajos (175.79 mm LRNa y 270.44 mm LRBa). Las DE fueron mayores en pastos y menores en el maíz blanco (MB), reflejando estabilidad en MB y mayor dispersión en pastos. La prueba Shapiro-Wilk confirmó la normalidad de las variables ($p > 0.05$), pero la prueba de Levene indicó varianzas heterogéneas ($p < 0.05$), lo que requirió el uso de Games-Howell en las comparaciones post hoc. El ANOVA mostró diferencias significativas en LRNa ($p = 0.020$), con sorgo registrando valores menores frente a maíz blanco y pastos. Para LRBa, no hubo diferencias significativas ($p = 0.059$), sin embargo, está muy cerca del umbral. Los resultados reflejan que pastos, con ciclos extensos, tuvo mayores

Cuadro 2. Rendimientos promedios de los cultivos del Módulo III-4.
Table 2. Average yields of crops in Module III-4.

Ciclo agrícola	Maíz-Amarillo	Maíz-Blanco	Sorgo-Grano	Algodón	Soya-Frijol	Rye-Gras
----- Mg ha ⁻¹ -----						
2012-2013	6.188	-	4.754	2.200	1.839	-
2013-2014	7.992	-	5.810	4.289	-	-
2014-2015	6.933	-	5.353	-	2.618	-
2015-2016	8.110	-	4.780	3.310	1.800	-
2016-2017	5.710	-	4.730	3.670	1.080	-
2017-2018	7.160	-	4.140	3.260	3.060	1.180
2018-2019	6.580	7.890	3.890	4.130	2.500	1.700
2019-2020	5.080	6.340	3.420	2.650	2.500	"-"
Media	6.719	7.115	4.610	3.358	2.199	1.440
DE (Mg ha ⁻¹)	1.05	1.09	0.77	0.75	0.66	0.36
CV (%)	0.15	0.15	0.16	0.22	0.30	0.25

Cuadro 3. Producción económica de los cultivos del Módulo de Riego III-4.**Table 3: Economic production of crops in irrigation Module III-4.**

Ciclo agrícola	Maíz-Amarillo	Maíz-Blanco	Sorgo-Grano	Algodón	Soya-Frijol	Rye-Gras	Total
----- Mill. \$ -----							
2012-2013	24.455	-	299.403	0.221	1.242	-	325.321
2013-2014	25.051	-	306.054	20.660	-	-	351.765
2014-2015	213.087	-	22.588	-	0.801	-	236.477
2015-2016	269.754	-	109.032	28.884	1.113	-	408.784
2016-2017	60.701	-	187.388	72.047	0.650	-	320.786
2017-2018	272.478	-	118.073	97.243	1.668	0.013	489.746
2018-2019	173.174	26.305	88.123	143.719	0.355	0.019	431.695
2019-2020	10.014	9.335	175.706	45.061	1.152	-	241.268
Media	131.089	17.820	163.296	58.262	0.997	0.016	387.480
DE (Mill. \$)	113.352	11.999	100.056	49.719	0.431	0.004	
CV (%)	0.86	0.67	0.612	0.85	0.43	0.25	

láminas aplicadas, mientras que sorgo, de menor demanda hídrica, presentó los valores más bajos, en línea con Allen *et al.* (2006). Las diferencias en LRNa destacan la necesidad de estrategias de riego diferenciadas, mientras que la variabilidad en LRba sugiere optimizar prácticas en pastos mediante tecnologías más eficientes como el riego por aspersión. Estos resultados se detallan en el Cuadro 5.

Volúmenes netos y brutos requeridos por los cultivos. Los pastos presentaron los volúmenes netos (CWUNrLB) y brutos requeridos (CWUBrLB) más bajos, con promedios de 5678.31 m³ ha⁻¹ y 8735.85 m³ ha⁻¹, respectivamente. El algodón registró los valores más altos (11 546.28 m³ ha⁻¹ CWUNrLB y 17 763.51 m³ ha⁻¹ CWUBrLB), seguido del maíz blanco. Las DE oscilaron entre 298.86 m³ ha⁻¹ (pastos) y 607.70 m³ ha⁻¹ (algodón), con coeficientes de variación constantes (0.05). La prueba Shapiro-Wilk confirmó la normalidad de los datos ($p > 0.05$), y la prueba de Levene indicó homogeneidad de varianzas ($p > 0.05$), permitiendo usar Tukey para comparaciones post hoc. El ANOVA evidenció diferencias significativas entre cultivos para ambos parámetros ($p = 0.001$). Algodón mostró diferencias significativas frente a todos los cultivos, mientras que pastos destacó con los valores más bajos. Los resultados reflejan que algodón, con mayor demanda hídrica y ciclo largo, tuvo los mayores requerimientos, mientras que pastos presentó los menores, consistente con Allen *et al.* (2006). Estas diferencias subrayan la necesidad de ajustar estrategias de riego para optimizar la asignación de agua en escenarios de escasez hídrica. Estos resultados se detallan en el Cuadro 6.

Cuadro 4. Requerimientos de riego netos y brutos de los cultivos del Módulo III-4.**Table 4. Net and gross irrigation requirements for crops in Module III-4.**

PARÁMETRO	RRn						RRb					
	MA	MB	SORG	ALG	SOY	PAST	MA	MB	SORG	ALG	SOY	PAS
----- mm -----												
Media	668.12	728.30	583.03	889.58	599.79	402.14	1 027.88	1 120.46	896.98	1 368.58	922.76	618.67
DE (mm)	35.16	38.33	30.68	46.82	31.57	21.16	54.10	58.97	47.21	72.03	48.56	32.56
CV (%)	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05

MA = maíz amarillo; MB = maíz blanco; SORG = sorgo; ALG = algodón; SOY = soya, PAST = pastos; RRn = requerimientos de riego netos; RRb = requerimientos de riego brutos. DE = desviación estándar; CV = coeficiente de variación.

MA = yellow corn; MB = white corn; SORG = sorghum; ALG = cotton; SOY = soybean; PAST = pastures; RRn = net irrigation requirements; RRb = gross irrigation requirements. SD = standard deviation; CV = coefficient of variation.

Cuadro 5. Láminas de riego netas y brutas aplicadas a los cultivos del Módulo III-4.
Table 5. Applied net and gross irrigation depths for crops in Module III-4.

PARÁMETRO	LRNa						LRBa					
	MA	MB	SORG	ALG	SOY	PAST	MA	MB	SORG	ALG	SOY	PAS
	----- mm -----											
Media	244.19	261.84	175.79	239.64	243.16	366.15	375.71	408.16	270.44	368.68	374.09	516.93
DE (mm)	67.34	19.38	50.89	101.13	113.94	172.77	103.53	21.88	78.29	155.58	175.30	240.28
CV (%)	0.27	0.07	0.29	0.42	0.47	0.47	0.27	0.05	0.29	0.42	0.47	0.47

LRna = lámina de riego neta aplicada; LRba = lámina de riego bruta aplicada. DE = desviación estándar; CV = coeficiente de variación.
 LRna = net irrigation depth applied; LRba = gross irrigation depth applied. SD = standard deviation; CV = coefficient of variation.

Volúmenes netos y brutos aplicados a los cultivos. Los pastos registraron los mayores volúmenes netos aplicados (CWUNapCR) y brutos aplicados (CWUBapCR), con promedios de $3661.49 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$ y $5169.36 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$, respectivamente, mientras que el sorgo tuvo los valores más bajos ($1757.93 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$ CWUNapCR y $2704.52 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$ CWUBapCR). Las DE fueron mayores en pastos y menores en maíz blanco, con coeficientes de variación entre 0.05 y 0.47, indicando mayor dispersión en pastos y menor estabilidad en cultivos como soya y algodón. La prueba Shapiro-Wilk confirmó la normalidad de los datos ($p > 0.05$), mientras que la prueba de Levene evidenció varianzas heterogéneas ($P < 0.05$), requiriendo Games-Howell en las comparaciones post hoc. El ANOVA mostró diferencias significativas en CWUna ($p = 0.020$), pero no en CWUba ($p = 0.059$). los análisis post hoc destacaron diferencias entre maíz blanco y sorgo, siendo maíz blanco consistentemente mayor. Los resultados reflejan que pastos tuvo los mayores volúmenes aplicados debido a su cobertura extensa, mientras que sorgo, con menor demanda hídrica, registró los valores más bajos, consistente con Allen *et al.* (2006). Las diferencias subrayan la importancia de ajustar prácticas de riego, especialmente en cultivos de menor demanda como el sorgo. Estos resultados se detallan en el Cuadro 7.

Huellas hídricas potenciales de los cultivos para la LB. Los pastos registraron las mayores huellas hídricas promedios potenciales verde (HHvLB), azul (HHaLB) y total (HHTLB), con $835.52 \text{ m}^3 \text{ Mg}^{-1}$, $2\ 010.70 \text{ m}^3 \text{ Mg}^{-1}$ y $2\ 839.15 \text{ m}^3 \text{ Mg}^{-1}$ respectivamente. El maíz amarillo tuvo los valores más bajos, con $291.88 \text{ m}^3 \text{ Mg}^{-1}$, $835.15 \text{ m}^3 \text{ Mg}^{-1}$ y $1\ 127.04 \text{ m}^3 \text{ Mg}^{-1}$. Las DE reflejaron estabilidad moderada, con mayor dispersión en pastos y soya. A nivel total, las huellas hídricas del módulo alcanzaron $3\ 202.10 \text{ m}^3 \text{ Mg}^{-1}$ (verde), $9\ 375.05 \text{ m}^3 \text{ Mg}^{-1}$ (azul) y $12\ 504.57 \text{ m}^3 \text{ Mg}^{-1}$ (total). La prueba Shapiro-Wilk confirmó normalidad ($p > 0.05$), y el ANOVA mostró diferencias significativas entre cultivos en todas las categorías ($p = 0.001$). Las pruebas post hoc de Tukey evidenciaron diferencias significativas de la HHvLB, la HHaLB y la HHTLB con algodón y todos los demás cultivos, Soya con todos los demás cultivos y pastos con todos los demás cultivos; así como maíz blanco y maíz amarillo con algodón soya y pastos. Los pastos con mayores demandas, presentó las huellas promedios más altas, maíz amarillo destacó por su eficiencia hídrica, consistente con Hoekstra, Chapagain, Aldaya y Mekonnen (2011) Cuadro 8.

Cuadro 6. Volúmenes netos y brutos requeridos por los cultivos del Módulo III-4.
Table 6. Net and gross water volumes required by crops in Module III-4.

PARÁMETRO	CWUNrLB						CWUBrLB					
	MA	MB	SORG	ALG	SOY	PAST	MA	MB	SORG	ALG	SOY	PAS
	----- $\text{m}^3 \text{ ha}^{-1}$ -----											
Media	9016.34	9666.98	7511.46	11 546.28	7859.00	5678.31	13 871.30	14 872.27	11 556.09	17 763.51	12 090.77	8735.85
DE ($\text{m}^3 \text{ ha}^{-1}$)	474.54	508.79	395.34	607.70	413.63	298.86	730.07	782.75	608.21	934.92	636.35	459.78
CV (%)	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05

CWUNrLB = volumen de agua neto requerido en la LB; CWUBrLB = volumen de agua bruto requerido en la LB. DE = desviación estándar; CV = coeficiente de variación.
 CWUNrLB = net volume of water required in the LB; CWUBrLB = gross volume of water required in the LB. SD = standard deviation; CV = coefficient of variation.

Cuadro 7. Volúmenes netos y brutos aplicados a los cultivos del Módulo III-4.
Table 7. Net and gross water volumes applied to crops in Module III-4.

PARÁMETRO	CWUna						CWUba					
	MA	MB	SORG	ALG	SOY	PAST	MA	MB	SORG	ALG	SOY	PAS
	----- m ³ ha ⁻¹ -----											
Media	2442.18	2618.46	1757.93	2396.42	2431.63	3661.49	3757.20	4081.61	2704.52	3686.80	3740.97	569.36
DE (m ³ ha ⁻¹)	672.96	193.88	508.87	1011.27	1139.49	1727.73	1035.33	218.83	782.88	1555.81	1753.06	2402.86
CV (%)	0.27	0.07	0.28	0.42	0.47	0.47	0.27	0.05	0.28	0.42	0.47	0.47

CWUna = volumen de agua neto aplicado; CWUba = volumen de agua bruto aplicado. DE = desviación estándar; CV = coeficiente de variación.
 CWUna = net volume of water applied; CWUba = gross volume of water applied. SD = standard deviation; CV = coefficient of variation.

Huellas hídricas reales de los cultivos para la CR. Los mayores valores de huellas hídricas reales verde (HHvCR), azul (HHaCR) y total (HHtCR) se registraron en pastos, con 1193.61 m³ Mg⁻¹, 943.89 m³ Mg⁻¹ y 2137.50 m³ Mg⁻¹, respectivamente, mientras que el maíz amarillo tuvo los valores más bajos. Las DE fueron mayores en pastos y soya, indicando mayor dispersión. A nivel global, las huellas hídricas reales totalizaron 8075.78 m³ Mg⁻¹, con 4149.93 m³ Mg⁻¹ de agua verde y 3925.86 m³ Mg⁻¹ de agua azul. La prueba Shapiro-Wilk confirmó normalidad ($p > 0.05$), y el ANOVA mostró diferencias significativas entre cultivos en todas las categorías ($p = 0.001$). Tukey destacó diferencias significativas con las HHvCR, HHaCR y HHt del maíz amarillo, maíz blanco y sorgo con las de los cultivos de algodón, soya y pastos; así como algodón, soya y pastos con todos los cultivos del módulo. Los pastos con mayores demandas hídricas, tuvo las huellas más altas, maíz amarillo destacó por su eficiencia, consistente con Hoekstra *et al.* (2011). Cuadro 9.

Diferencias entre escenarios de las huellas hídricas verdes, azules y totales. Las diferencias promedio entre LB y la CR muestran una disminución significativa en las huellas hídricas para todos los cultivos. Los mayores descensos en la HHv se registraron en pastos (358.08 m³ Mg⁻¹) y algodón (259.20 m³ Mg⁻¹), reflejando mayor dependencia de la precipitación efectiva. En la HHa, soya (1349.17 m³ Mg⁻¹) y algodón (1101.20 m³ Mg⁻¹) presentaron las mayores reducciones. En la HHt, soya (1247.65 m³ Mg⁻¹) y algodón (841.99 m³ Mg⁻¹) fueron los más impactados. La prueba Shapiro-Wilk confirmó normalidad ($p > 0.05$), y la Prueba T para muestras emparejadas

Cuadro 8. Huellas hídricas de los cultivos del Módulo III-4 para la Línea Base (LB).
Table 8. Water footprints of crops in Module III-4 for the Baseline (LB).

CULTIVO	Huella hídrica Verde			Huella Hídrica Azul			Huella Hídrica Total		
	HHverde	Media	D. E.	HHazul	Media	D. E.	HHtotal	Media	D. E.
	----- m ³ Mg ⁻¹ -----								
MA	307.25	291.88	15.36	879.11	835.15	43.95	1186.36	1127.04	59.32
MB	347.25	329.88	17.36	958.29	910.37	47.91	1271.97	1208.37	63.60
Sorgo	326.50	310.17	16.32	1022.87	971.72	51.14	1317.80	1251.91	65.89
Algodón	558.00	530.10	27.90	1872.80	1779.16	93.64	2430.80	2309.26	121.54
Soya	783.60	744.42	39.18	2525.45	2399.17	126.27	3309.05	3143.59	165.45
Pastos	879.50	835.52	43.97	2116.53	2010.70	105.82	2988.58	2839.15	149.43
Total:	3202.10	-	-	9375.05	-	-	12 504.57	-	-
Media	533.68	506.99	-	1562.51	1484.38	-	2084.09	1979.88	-
DE (m ³ Mg ⁻¹)	227.89	-	-	639.51	-	-	865.21	-	-
CV (%)	0.43	-	-	0.41	-	-	0.42	-	-

Cuadro 9. Huellas hídricas de los cultivos del Módulo III-4 para la Condición Real (CR).
Table 9. Water footprints of crops in Module III-4 for the Real Condition (CR).

CULTIVO	Huella hídrica Verde			Huella Hídrica Azul			Huella Hídrica Total		
	HHverde	Media	D. E.	HHazul	Media	D. E.	HHtotal	Media	D. E.
	----- m ³ Mg ⁻¹ -----								
MA	365.83	347.54	18.29	363.46	345.28	18.17	729.29	692.82	36.46
MB	390.44	370.92	19.52	376.68	357.84	18.83	767.13	728.77	38.35
Sorgo	415.92	395.12	20.79	373.23	354.57	18.66	789.15	749.69	39.46
Algodón	830.85	789.30	41.54	713.64	677.96	35.68	1 544.49	1 467.26	77.22
Soya	890.45	845.92	44.52	1105.27	1050.00	55.26	1 995.73	1 895.94	99.79
Pastos	1 256.43	1 193.61	62.82	993.57	943.89	49.68	2 250.00	2 137.50	112.50
Total:	4 149.93	-	-	3 925.86	-	-	8 075.78	-	-
Media	691.65	657.07	-	654.31	621.59	-	1 345.96	1 278.66	-
DE (m ³ Mg ⁻¹)	329.34	-	-	306.23	-	-	619.71	-	-
CV (%)	0.48	-	-	0.47	-	-	0.46	-	-

HHverde = huella hídrica verde; HHazul = huella hídrica azul; HHtotal = huella hídrica total; DE = desviación estándar; CV = coeficiente de variación.
 HHgreen = green water footprint; HHblue = blue water footprint; HHtotal = total water footprint; SD = standard deviation; CV = coefficient of variation.

mostró diferencias significativas en todas las categorías ($p = 0.001$). Tukey identificó diferencias significativas de la HHv, HHa y HHt entre todos los cultivos, excepto entre maíz amarillo con maíz blanco y sorgo con soya. Los resultados reflejan que algodón y pastos, con mayores demandas hídricas, requieren estrategias específicas, mientras que maíz amarillo y maíz blanco destacan como opciones menos intensivas. Este estudio contribuye con el vacío del conocimiento al integrar escenarios reales en el cálculo de huellas hídricas, mostrando reducciones en CR que evidencian la efectividad de las prácticas de riego del Módulo III-4. Los hallazgos subrayan la importancia de priorizar cultivos con menor huella hídrica en escenarios de escasez y de equilibrar el uso de agua verde y azul para una planificación hídrica sostenible. Cuadro 10.

Índice de Estrés Hídrico Total (TWSI) y Eficiencia del Requerimiento de Riego (WREI). Los valores promedio del TWSI variaron entre 37.78% (pastos) y 47.85% (algodón), reflejando los porcentajes de estrés hídrico. En contraste, el WREI osciló entre 47.14% (algodón) y 57.22% (pastos), indicando eficiencia en el cumplimiento del requerimiento hídrico. La prueba Shapiro-Wilk confirmó normalidad ($p > 0.05$), y el ANOVA de una vía mostró diferencias significativas entre cultivos para ambos índices ($P < 0.05$). Las pruebas post hoc de Tukey identificaron diferencias significativas entre sorgo-pastos y algodón-pastos, mientras que los valores entre maíz amarillo, maíz blanco y soya fueron homogéneos. Estos índices destacan las limitaciones y oportunidades en la gestión del agua. Pastos se posicionaron como cultivos adaptados al estrés hídrico con menor TWSI y mayor WREI, mientras que algodón mostró alta vulnerabilidad con el mayor TWSI y menor WREI. A diferencia de índices tradicionales, este enfoque considera dinámicas reales, ofreciendo herramientas innovadoras para priorizar cultivos con alto TWSI y optimizar estrategias basadas en el WREI. Estos hallazgos tienen implicaciones prácticas para reducir el estrés hídrico, mejorar la eficiencia del requerimiento de riego y fortalecer la sostenibilidad hídrica en sistemas agrícolas bajo riego. Estos resultados se detallan en el Cuadro 11.

Limitaciones del estudio. La falta de datos meteorológicos registrados y medidos *in situ*.

Implicaciones del estudio. Los índices TWSI y WREI proporcionan herramientas prácticas para optimizar la gestión hídrica y priorizar cultivos en escenarios de escasez de agua.

Recomendaciones para investigaciones futuras. Validar los índices TWSI y WREI en regiones con condiciones diversas.

Posibles sesgos y soluciones implementadas. Se minimizó el sesgo mediante la selección de datos confiables y la implementación de pruebas estadísticas robustas (e.g., ANOVA, Prueba T, Levene, Tukey, Games-Howell).

Cuadro 10. Comparación de las huellas hídricas de los cultivos del Módulo III-4 entre LB y CR.
Table 10. Comparison of water footprints of crops in Module III-4 between Base Line (LB) and Real Condition (CR).

CULTIVO	HUELLA HÍDRICA VERDE			HUELLA HÍDRICA AZUL			HUELLA HÍDRICA TOTAL		
	DifHHv	Media	D. E.	DifHHa	Media	D. E.	DifHHt	Media	D. E.
----- m ³ Mg ⁻¹ -----									
MA	55.65	-	2.92	489.86	-	25.78	434.21	-	22.85
MB	41.03	-	2.15	552.53	-	29.08	479.59	-	25.24
Sorgo	84.95	-	4.47	617.15	-	32.48	502.22	-	26.43
Algodón	259.20	-	13.64	1 101.20	-	57.96	841.99	-	44.31
Soya	101.50	-	5.34	1 349.17	-	71.01	1 247.65	-	65.66
Pastos	358.08	-	18.84	1 066.81	-	56.14	701.65	-	36.93
Total:	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Media	150.07	-	-	862.79	-	-	701.22	-	-
DE (m ³ Mg ⁻¹)	-	-	-	-	-	-	-	-	-
CV (%)	-	-	-	-	-	-	-	-	-

DifHHv = diferencias huella hídrica verde; DifHHa = diferencias huella hídrica azul; DifHHt = diferencias huella hídrica total. DE = desviación estándar; CV = coeficiente de variación.

DifHHv = differences in green water footprint; DifHHa = differences in blue water footprint; DifHHt = differences in total water footprint. SD = standard deviation; CV = coefficient of variation.

Cuadro 11. Índices de Estrés Hídrico Total (TWSI) e Índices de Eficiencia del Requerimiento de Riego (WREI).
Table 11. Total Water Stress Index (TWSI) and Water Requirement Efficiency Index (WREI).

PARÁMETRO	ÍNDICES DE ESTRÉS HÍDRICO TOTAL (TWSI)						ÍNDICES DE EFICIENCIA DEL REQUERIMIENTO DE RIEGO (WREI)					
	MA	MB	SORG	ALG	SOY	PAST	MA	MB	SORG	ALG	SOY	PAS
----- % -----												
Media	42.83	41.93	46.26	47.85	42.28	37.78	52.16	53.06	48.73	47.14	52.71	57.22
DE (%)	2.25	2.20	2.43	2.52	2.22	1.99	2.74	2.79	2.56	2.48	2.77	3.01
CV (%)	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05

CONCLUSIONES

La integración de los Índices de Estrés Hídrico Total (TWSI) y de Eficiencia del Requerimiento de Riego (WREI) en este estudio ha permitido cuantificar de manera precisa la dinámica del estrés hídrico a la que se someten los cultivos, así como la eficiencia en el suministro del requerimiento de riego, evidenciando diferencias significativas entre los distintos cultivos evaluados. Los resultados indican que los valores promedio del TWSI oscilan entre 37.78% (pastos) y 47.85% (algodón), lo cual refleja un elevado nivel de acumulación de estrés hídrico, ocasionado por la escasez de agua y las prácticas de riego. De forma paralela, los índices de WREI se distribuyen en un rango de 47.14% (algodón) a 57.22% (pastos), sugiriendo una eficiencia superior en el suministro del requerimiento de riego en cultivos como pastos y soya en comparación con otros. La baja variabilidad relativa (coeficientes de variación de 0.05 en todos los parámetros) respalda la solidez de la metodología aplicada y la confiabilidad de los resultados obtenidos. Estos hallazgos validan la hipótesis central del estudio, al demostrar que el enfoque comparativo entre la (LB) y la (CR), mediante la integración de información meteorológica, fisiológica, hidrométrica, de producción agrícola y de huellas hídricas, se constituye en una herramienta robusta para la evaluación integral de la sostenibilidad hídrica en sistemas de riego. En consecuencia, la aplicación de este marco metodológico no solo contribuye a subsanar el vacío del conocimiento en la integración de huellas hídricas teóricas, reales, e índices; sino que también ofrece un sustento científico sólido para el diseño e implementación de estrategias de manejo resiliente ante la escasez de agua y la variabilidad climática.

DECLARACIÓN DE ÉTICA

No aplicable.

CONSENTIMIENTO PARA PUBLICACIÓN

No aplicable.

DISPONIBILIDAD DE DATOS

Los conjuntos de datos generados o analizados durante el estudio actual no están disponibles públicamente debido las políticas institucionales pero están disponibles del autor correspondiente a solicitud razonable.

CONFLICTO DE INTERESES

Los autores declaran que no tienen intereses en competencia

FINANCIACIÓN

No aplicable.

CONTRIBUCIÓN DE LOS AUTORES

Conceptualización, metodología, análisis formal, investigación, escritura: preparación del borrador original, C.L.L.; validación, curación de datos, J..FV.; escritura: revisión y edición, M.A.B.G.; visualización, J.E.R.P.; supervisión, administración del proyecto, adquisición de fondos, A.A.E.G.

AGRADECIMIENTOS

Se agradece a los productores, directivos y personal técnico del Módulo de Riego III-4 del D.R. 025.

LITERATURA CITADA

- Allen, R. G., Pereira, L. S., Raes, D., & Smith, M. (2006). *Evapotranspiración del cultivo: Guías para la determinación de los requerimientos de agua de los cultivos* (Estudio FAO Riego y Drenaje, Boletín No. 56). Roma, Italia: Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación (FAO).
- ANUR (Asociación Nacional de Usuarios de Riego). (2020). *Información de los módulos de riego en México*. Consultado el 22 de febrero, 2024, desde <https://anur.org.mx/>
- Banco Mundial (2010). *Sustaining water for all in a changing climate: World Bank Group implementation progress report of the water resources sector strategy*. Banco Internacional de Reconstrucción y Fomento/Banco Mundial. Consultado el 22 de febrero, 2024, desde <https://documents1.worldbank.org/curated/en/959161468162562009/pdf/571250WP00Box31LIC10sustainingwater.pdf>
- Blaney, H. F., & Criddle, W. D. (1950). Determining water requirements in irrigated areas from climatological and irrigation data. USDA Soil Conservation Service Technical Paper No. 96. Washington, D.C., USA: U.S. Department of Agriculture.
- Buenrostro-Curiel, J., Montazar, A., Avilés-Marín, S. M., Escobosa-García, M. I., Brígido-Morales, J. G., & Soto-Ortiz, R. (2025). Rendimiento de Lechuga (*Lactuca sativa* L.) Bajo Diferentes Láminas de Riego y Dosis de Nitrógeno en el Valle Imperial, California. *Terra Latinoamericana*, 43, 1-10. <https://doi.org/10.28940/terra.v43i.2056>
- Burt, C. M., Clemmens, A. J., Strelkoff, T. S., Solomon, K. H., Bliesner, R. D., Hardy, L. A., ... & Eisenhauer, D. E. (1997). Irrigation performance measures: efficiency and uniformity. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 123(6), 423-442. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9437\(1997\)123:6\(423\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9437(1997)123:6(423))
- CONAGUA (Comisión Nacional del Agua). (2012). *Programa Hídrico Regional Visión 2030. Región Hidrológico-Administrativa VI Río Bravo*. Consultado el 20 de julio, 2024, desde <https://sinav30.conagua.gob.mx:8080/Descargas/pdf/RHA%20VI%20RB%20PHR.pdf>
- CONAGUA (Comisión Nacional del Agua). (2018). *Estadísticas del agua en México: Edición 2018*. Consultado el 20 de julio, 2024, desde <https://files.conagua.gob.mx/conagua/publicaciones/Publicaciones/EAM2018.pdf>
- CONAGUA (Comisión Nacional del Agua). (2024). *Sistema Nacional de Información del Agua (SINA 3.0)*. Consultado el 20 de julio, 2024, desde <https://sinav30.conagua.gob.mx:8080/SINA/?opcion=base>
- FAO (Food and Agriculture Organization of the United Nations). (2010). *CROPWAT 8.0 User's Guide*. Rome, Italy: FAO.
- FAO (Food and Agriculture Organization of the United Nations). (2017a). *Determining water requirements in irrigated areas from climatological and irrigation data*. Roma, Italia: FAO. Consultado el 20 de julio, 2024, desde <http://www.fao.org/3/a-i6583e.pdf>
- FAO (Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura). (2017b). *El estado mundial de la agricultura y la alimentación 2017: Aprovechar los sistemas alimentarios para lograr una transformación rural inclusiva*. Roma, Italy: FAO.

- Faul, F., Erdfelder, E., Buchner, A., & Lang, A. G. (2009). Statistical power analyses using G* Power 3.1: Tests for correlation and regression analyses. *Behavior Research Methods*, 41(4), 1149-1160. <https://doi.org/10.3758/BRM.41.4.1149>
- Gausson, H., & Bagnouls, F. (1957). Les climats biologiques et leur classification. *Annales de Géographie*, 355, 193-220.
- Hargreaves, G. H., & Samani, Z. A. (1985). Reference crop evapotranspiration from temperature. *Applied Engineering in Agriculture*, 1(2), 96-99. <https://doi.org/10.13031/2013.26773>
- Hoekstra, A. Y., Chapagain, A. K., Aldaya, M. M., & Mekonnen, M. M. (2009). *Water Footprint Manual: State of the Art*. Water Footprint Network, Enschede, The Netherlands: Water FootPrint.
- Hoekstra, A. Y., Chapagain, A. K., Aldaya, M. M., & Mekonnen, M. M. (2011). *The water footprint assessment manual: Setting the global standard*. Washington, D.C., USA: Earthscan. ISBN: 978-1-84971-279-8
- Howell, T. A. (2005). *Irrigation efficiency*. En B. A. Stewart & T. A. Howell (Eds.), *Encyclopedia of soil science* (pp. 467-472). Boca Raton, FL, USA: CRC Press.
- IBM SPSS Statistics (2022). *Statistical Package for the Social Sciences User's Guide. version 29*. Armonk, NY, USA: IBM Corp.
- Idso, S. B., Jackson, R. D., Pinter Jr, P. J., Reginato, R. J., & Hatfield, J. L. (1981). Normalizing the stress-degree-day parameter for environmental variability. *Agricultural Meteorology*, 24, 45-55. [https://doi.org/10.1016/0002-1571\(81\)90032-7](https://doi.org/10.1016/0002-1571(81)90032-7)
- INEGI (Instituto Nacional de Estadística y Geografía) (2014a). *Clasificación de suelos bajo el sistema WRB-2014*. Consultado el 20 de julio, 2024, desde <https://www.inegi.org.mx/temas/edafologia/>
- INEGI (Instituto Nacional de Estadística y Geografía) (2014b). Carta de Climas de México, Serie V. Consultado el 20 de julio, 2024, desde <https://www.inegi.org.mx/temas/climatologia/>
- INIFAP (Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias). (2023). *Paquetes tecnológicos para la producción de cultivos del norte de Tamaulipas: maíz, sorgo, algodón y otros*. Tamaulipas, México: Campo Experimental Río Bravo.
- Israelsen, O. W. (1932). *Irrigation principles and practices*. Nueva York, USA: McGraw-Hill Book Company.
- Levitt, J. (1980). *Responses of plants to environmental stresses*. New York, NY, USA: Academic Press.
- López-López, R., Arteaga-Ramírez, R., Vázquez-Peña, M. A., López-Cruz, I., & Sánchez-Cohen, I. (2009). Índice de estrés hídrico como un indicador del momento de riego en cultivos agrícolas. *Agricultura Técnica en México*, 35(1), 97-111.
- Mekonnen, M. M., & Hoekstra, A. Y. (2011). The green, blue and grey water footprint of crops and derived crop products. *Hydrology and Earth System Sciences*, 15(5), 1577-1600. <https://doi.org/10.5194/hess-15-1577-2011>
- Montes-García, N., Williams-Alanis, H., Arcos-Cavazos, G., Vargas-Valero, E., Pecina-Quintero, V., & Espinosa-Ramírez, M. (2014). RB-Norteño, sorgo de grano para áreas con sequía RB-Norteño, grain sorghum for drought areas. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas, Publicación Especial*, 5(7), 1337-1342.
- QGIS.org (2021). *QGIS Geographic Information System. User's Guide. Version 3.18*. Grüt, Switzerland: QGIS Association.
- Raj, S., Roodbar, S., Brinkley, C., & Wolfe, D. W. (2022). Food security and climate change: differences in impacts and adaptation strategies for rural communities in the global south and north. *Frontiers in Sustainable Food Systems*, 5, 691191. <https://doi.org/10.3389/fsufs.2021.691191>
- SECOFI (Secretaría de Comercio y Fomento Industrial). (2015). Norma Oficial Mexicana NMXAA166/2SCFI2015: Que establece las estaciones meteorológicas, climatológicas e hidrológicas. Parte 2: Especificaciones técnicas que deben cumplir el emplazamiento y exposición de los instrumentos de medición de las estaciones meteorológicas automáticas y convencionales. *Diario Oficial de la Federación*. D. F., México: SEGOB.
- Selye, H. (1936). A syndrome produced by diverse noxious agents. *Nature*, 138(3479), 32. <https://doi.org/10.1038/138032a0>
- SMN (Servicio Meteorológico Nacional). (2020). *Información estadística climatológica de México*. Consultado el 20 de julio, 2024, desde <https://smn.conagua.gob.mx/es/climatologia/informacion-climatologica/informacion-estadistica-climatologica>
- Shapiro, S. S., & Wilk, M. B. (1965). An analysis of variance test for normality (complete samples). *Biometrika*, 52(3-4), 591-611. <https://doi.org/10.1093/biomet/52.3-4.591>
- Sherif, M., Singh, V. P., Sefelnasr, A., & Abrar, M. (2023). *Water Resources Management and Sustainability*. Berlin, Germany: Springer. <https://doi.org/10.1007/978-3-031-24506-0>
- The jamovi project (2021). *Jamovi User's Guide (Version 2.2)*. Sidney, Australia: The Jamovi Project
- USDA (United States Department of Agriculture). (1970). *Estimation of Effective Rainfall in Agriculture*. Washington, D.C., USA: U.S. Department of Agriculture.
- Vargas, T. V., Hernández, R. M. E., Gutiérrez, L. J., Plácido, D. C. J., & Jiménez, C. A. (2007). Clasificación climática del estado de Tamaulipas, México. *CienciaUAT*, 2(2), 15-19.
- Vories, E., O'Shaughnessy, S., Sudduth, K., Evett, S., Andrade, M., & Drummond, S. (2021). Comparison of precision and conventional irrigation management of cotton and impact of soil texture. *Precision Agriculture*, 22(3), 414-431. <https://doi.org/10.1007/s11119-020-09741-3>
- Xinchun., Wu, M., Guo, X., Zheng, Y., Gong, Y., Wu, N., & Wang, W. (2017). Assessing water scarcity in agricultural production system based on the generalized water resources and water footprint framework. *Science of the Total Environment*, 609, 271-280. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.07.191>
- Yan, Y., Wang, R., Chen, S., Zhang, Y., & Sun, Q. (2023). Three-dimensional agricultural water scarcity assessment based on water footprint: A study from a humid agricultural area in China. *Science of the Total Environment*, 857, 159407. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.159407>
- Zhang, K., Kimball, J. S., Nemani, R. R., & Running, S. W. (2010). A continuous satellite-derived global record of land surface evapotranspiration from 1983 to 2006. *Water Resources Research*, 46, W09522. <https://doi.org/10.1029/2009WR008800>