

Evaluación Asociativa del Impacto Económico del Estrés Hídrico en la Producción Agrícola del Noreste de México Mediante Indicadores Associative Assessment of the Economic Impact of Water Stress on Agricultural Production in Northeastern Mexico Using Indicators

Carlos López-López^{1*} , Adolfo Antenor Exebio-García¹ , Jorge Flores-Velázquez¹ ,
Martín Alejandro Bolaños-González¹ y Juan Enrique Rubiños-Panta¹

¹ Colegio de Postgraduados, Campus Montecillos. Carretera México-Texcoco km 36.5, Montecillo. 56230 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

RESUMEN

El Distrito de Riego 025, en el noreste de México, enfrenta condiciones climáticas adversas caracterizadas por un clima seco y precipitaciones insuficientes para un desarrollo agrícola óptimo. Esta situación se ha agravado por el Cambio Climático (CC), lo cual ha reducido significativamente los rendimientos agrícolas. Este estudio, de tipo empírico con estrategia asociativa, tuvo como objetivo evaluar el impacto económico del estrés hídrico en la producción agrícola mediante tres indicadores clave: el Valor Económico de la Huella Hídrica (HHvalor), la Eficacia del Suministro del Riego (ESRhh) y el Valor de la Producción Agrícola (Vp). La metodología, de naturaleza no experimental, incluyó el análisis de las huellas hídricas, la productividad del agua, las condiciones actuales de riego y estadísticas agrícolas e hidrométricas, asociadas a dos escenarios: uno ideal sin estrés hídrico (Línea Base, LB) y otro con estrés hídrico (Condición Real, CR). Los datos meteorológicos se generaron mediante WXGEN y se procesaron con el software CROPWAT 8.0 de la FAO para calcular los requerimientos de riego de los principales cultivos. Los resultados mostraron que el mayor impacto económico del estrés hídrico se obtuvo con HHvalor (\$ 798 110 647.64), seguido por ESRhh (\$ 215 410 806.25) y Vp (\$ 72 341 989.32), con un impacto promedio de \$ 361 223 351.00. Las principales limitaciones del estudio incluyeron la falta de datos meteorológicos y fisiológicos medidos directamente en el lugar. Aun así, los indicadores y la metodología desarrollados proporcionan herramientas efectivas para cuantificar y mitigar las pérdidas económicas derivadas del estrés hídrico, contribuyendo a una gestión más eficiente del agua en la agricultura. En conclusión, el principal hallazgo fue que el HHvalor permite evaluar de forma integral el impacto económico del estrés hídrico en la producción agrícola de riego, ya que incorpora tanto las huellas hídricas de los cultivos como su valor económico intrínseco.

Palabras clave: agricultura sostenible, cambio climático global, gestión del agua, indicadores cuantitativos, región hidrológica 24 Bravo-Conchos.

SUMMARY

Irrigation District 025, located in northeastern Mexico, faces adverse climatic conditions characterized by a dry climate and insufficient rainfall for optimal agricultural development. This situation has been exacerbated by Climate Change (CC), which has significantly reduced agricultural yields. Our study, classified as empirical with an associative strategy, aimed to evaluate the economic impact of water stress on agricultural production using three key indicators: the Economic Value of the Water Footprint (HHvalor), Irrigation Supply Efficiency (ESRhh), and Agricultural Production Value (Vp). The non-experimental methodology included the



Cita recomendada:

López-López, C., Exebio-García, A. A., Flores-Velázquez, J., Bolaños-González, M. A., & Rubiños-Panta, J. E. (2025). Evaluación Asociativa del Impacto Económico del Estrés Hídrico en la Producción Agrícola del Noreste de México Mediante Indicadores. *Terra Latinoamericana*, 43, 1-20. e2077. <https://doi.org/10.28940/terra.v43i.2077>

Recibido: 30 de agosto de 2024.

Aceptado: 8 de diciembre de 2024.

Artículo. Volumen 43.

Abril de 2025.

Editor de Sección:

Dr. Fabián Fernández Luqueño

Editor Técnico:

Dr. Marco Antonio Camacho Escobar



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/>).

analysis of water footprints, water productivity, current irrigation conditions, and agricultural and hydrometric statistics, associated with two scenarios: an ideal scenario without water stress (Baseline, LB) and a scenario with water stress (Real Condition, RC). Meteorological data were generated using WXGEN and processed with FAO's CROPWAT 8.0 software to calculate irrigation requirements for the main crops. The results showed that the highest economic impact of water stress was obtained with HHvalor (\$ 798 110 647.64), followed by ESRhh (\$ 215 410 806.25) and Vp (\$ 72 341 989.32), with an average impact of \$ 361 223 351.00. The main limitations of the study included the lack of directly measured meteorological and physiological data for the crops. Nevertheless, the developed indicators and methodology provide effective tools to quantify and mitigate economic losses resulting from water stress, contributing to more efficient water management in agriculture. In conclusion, our main finding was that HHvalor allows for a comprehensive assessment of the economic impact of water stress on irrigated agricultural production, as it incorporates both the water footprints of crops and their intrinsic economic value.

Index words: *sustainable agriculture, global climate change, water management, quantitative indicators, Bravo-Conchos hydrological region 24.*

INTRODUCCIÓN

Desde 2010, instituciones como el Banco Mundial (The World Bank, 2010) han documentado cómo el cambio climático afecta la disponibilidad de agua para la agricultura, destacando la creciente vulnerabilidad del sector. De manera paralela, Gerten y Rost (2010) cuantificaron los impactos económicos de las limitaciones de agua azul y verde en la producción agrícola, subrayando la necesidad de estrategias de manejo hídrico. En este contexto, estudios recientes en regiones vulnerables como la hidrológica Bravo-Conchos en México han evidenciado sequías recurrentes y escasez de agua, comprometiendo la sostenibilidad agrícola (Martínez y Patiño, 2012; CONAGUA, 2012). El impacto económico del estrés hídrico en la agricultura ha sido ampliamente evaluado mediante metodologías que relacionan la disponibilidad de agua con la productividad agrícola. La productividad marginal del agua, por ejemplo, permite cuantificar la disminución de la producción bajo condiciones de estrés hídrico (The World Bank, 2010; Velasco-Muñoz, Aznar, Belmonte y Román, 2019). Además, Renault y Wallender (2000) destacaron enfoques como "cultivo por gota" y "nutrientes por gota", que resaltan la necesidad de evaluar el valor económico del agua de manera integral.

Velasco-Muñoz *et al.*, (2018), a nivel global, enfatizaron la necesidad de implementar medidas para reducir el déficit hídrico y su impacto económico. Por su parte, Khan *et al.*, (2021) demostraron en Pakistán cómo la escasez de agua azul afecta la productividad agrícola, mientras que en México, Mejía-Saenz *et al.* (2003) analizaron la transferencia del distrito de riego 011, integrando la productividad marginal del agua y la precipitación efectiva como factores críticos para la sostenibilidad agrícola. Sin embargo, persisten vacíos metodológicos significativos en la evaluación del valor económico del agua en condiciones de estrés hídrico. Zisopoulou y Panagoulia (2021) indicaron que las evaluaciones separadas de la huella hídrica azul y verde, así como la falta de integración económica, limitan la comprensión del impacto del agua en la rentabilidad agrícola. El Banco Mundial (The World Bank, 2010) también identificó la necesidad de enfoques más integrales que consideren el valor económico del agua en escenarios de escasez.

A pesar de los esfuerzos realizados para evaluar los impactos económicos del estrés hídrico en la agricultura bajo riego, los estudios existentes se han centrado principalmente en estimar el valor económico de la producción agrícola, sin considerar el valor real del agua utilizada en el proceso productivo. Esta limitación metodológica ha generado un vacío en la comprensión integral del problema, particularmente en lo que respecta a la cuantificación de los efectos económicos y la eficiencia del uso del agua en sistemas de riego. Para abordar esta brecha, el presente estudio evaluó tres indicadores novedosos: el Valor Económico de la Huella Hídrica (HHvalor), la Eficacia del Suministro del Riego (ESRhh) y el Valor de la Producción Agrícola (Vp), en el escenario ideal o sin estrés hídrico (Línea Base, LB) y otro con estrés hídrico (Condición Real, CR). Estos indicadores permiten una evaluación más precisa y completa del impacto económico del estrés hídrico en la producción agrícola del Módulo III-4 del

Distrito de Riego 025, al integrar el valor económico del agua y su relación directa con la productividad agrícola en dos escenarios de análisis: El objetivo general del estudio fue calcular el impacto económico del estrés hídrico en la producción agrícola del Módulo III-4 del Distrito de Riego 025 mediante la evaluación de los indicadores HHvalor, Vp, y ESRhh para dos escenarios: Línea Base (LB, sin estrés hídrico) y Condición Real (CR, con estrés hídrico). Este estudio empírico con estrategia asociativa está diseñado para evaluar la sostenibilidad económica y la eficiencia hídrica de la producción agrícola bajo condiciones de estrés hídrico en el noreste de México.

MATERIALES Y MÉTODOS

Selección de Participantes

Los cultivos estudiados fueron maíz amarillo (*Zea mays* L.), maíz blanco (*Zea mays* L.), sorgo grano (*Sorghum* spp.), algodón (*Gossypium hirsutum* L.), soya frijol (*Glycine max* L.), y pasto rye grass (*Lolium multiflorum* L.), establecidos cíclicamente en el Módulo III-4 del ciclo 2002-2003 al 2019-2020.

Diseño y Tipo de Investigación

La investigación fue no experimental, de tipo empírica con estrategia asociativa, enfocada en evaluar los impactos económicos del estrés hídrico en el Módulo III-4.

Técnicas de Recolección de Datos

Se emplearon observación directa, entrevistas a personal del módulo, análisis de datos secundarios (hidrométricos, agrícolas y meteorológicos), y análisis geoespacial en QGIS (QGIS.org, 2021) para mapear la producción e infraestructura.

Instrumentos de Medición

Se utilizaron equipos de estaciones meteorológicas convencionales y automatizadas, además de molinetes para medir caudales en canales de riego. Las mediciones siguieron escalas métricas.

Procedimientos (Escenarios y Fases)

El estudio se dividió en fases de campo (recorridos, entrevistas y recopilación de información en sitio) y de gabinete (análisis de datos secundarios, definición de escenarios LB y CR, y deducción de indicadores).

Análisis Estadísticos

Se realizaron análisis descriptivos, ANOVA, correlación de Pearson y regresión lineal para evaluar diferencias entre escenarios y la relación de los indicadores HHvalor, Vp y ESRhh con la eficiencia del agua y la producción. El análisis se llevó a cabo en Microsoft Excel®.

Descripción del Área de Estudio

El Distrito de Riego 025 Bajo Río Bravo (DR-025) se encuentra en Tamaulipas, noreste de México, abarcando alrededor de 200 000 ha en los municipios de Matamoros, Valle Hermoso, Río Bravo y Reynosa y su infraestructura se organiza en cuatro unidades de riego, subdivididas en nueve módulos (SEGOB, 2016) (Figura 1a). El Módulo III-4 "Hidráulica Los Ángeles, A.C." es el área de estudio, ubicado al oeste del DR-025, abarcando 22 833.44 ha y operando con 10 secciones de riego (Figura 1b). La red incluye 47 canales (156.67 km) y 193 drenes (315.79 km) (ANUR, 2020). El agua proviene de la presa internacional "La Amistad" y se distribuye a través de la presa Falcón y el canal Anzalduas, operado por la CONAGUA. El Módulo pertenece a la región hidrológica Bravo Conchos y utiliza tanto aguas superficiales como del acuífero Río Bravo (CONAGUA, 2024) (Figura 2a y 2b).

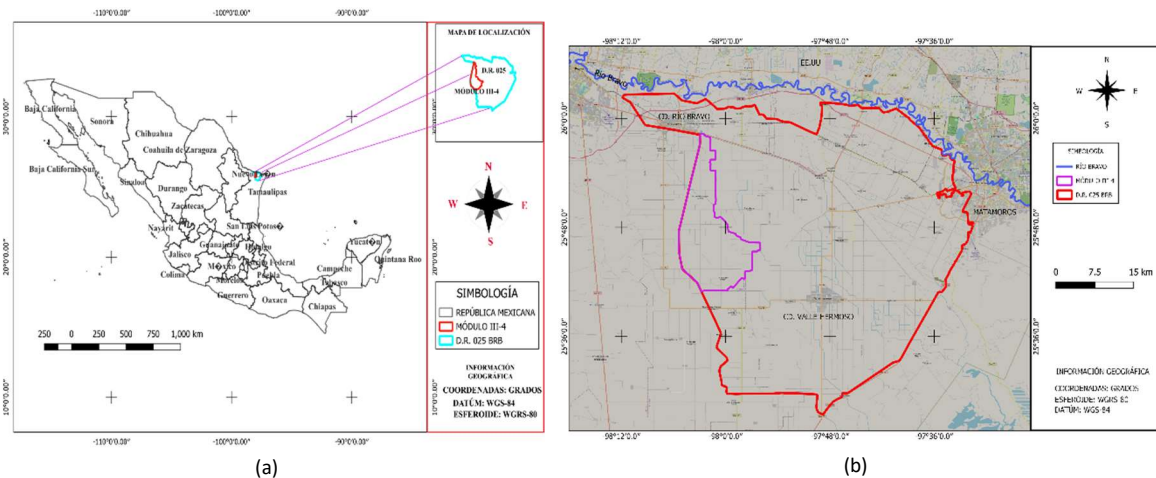


Figura 1. Localización nacional y distrital del Módulo III-4: (a) Localización nacional del Módulo de Riego III-4; (b) Localización distrital del Módulo de Riego III-4.
Figure 1. National and district location of Module III-4: (a) National location of Irrigation Module III-4; (b) District location of Irrigation Module III-4.

Diagrama de Flujo de la Investigación

El estudio se llevó a cabo en dos etapas: campo y gabinete. La fase de campo incluyó recorridos, entrevistas y recopilación de datos. La fase de gabinete abarcó la recopilación de fuentes secundarias, procesamiento de datos, diseño de escenarios de riego (Línea Base y Condición Real), análisis de indicadores económicos y elaboración del manuscrito. Las Figuras 3a y 3b ilustran las fases y su interrelación.

Descripción Biofísica del Módulo III-4

Los suelos del Módulo III-4, clasificados bajo la WRB 2014, comprenden siete tipos principales, siendo el Chernozem vértico sódico + Vertisol pélico cálcico + Chernozem lúvico cálcico el más predominante, cubriendo el 53.68% del área (INEGI, 2014a). Los suelos dominantes incluyen texturas arcillosas y francas. Los Vertisoles presentan alta retención de agua y expansión por arcillas, mientras que los Chernozem destacan por su fertilidad y materia orgánica, aunque algunos tienen problemas de salinidad o sodicidad (INEGI, 2014b) (Figura 4a).

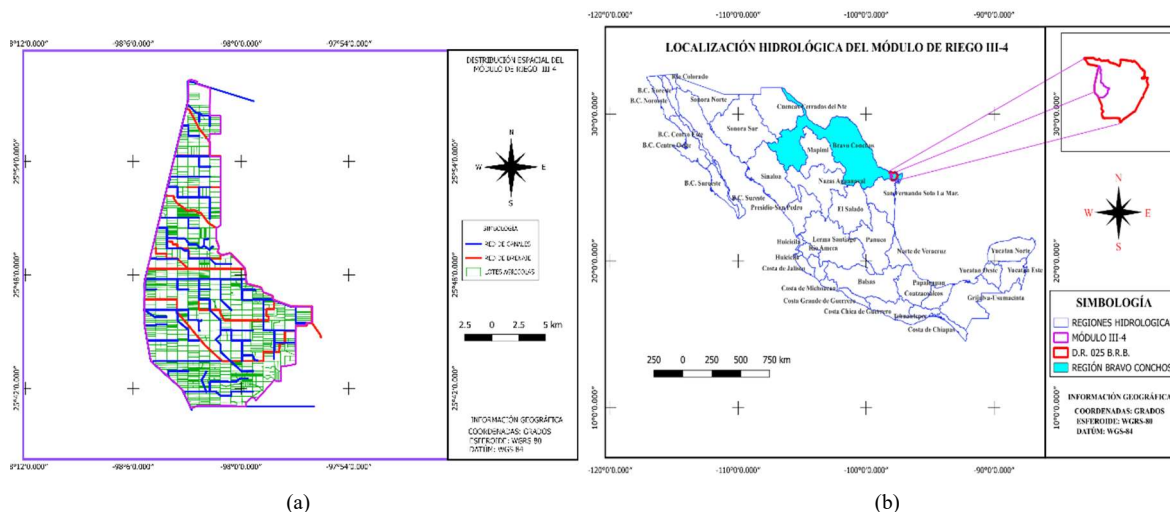


Figura 2. Distribución espacial y localización hidrológica del Módulo III-4: (a) Distribución espacial de la infraestructura hidroagrícola del Módulo de Riego III-4; (b) Localización hidrológica del Módulo de Riego III-4.
Figure 2. Spatial distribution and hydrological location of Module III-4: (a) Spatial distribution of the hydro-agricultural infrastructure of Irrigation Module III-4; (b) Hydrological location of Irrigation Module III-4.

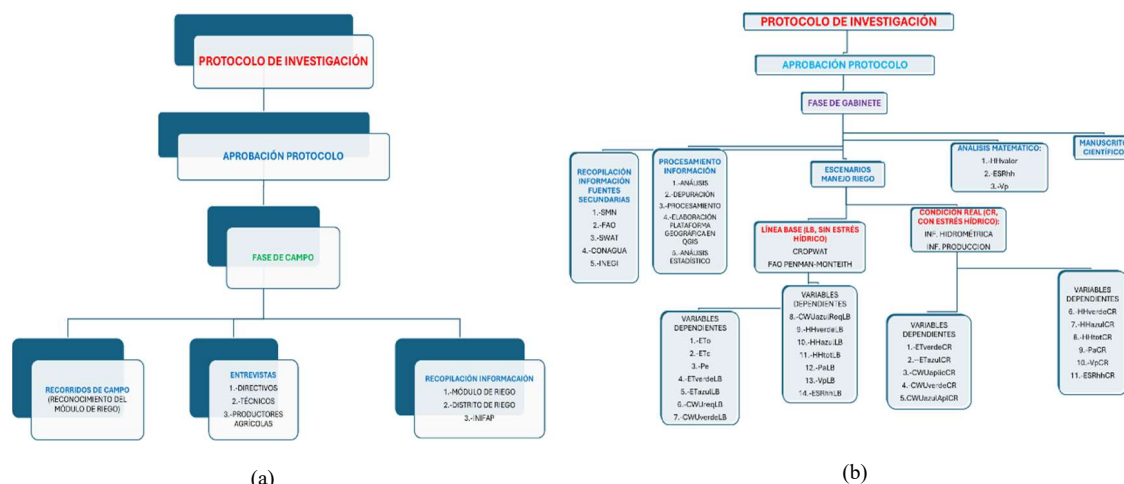


Figura 3. Diagrama de flujo de la investigación: (a) Diagrama de flujo de la investigación para la fase de campo; (b) Diagrama de flujo de la investigación para la fase de gabinete.
Figure 3. Research flowchart: (a) Flowchart for the field phase; (b) Flowchart for the office phase.

El Módulo III-4 tiene dos climas: templado semicálido subhúmedo y seco cálido semiseco, con lluvias de verano y menos del 5% de lluvia invernal. La temperatura media anual es de 22.7 °C, con una máxima de 28.7 °C, mientras que la precipitación anual promedio es de 682.69 mm y la evapotranspiración promedio anual es de 1844 mm (INEGI, 2014c; Vargas, Hernández, Gutiérrez, Plácido y Jiménez, 2007; CONAGUA, 2012).

Principales Cultivos

Los cultivos predominantes son sorgo grano (11 765.38 ha), maíz amarillo (5 462.53 ha) y algodón (1 259.25 ha), ocupando el sorgo la mayor superficie del módulo (Asociación de Usuarios Hidráulica Los Ángeles A. C., 2020¹).

Diagrama Ombrotérmico

El diagrama muestra un periodo seco prolongado, donde la precipitación es menor a dos veces la temperatura media durante todo el año, excepto en septiembre. Esto evidencia el déficit hídrico estacional en la región (Bagnouls y Gaussen, 1957), Figura 4b.

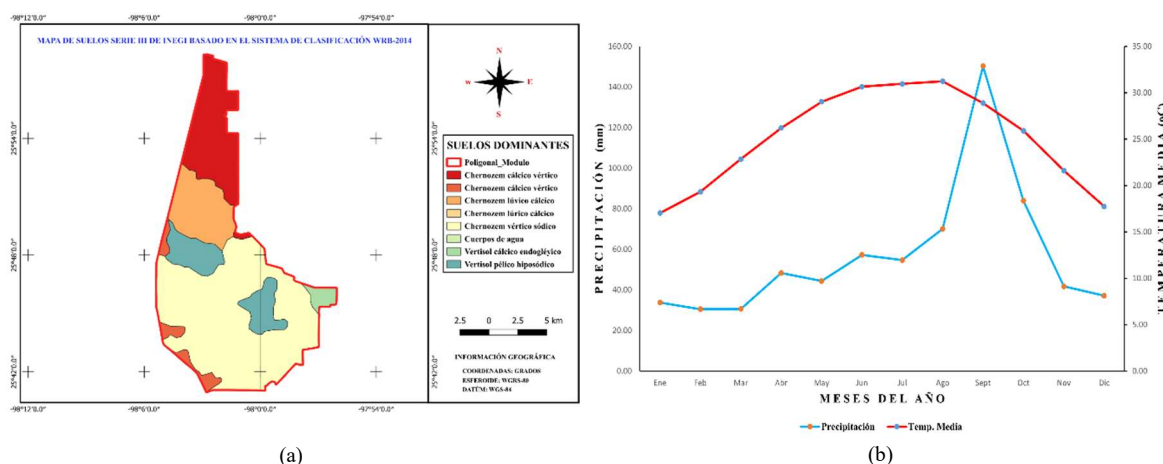


Figura 4. Edafología y diagrama ombrotérmico del Módulo de Riego III-4: (a) Tipos de suelos predominantes en el Módulo de Riego III-4; (b) Diagrama ombrotérmico del Módulo de Riego III-4.
Figure 4. Soil types and ombrothermic diagram of Irrigation Module III-4: (a) Predominant soil types in Irrigation Module III-4; (b) Ombrothermic diagram of Irrigation Module III-4.

¹ Asociación de Usuarios Hidráulica Los Ángeles A.C. (2020). Informes técnicos de producción y estadísticas hidrométricas de los ciclos agrícolas 2012-2013 a 2019-2020. Módulo de Riego III-4, Distrito de Riego 025 Bajo Río Bravo. Archivos técnicos internos. México: Asociación de Usuarios Hidráulica Los Ángeles A.C.

Diagrama General de Trabajo del Módulo

El módulo de riego está dirigido por el Consejo Directivo y el Consejo de Vigilancia, ambos elegidos por los productores. La gestión operativa recae en el Gerente Técnico, quien desarrolla y supervisa los programas de riego, conservación y recaudación. El subgerente de operación se encarga de ejecutar el plan de riego, coordinar las brigadas de aforo y llevar el control estadístico de la producción. El subgerente de conservación lidera el mantenimiento de la infraestructura hidroagrícola, mientras que el Subgerente de Administración gestiona la recaudación de cuotas y finanzas del módulo (elaboración propia con base en entrevistas técnicas), Figura 5a.

Localización de las Estaciones Meteorológicas

Se recopilieron datos de tres estaciones meteorológicas para el área de estudio. La estación S.J. 3-47 Río Bravo (1951-2010), la Simulación SWAT (1979-2014), y la Estación Automatizada del Módulo III-4 (2016-2020) aportaron datos climáticos diarios, mensuales y anuales. La ubicación de estas estaciones se muestra en la Figura 5b (SMN, 2020).

Ciclos y Subciclos de Producción Agrícola

Se recopilaron y analizaron estadísticas de producción del módulo de riego para ocho ciclos agrícolas (2012-2013 a 2019-2020) y las hidrométricas para 18 ciclos agrícolas (2002-2003 a 2019-2020), con datos organizados en los formatos EAS de la CONAGUA. La información incluye cultivos, superficie sembrada y cosechada, volúmenes, rendimientos, producción, precios y valor de la producción (Asociación de Usuarios Hidráulica Los Ángeles A. C., 2020¹). Los rendimientos óptimos se obtuvieron de los paquetes tecnológicos del Centro de Investigación Regional del Noreste, Campo Experimental Río Bravo (INIFAP, 2023).

Métodos para Calcular la Evapotranspiración del Cultivo de Referencia (ET_o)

La ET_o se calcula utilizando varios métodos: FAO Penman-Monteith recomendado por la FAO, es el método más preciso y ampliamente utilizado. Este fue el método empleado para la ET_o del sitio de estudio (Allen, Pereira, y Raes, 2006). Hargreaves-Samani: Se utiliza cuando no se dispone de datos completos, basándose principalmente en la temperatura y radiación solar. Es una opción más simple, adecuada para climas áridos o semiáridos (Hargreaves y Samani, 1985). Blaney-Criddle: Un método empírico, adecuado cuando solo se cuenta con datos de temperatura y duración del día. Es menos preciso, pero útil en climas más estables y con datos limitados (Blaney y Criddle, 1952). Para el Módulo III-4, se utilizó el método FAO Penman-Monteith, empleando datos de tres estaciones meteorológicas: una base generada con el modelo SWAT, la estación del SMN de la CONAGUA y la estación automatizada del Módulo III-4.

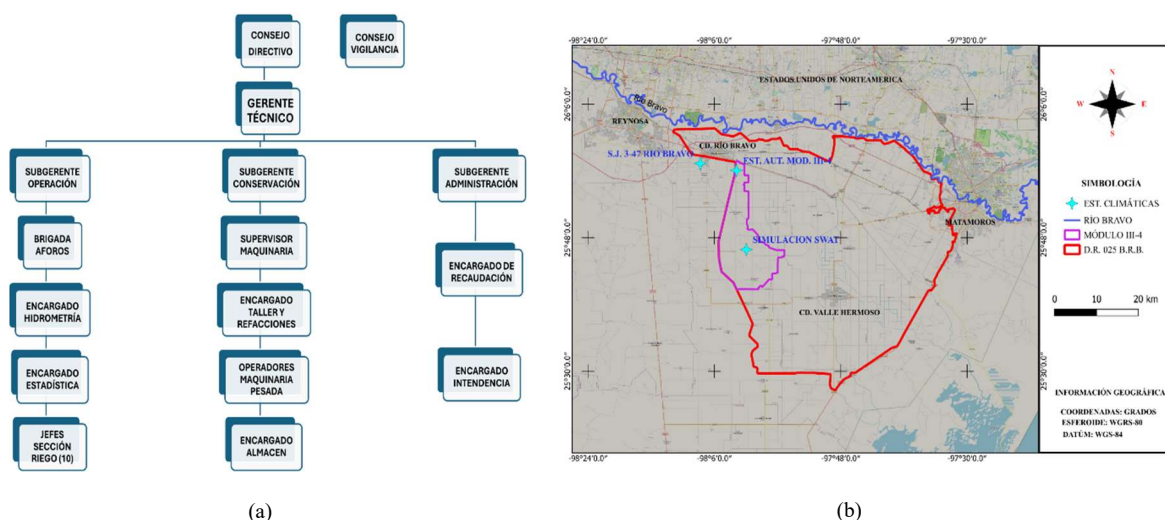


Figura 5. Diagrama general de trabajo y localización geográfica de las estaciones meteorológicas: (a) Diagrama general de trabajo del Módulo de Riego III-4; (b) Localización geográfica de las estaciones meteorológicas utilizadas en el estudio.

Figure 5. General work diagram and geographic location of meteorological stations: (a) General work diagram of Irrigation Module III-4; (b) Geographic location of the meteorological stations used in our study.

Métodos para Calcular la Precipitación Efectiva (Pe)

La precipitación efectiva se puede estimar mediante varios métodos, adaptados a diferentes climas y cultivos; dentro de los más importantes se tienen los siguientes: FAO (CropWat): Calcula la precipitación efectiva considerando la precipitación total y el uso consuntivo de los cultivos, junto con la eficiencia del riego (Allen *et al.*, 2006). USDA (SCS): Basado en relaciones empíricas, es ampliamente utilizado en zonas agrícolas por su adaptabilidad a diversos climas y tipos de cultivos (USDA, 1970). Blaney-Criddle: Más simple y menos preciso, se usa donde solo se dispone de datos de temperatura y precipitación (Blaney y Criddle, 1952). En el Módulo III-4, la precipitación efectiva se calculó con el software CropWat 8.0 de la FAO, utilizando el método SCS del USDA, por su confiabilidad en áreas agrícolas bajo riego (FAO, 2009).

Huella Hídrica de los Cultivos

La Huella Hídrica (HH) es un indicador multidimensional que mide el volumen de agua dulce consumida y contaminada por actividades humanas, mostrando su impacto sobre los recursos hídricos (Chapagain y Hoekstra, 2004). La HH se clasifica en tres categorías, a saber: HHVerde: Agua de lluvia almacenada en el suelo y utilizada por las plantas. HHAzul: Agua superficial y subterránea consumida por las plantas y HHGris: Volumen de agua necesario para diluir contaminantes según normas de calidad (Mekonnen y Hoekstra, 2011). La Huella Hídrica Total (HHTotal) se calculó como el cociente entre el uso de agua por el cultivo y su rendimiento, siguiendo las ecuaciones propuestas por Hoekstra, Chapagain, Aldaya y Mekonnen (2009). De manera similar, se estimaron la HHVerde y la HHAzul.

Productividad del Agua por los Cultivos

La productividad del agua (Pa) se calculó como el cociente entre el valor de la producción agrícola y el volumen neto de agua utilizado, tal como indica la Ecuación 1:

$$P_a = \frac{V_p}{Vol_N} \quad (1)$$

Donde: P_a es la productividad del agua por el cultivo, $\$ m^{-3}$, V_p es el valor de la producción agrícola del cultivo, $\$$, Vol_N es el volumen neto de agua aplicado al cultivo, m^3 .

Valor Económico de la Huella Hídrica (HHvalor)

El HHvalor se calcula como el producto de la productividad del agua y la huella hídrica total, expresando el valor económico de la HH en función de la producción (Ecuación 2):

$$HH_{valor} = P_a * HH_T \quad (2)$$

Donde: HH_{valor} es el Valor Económico de la Huella Hídrica del cultivo, $\$ Mg^{-1}$, P_a es la productividad del agua por cultivo, $\$ m^{-3}$, HH_{Total} es la huella hídrica total del cultivo, $m^3 Mg^{-1}$.

Este indicador se aplicó a cada cultivo para los escenarios de Línea Base (LB) y Condición Real (CR), permitiendo evaluar el impacto económico del estrés hídrico.

Valor de la Producción Agrícola (Vp)

El V_p se calcula mediante el producto del precio medio rural y la producción agrícola, tal como indica la Ecuación 3:

$$V_p = PMR * P \quad (3)$$

Donde: V_p es el Valor de la Producción Agrícola del cultivo, $\$$, PMR es el precio medio rural del producto agrícola para un año base, $\$ Mg^{-1}$, P es la producción del cultivo, en toneladas.

Eficacia del Suministro del Riego (ESR_{hh})

La ESR_{hh} se calcula como la relación entre la suma de la huella hídrica verde y azul en Condición Real (CR) y la huella hídrica total en Línea Base (LB), multiplicada por 100 (Ecuación 4):

$$ESR_{hh} = \left\{ \left[\frac{HH_{VerdeCR} + HH_{AzulCR}}{HH_{TotalLB}} \right] * 100 \right\} \quad (4)$$

Donde: ESR_{hh} es la Eficacia del Suministro del Riego en función de la huella hídrica de los cultivos, %, $HH_{VerdeCR}$ es la huella hídrica verde del cultivo en la Condición Real, $m^3 Mg^{-1}$, HH_{AzulCR} es la huella hídrica azul del cultivo en la Condición Real, $m^3 Mg^{-1}$, $HH_{TotalLB}$ es la huella hídrica total del cultivo para la Línea Base, $m^3 Mg^{-1}$.

Posteriormente, se calculó el valor de la producción agrícola (VP_{ESR}) utilizando la Ecuación 5, que ajusta y relaciona el valor de la producción agrícola del cultivo y la ESR_{HH}.

$$VP_{ESR} = VP * ESR_{hh} \quad (5)$$

Donde: VP_{ESR} es el valor de la producción agrícola del cultivo calculado en función de la Eficacia del Suministro del Riego, \$, VP es el valor de la producción agrícola del cultivo, \$, ESR_{hh} es la Eficacia del Suministro del Riego en función de la huella hídrica de los cultivos, %.

Escenarios de Manejo de los Cultivos (LB y CR)

Se plantearon dos escenarios de manejo de cultivos: Línea Base (LB): Representa un suministro ideal de agua; Condición Real (CR): Refleja el suministro real, considerando la disponibilidad y eficiencia del agua. Se utilizaron las ecuaciones de HHvalor, V_p y ESR_{hh} para ambos escenarios, evaluando el impacto económico del estrés hídrico en la producción agrícola del Módulo III-4. La información climática para el LB se obtuvo con el generador climático del modelo SWAT (1979-2014), mientras que para el CR se usaron datos históricos del módulo (2016-2020).

No se utilizaron los datos meteorológicos de las estaciones automáticas de otros proveedores como Davis Instruments (Plataforma WeatherLinks), porque no tiene instalada ninguna estación agroclimática en la zona del Distrito de Riego 025 B.R.B; el Módulo III-4 si tiene una estación agroclimática instalada en sus lotes, pero su record histórico es muy reciente (2016-2020); la estación 28104, localizada en la Ciudad de Río Bravo, Tamaulipas, operada por el SMN dejó de operar en el año 2010; estas estaciones solo se utilizaron para comparar estadísticamente los datos que simuló el SWAT para el módulo de riego.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Estadísticas Agrícolas del Módulo III-4

El objetivo específico para este apartado fue calcular las estadísticas agrícolas del Módulo III-4, mediante el análisis y procesamiento de la información reportada en los formularios de Estadísticas Agrícolas (EAS), diseñados y normado por la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA), para cada ciclo agrícola.

Superficies. El análisis de la superficie sembrada durante ocho ciclos agrícolas, utilizando una prueba ANOVA de una vía, arrojó un valor F de 11.35, superior al valor crítico de 2.71 para un nivel de significancia del 5%. Las estadísticas descriptivas indicaron que el sorgo grano presentó la mayor media de superficie sembrada (11 765.38 ha), seguido por el maíz amarillo (5 462.53 ha), mientras que la soya frijol mostró la media más baja (58.93 ha). Estos resultados reflejan una marcada variabilidad en la ocupación de la superficie agrícola dentro del módulo. Cuadro 1 y Figura 6a.

Rendimientos. Se evaluaron los rendimientos promedio de los cultivos en el Módulo III-4 durante ocho ciclos agrícolas mediante una prueba ANOVA de una vía. Las hipótesis establecidas fueron: Hipótesis Nula (H_0): Los rendimientos promedio son iguales. Hipótesis Alternativa (H_1): Los rendimientos promedio son diferentes. El valor F calculado (11.02) superó el valor crítico (2.49) al 5% de significancia, lo que llevó a rechazar la hipótesis nula y aceptar la hipótesis alternativa, confirmando diferencias significativas en los rendimientos entre cultivos. Las estadísticas descriptivas mostraron que el maíz blanco tuvo el rendimiento promedio más alto ($7.115 Mg ha^{-1}$), seguido por el maíz amarillo ($6.719 Mg ha^{-1}$) y el sorgo grano ($4.610 Mg ha^{-1}$). En contraste, la soya frijol registró el rendimiento más bajo ($2.200 Mg ha^{-1}$), reflejando la variabilidad en la respuesta de los cultivos, influenciada por la disponibilidad de agua, manejo del riego y condiciones climáticas. Cuadro 2 y Figura 6b.

Cuadro 1. Superficies sembradas por tipo de cultivo en el Módulo III-4 (ha).
Table 1. Cultivated areas by crop in Module III-4 (ha).

Ciclo agrícola	Maíz-Amarillo	Maíz-Blanco	Sorgo-Grano	Algodón	Soya-Frijol	Rye-Gras	Total
2012-2013	1 097.76		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	8 934.60		1 420.87		51.00		10 406.47
2015-2016	10 908.62		8 148.97	793.55	77.00		19 928.14
2016-2017	3 486.78		14 547.00	2 065.22	88.50		20 187.50
2017-2018	9 612.52		7 991.85	2 372.50	65.00		20 041.87
2018-2019	8 260.70	1 163.66	7 945.39	2 693.35	20.00	5.00	20 088.10
2019-2020	574.39	422.26	16 350.48	1 529.59	64.90		18 941.62
Media	5 462.53	792.96	11 765.38	1 439.14	58.93	5.00	18 744.95
Desv. Est.	4 393.57	524.25	6 306.30	999.28	27.03		3 394.86
Coef. Var.	0.80	0.66	0.54	0.69	0.46		0.18

Los rendimientos promedios de los cultivos básicos en Tamaulipas son: maíz (4.39 Mg ha⁻¹), sorgo (2.39 Mg ha⁻¹), y soya (0.71 Mg ha⁻¹) reportados por el SIAP, los cuales incluyen el riego y temporal, donde la falta de riego limita la producción. En contraste, el Módulo III-4, bajo riego complementario, logra rendimientos significativamente más altos, reflejando la efectividad de la irrigación para mejorar la productividad en la región (SIAP, 2020).

Volúmenes netos. Se analizó la aplicación de volúmenes netos de agua a los cultivos en el Módulo III-4 durante ocho ciclos agrícolas mediante una prueba ANOVA de una vía. Las hipótesis establecidas fueron: Hipótesis Nula (H0). Los volúmenes netos aplicados son iguales. Hipótesis Alternativa (H1): Los volúmenes netos aplicados son diferentes. El valor F calculado (11.46) fue superior al valor crítico (2.49) al 5% de significancia, lo que llevó a rechazar la hipótesis nula y aceptar la hipótesis alternativa, indicando diferencias significativas en los volúmenes de agua aplicados entre los cultivos.

Las estadísticas descriptivas indicaron que el maíz blanco tuvo el mayor volumen promedio aplicado (2 680.14 m³ ha⁻¹), seguido por el maíz amarillo (2 442.18 m³ ha⁻¹) y la soya frijol (2 431.63 m³ ha⁻¹). Por otro lado, el sorgo grano presentó el menor volumen promedio aplicado (1 757.94 m³ ha⁻¹). Esta variabilidad refleja diferencias en las necesidades hídricas de cada cultivo y en las estrategias de manejo del riego en el módulo. Cuadro 3; Figura 7a.

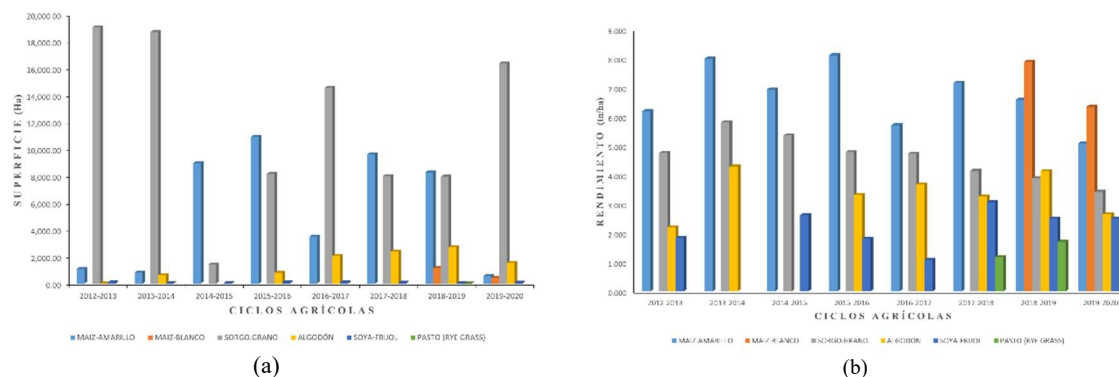


Figura 6. Superficies sembradas y rendimientos: (a) Superficies sembradas por tipo de cultivo en el Módulo de Riego III-4; (b) Rendimientos unitarios por tipo de cultivo del Módulo de Riego III-4
Figure 6. Planted areas and crop yields: (a) Planted areas by crop type in Irrigation Module III-4; (b) Yield per unit area by crop type in Irrigation Module III-4.

Cuadro 2. Rendimientos promedios de los cultivos del Módulo III-4 (Mg ha⁻¹).
Table 2. Average yields of crops in Module III-4 (Mg ha⁻¹)

Ciclo agrícola	Maíz-Amarillo	Maíz-Blanco	Sorgo-Grano	Algodón	Soya-Frijol	Rye-Gras
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	2.200	1.440
Desv. Estandar	1.06	1.10	0.78	0.75	0.66	0.37
Coef. Var.	0.16	0.15	0.17	0.22	0.30	0.26

Volúmenes brutos. Se evaluaron los volúmenes brutos de agua aplicados a los cultivos en el Módulo III-4 durante ocho ciclos agrícolas mediante una prueba ANOVA de una vía. Las hipótesis establecidas fueron: Hipótesis Nula (H0): Los volúmenes brutos aplicados son iguales. Hipótesis Alternativa (H1): Los volúmenes brutos aplicados son diferentes. El valor F calculado (11.47) superó el valor crítico (2.49) al 5% de significancia, lo que llevó a rechazar la hipótesis nula y aceptar la hipótesis alternativa, indicando diferencias significativas en los volúmenes brutos aplicados entre los cultivos.

Las estadísticas descriptivas mostraron que el maíz blanco tuvo el mayor volumen bruto promedio aplicado (4 123.29 m³ ha⁻¹), seguido por el maíz amarillo (3 757.21 m³ ha⁻¹) y la soya frijol (3 740.97 m³ ha⁻¹). Por otro lado, el sorgo grano presentó el menor volumen bruto promedio aplicado (2 704.52 m³ ha⁻¹). Esta variabilidad refleja diferencias en las necesidades hídricas específicas de cada cultivo y en las estrategias de manejo del riego en el módulo. Cuadro 4 y Figura 7B.

Cuadro 3. Volúmenes netos aplicados a los cultivos del Módulo III-4 (m³ ha⁻¹).
Table 3. Net volumes applied to crops in Module III-4 (m³ ha⁻¹).

Ciclo agrícola	Maíz-Amarillo	Maíz-Blanco	Sorgo-Grano	Algodón	Soya-Frijol	Rye-Gras
2012-2013	2 069.690		1 725.480	2 401.750	1 242.370	
2013-2014	2 468.140		1 558.550	2 374.890		
2014-2015	1 313.130		1 246.080		1 242.390	
2015-2016	2 203.990		1 309.470	893.200	1 171.860	
2016-2017	3 630.100		2 755.900	3 524.970	3 085.920	
2017-2018	2 692.700		1 986.290	3 444.360	4 064.150	1 391.000
2018-2019	2 886.000	2 886.000	2 101.470	3 142.830	3 684.850	6 347.900
2019-2020	2 273.720	2 474.280	1 380.250	992.980	2 529.890	
Media	2 442.184	2 680.140	1 757.936	2 396.426	2 431.633	3 869.450
Desv. Estandar	672.970	291.130	508.870	1 092.300	1 230.790	3 505.060
Coef. Var.	0.280	0.110	0.290	0.460	0.510	0.910

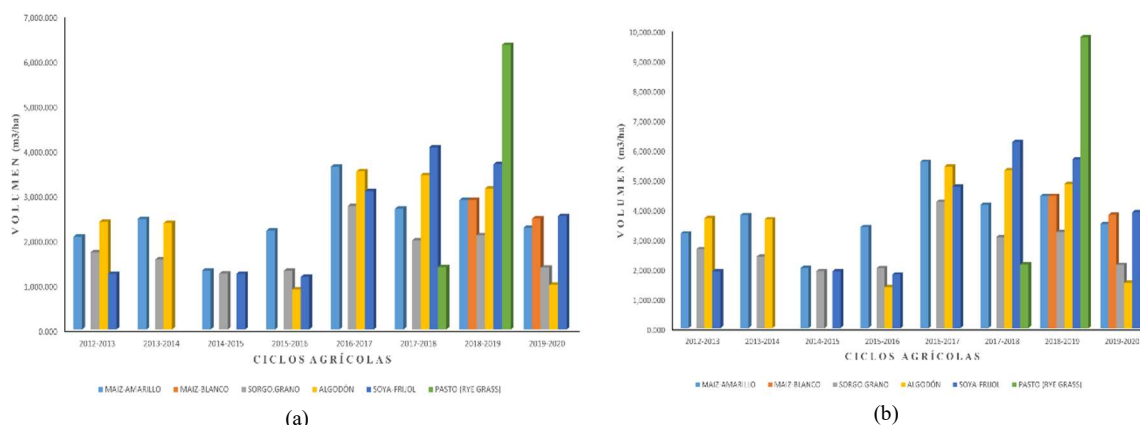


Figura 7. Volúmenes netos y brutos aplicados a los cultivos: (a) Volúmenes netos aplicados a los cultivos del Módulo III-4; (b) Volúmenes brutos aplicados a los cultivos del Módulo de Riego III-4
Figure 7. Net and gross volumes applied to crops: (a) Net volumes applied to crops in Module III-4; (b) Gross volumes applied to crops in Irrigation Module III-4.

Los resultados sobre las diferencias significativas en superficies sembradas, rendimientos y volúmenes netos y brutos aplicados en el Módulo III-4 resaltan la necesidad de ajustar la gestión agrícola y de riego según la demanda hídrica de cada cultivo. Aunque hay variabilidad en estos factores, la superficie sembrada promedio se mantiene en 20 000 ha, lo que limita la efectividad de cualquier ajuste. Para mejorar la gestión hídrica, se recomienda una redistribución estratégica del agua, priorizando cultivos más rentables y con menor demanda de agua en condiciones de escasez. Los planes de riego deben adaptarse por ciclo, considerando tanto la demanda hídrica como el rendimiento, y ajustando la superficie sembrada al agua disponible, lo que optimizaría el uso del recurso y mitigaría el impacto económico del estrés hídrico.

Estadísticas Hidrométricas del Módulo III-4

El objetivo de este apartado es calcular las estadísticas hidrométricas del Módulo III-4 mediante el análisis y procesamiento de la información reportada en los formularios de Estadísticas Agrícolas (EAS), también normadas por la CONAGUA, para cada ciclo y subciclo agrícola.

Cuadro 4. Volúmenes brutos aplicados a los cultivos del Módulo III-4 ($\text{m}^3 \text{ha}^{-1}$).
Table 4. Gross volumes applied to crops in Module III-4 ($\text{m}^3 \text{ha}^{-1}$).

Ciclo agrícola	Maíz-Amarillo	Maíz-Blanco	Sorgo-Grano	Algodón	Soya-Frijol	Rye-Gras
2012-2013	3 184.138		2 654.585	3 695.000	1 911.338	0.000
2013-2014	3 797.138		2 397.769	3 653.677	0.000	0.000
2014-2015	2 020.200		1 917.046	0.000	1 911.369	0.000
2015-2016	3 390.754		2 014.569	1 374.154	1 802.862	0.000
2016-2017	5 584.769		4 239.846	5 423.031	4 747.569	0.000
2017-2018	4 142.615		3 055.831	5 299.015	6 252.538	2 140.000
2018-2019	4 440.000	4 440.000	3 233.031	4 835.123	5 669.000	9 766.000
2019-2020	3 498.031	3 806.585	2 123.462	1 527.662	3 892.138	0.000
Media	3 757.206	4 123.292	2 704.517	3 686.809	3 740.974	5 953.000
Desv. Est.	1 035.332	447.892	782.882	1 680.464	1 893.525	5 392.396
Coef. Var.	0.276	0.109	0.289	0.456	0.506	0.906

Volúmenes netos y brutos. Se utilizó una prueba ANOVA para evaluar los volúmenes netos y brutos utilizados y requeridos. El análisis de volúmenes netos mostró un valor F de 609.67 (mayor que el crítico de 3.18), indicando diferencias significativas entre los volúmenes netos requeridos (134 225.73 miles de m³) y utilizados (43 777.01 miles de m³).

De igual forma, el análisis de volúmenes brutos arrojó un valor F de 703.57, confirmando una discrepancia significativa entre el volumen bruto requerido (206 501.13 miles de m³) y el utilizado (68 197.14 miles de m³). Esto revela una insuficiencia de agua para cubrir la demanda hídrica del módulo. Se sugiere diseñar planes de riego diferenciados, priorizando cultivos de menor demanda hídrica y ajustando la superficie sembrada a la disponibilidad real de agua, lo que mejoraría la sostenibilidad y reduciría los impactos económicos del estrés hídrico en el módulo. Cuadro 5.

Valor Económico de la Huella Hídrica (HHvalor)

El objetivo de esta sección fue evaluar el impacto económico del estrés hídrico sobre la producción agrícola del Módulo III-4 mediante el HHvalor, calculado para la Línea Base (LB) y la Condición Real (CR). En la LB, el HHvalor es de \$ 1 578 368 023.84 (Cuadro 6), mientras que en la CR desciende a \$ 780 257 376.20 (Cuadro 7), reflejando

Cuadro 5. Disponibilidad media anual de agua para riego en el Módulo III-4 (Miles de m³).
Table 5. Average annual water availability for irrigation in Module III-4 (Thousands of m³).

Ciclo agrícola	Sup. Semb.	VNU	VBU	VNR	VBR
2002-2003	20 647.690	21 056.200	38 284.750	127 336.550	195 902.390
2003-2004	20 647.690	9 702.330	20 548.000	129 839.550	199 753.160
2004-2005	20 720.950	58 162.400	89 480.580	136 295.350	209 685.150
2005-2006	20 720.950	51 647.460	81 980.090	134 705.570	207 239.350
2006-2007	20 646.240	45 607.800	70 165.920	133 151.200	204 847.990
2007-2008	20 646.240	71 409.900	102 014.100	130 457.740	200 704.220
2008-2009	20 708.540	54 440.270	86 413.130	129 444.460	199 145.330
2009-2010	20 744.260	28 334.470	50 597.280	134 900.620	207 539.410
2010-2011	20 755.000	77 600.750	117 576.900	133 584.430	205 514.510
2011-2012	20 654.390	65 454.400	97 693.200	132 064.370	203 175.950
2012-2013	20 733.640	37 101.400	55 375.200	128 261.330	197 325.130
2013-2014	20 750.080	33 447.440	50 200.200	130 052.880	200 081.360
2014-2015	20 771.250	12 074.860	20 871.000	138 428.950	212 967.610
2015-2016	20 790.650	34 986.910	54 631.810	140 045.870	215 455.190
2016-2017	20 790.650	61 571.140	92 769.870	137 381.760	211 356.550
2017-2018	20 790.650	48 152.720	77 265.700	143 860.120	221 323.260
2018-2019	20 790.650	51 125.390	80 716.680	144 726.950	222 656.840
2019-2020	20 481.380	26 110.380	40 964.040	131 525.480	202 346.900
Media	20 710.610	43 777.010	68 197.140	134 225.730	206 501.130
Desv. Est.	79.200	19 725.630	28 077.700	5 086.550	7 825.460
Coef. Var.	0.000	0.450	0.410	0.040	0.040

Sup. Semb. = superficie sembrada; VNU = volumen neto utilizado; VBU = volumen bruto utilizado; VNR = volumen neto requerido; VBR = volumen bruto requerido.
Sup. Semb. = cultivated area; VNU = net volume used; VBU = gross volume used; VNR = net volume required; VBR = gross volume required.

Cuadro 6. Impacto económico del estrés hídrico calculado mediante el indicador HHvalor para la LB.
Table 6. Economic impact of water stress calculated using the HHvalor indicator for LB.

Cultivo	Sup. Semb.	Y	HH _T	Pa	HH _{Valor}	HH _{ValorHa}	HH _{ValorModulo}
	ha	Mg ha ⁻¹	m ³ Mg ⁻¹	\$ m ⁻³	\$ Mg ⁻¹	\$ ha ⁻¹	\$
Maíz amarillo	5 000.00	8.00	1 186.36	7.67	9 099.38	72 795.05	363 975 248.00
Maíz blanco	200.00	8.00	1 217.06	8.94	10 880.52	87 044.13	17 408 826.24
Sorgo	12 000.00	6.00	1 317.80	7.79	10 265.66	61 593.97	739 127 664.00
Algodón	1 260.00	5.00	2 430.80	29.67	72 121.84	360 609.18	454 367 566.80
Soya	60.00	2.50	3 309.04	7.02	23 229.46	58 073.65	3 484 419.12
Rye-grass	1.00	2.00	3 643.80	0.59	2 149.84	4 299.68	4 299.68
Total	18 521.00		13 104.86		127 746.70	644 415.67	1 578 368 023.84
Media	3 086.83	5.25	2 184.14	10.28	21 291.12	107 402.61	263 061 337.31
Desv. Est.	4 763.61	2.60	1 107.99	9.95	25 816.61	127 190.97	306 706 757.64
Coef. Var.	1.54	0.50	0.51	0.97	1.21	1.18	1.17

Sup. Semb = Superficie sembrada; Y = rendimiento del cultivo; HH_T = es la huella hídrica total del cultivo; Pa = es la productividad del agua por cultivo; HH_{Valor} = es el valor económico de la huella hídrica total del cultivo; HH_{ValorHa} = es el valor económico de la huella hídrica total del cultivo por hectárea; HH_{ValorModulo} = es el valor total de la huella hídrica del total de la superficie sembrada del cultivo en el módulo de riego.

Sup. Semb = cultivated area; Y = crop yield; HH_T = total water footprint of the crop; Pa = water productivity per crop; HH_{Valor} = economic value of the total water footprint of the crop; HH_{ValorHa} = economic value of the total water footprint of the crop per hectare; HH_{ValorModulo} = total economic value of the water footprint for the entire cultivated area of the crop in the irrigation module.

una reducción del 50.57% debido a la menor disponibilidad de agua y la reducción de rendimientos. La prueba ANOVA de una vía mostró un valor F calculado de 2.75, mientras que el valor crítico de F al 5% de significancia fue de 3.68, lo que indica que no hay diferencias estadísticamente significativas entre ambos escenarios. Sin embargo, el análisis sí evidencia una disminución considerable en el valor económico total de la huella hídrica en la CR. El análisis sugiere que la rentabilidad se ve afectada por el estrés hídrico, y para mejorar la eficiencia del agua, se recomienda priorizar cultivos con mayor valor económico por unidad de agua en escenarios de escasez.

Cuadro 7. Impacto económico del estrés hídrico calculado mediante el indicador HHvalor para la CR.
Table 7. Economic impact of water stress calculated using the HHvalor indicator for RC.

Cultivo	Sup. Semb.	Y	HHT	Pa	HHValor	HHValor	HHValorModulo
	ha	Mg ha ⁻¹	m ³ Mg ⁻¹	\$ m ⁻³	\$ Mg ⁻¹	\$ ha ⁻¹	\$
Maíz amarillo	5 462.53	6.72	729.18	7.67	5 592.82	37 583.77	205 302 454.75
Maíz blanco	792.96	7.12	766.59	8.94	6 853.29	48 795.41	38 692 811.49
Sorgo	11 765.38	4.71	789.15	7.79	6 147.48	28 954.65	340 662 471.78
Algodón	1 259.25	3.36	1 543.57	29.67	45 797.76	153 880.49	193 774 004.51
Soya	58.93	2.20	1 995.73	7.02	14 010.01	30 822.01	1 816 341.17
Rye-grass	5.00	1.40	2 250.00	0.59	1 327.50	1 858.50	9 292.50
Total	19 344.05		8 074.22		13 288.14		780 257 376.20
Media	3 224.01	4.25	1 345.70	10.28	6 500.39	50 315.81	130 042 896.03
Desv. Est.	4 650.08	2.35	678.92	9.95	1.24	53 055.59	138 406 565.18
Coef. Var.	1.44	0.55	0.50	0.97		1.05	1.06

Valor de la Producción Agrícola (Vp)

El objetivo de esta sección es evaluar el impacto económico del estrés hídrico sobre la producción agrícola del Módulo III-4 utilizando el Vp comparando la LB con la CR. En la LB, el total del Vp es de \$ 439 779 200.00, con un promedio de \$ 73 296 533.33 (Cuadro 8), mientras que en la CR desciende a un total de \$ 367 437 210.68 (Cuadro 9), con un promedio de \$ 61 239 535.11, lo que representa una reducción del 16.45% debido a la escasez de agua.

La prueba ANOVA mostró un valor F calculado de 2.0219, por debajo del valor crítico de 3.6823, lo que indica que no hay diferencias estadísticamente significativas entre ambos escenarios. Aunque el coeficiente de variación es más bajo en la CR (1.1818 frente a 1.2588 en la LB), reflejando una mayor estabilidad relativa, la reducción en la disponibilidad de agua impacta de manera más uniforme el valor de la producción. Los cultivos más afectados incluyen el sorgo, maíz amarillo y algodón, que representan la mayor superficie sembrada en el módulo.

El análisis sugiere priorizar cultivos más rentables y de menor demanda hídrica en escenarios de escasez, fomentando una gestión hídrica más eficiente y sostenible para mitigar las pérdidas económicas.

Eficacia del Suministro del Riego (ESRhh)

El objetivo de esta sección es evaluar el impacto económico del estrés hídrico sobre la producción agrícola del Módulo III-4 mediante ESRhh, calculada para la LB y para la CR. En la LB, el ESRhh alcanza el 100%, asegurando rendimientos sin restricciones de agua y un valor de producción total de \$ 439 779 200.00 (Cuadro 10), con un promedio de \$ 73 296 533.33. En la CR, la eficacia se reduce al 61.66% (Cuadro 12), con un valor total de \$ 224 368 393.75 (Cuadro 11) y un promedio de \$ 37 394 732.29, lo que representa una disminución del 48.98% en el valor económico del riego debido al estrés hídrico. La prueba ANOVA arrojó un valor F calculado de 2.3224, menor que el valor crítico de 3.6823, lo que indica que no hay diferencias estadísticamente significativas entre ambos escenarios.

Cuadro 8. Impacto económico del estrés hídrico calculado mediante el indicador Vp para la LB.
Table 8. Economic impact of water stress calculated using the Vp indicator for the LB.

Cultivo	Sup. Semb.	Sup. Cos.	Y	P	PMR	V _p
	----- ha -----		Mg ha ⁻¹	Mg	\$ Mg ⁻¹	\$ del año 2020
Maíz amarillo	5 000.00	5 000.00	8.00	40 000.00	3 430.00	137 200 000.00
Maíz blanco	200.00	200.00	8.00	1 600.00	3 488.00	5 580 800.00
Sorgo	12 000.00	12 000.00	6.00	72 000.00	3 138.00	225 936 000.00
Algodón	1 260.00	1 260.00	5.00	6 300.00	11 110.00	69 993 000.00
Soya	60.00	60.00	2.50	150.00	7 100.00	1 065 000.00
Rye-grass	1.00	1.00	2.00	2.00	2 200.00	4 400.00
Total	18 521.00	18 521.00		120 052.00		439 779 200.00
Media	3 086.83	3 086.83	5.25	20 008.67	5 077.67	73 296 533.33
Desv. Est.	4 763.61	4 763.61	2.60	29 746.23	3 398.94	92 269 090.09
Coef. Var.	1.54	1.54	0.50	1.49	0.67	1.26

Sup. Semb. = es la superficie sembrada de cada cultivo; Sup. Cos. = es la superficie cosechada de cada cultivo; Y = es el rendimiento potencial del cultivo sin estrés hídrico; P = es la producción total de cada cultivo; PMR = es el precio medio rural por tonelada de producto año base 2020; V_p = es el valor económico de la producción agrícola de los cultivos.

Sup. Semb. = cultivated area of each crop; Sup. Cos. = harvested area of each crop; Y = potential yield of the crop without water stress; P = total production of each crop; PMR = average rural price per ton of product (base year 2020); V_p = economic value of the agricultural production of the crops.

Cuadro 9. Impacto económico del estrés hídrico calculado mediante el indicador Vp para la CR.
Table 9. Economic impact of water stress calculated using the Vp indicator for the CR.

Cultivo	Sup. Semb.	Sup. Cos.	Y	P	PMR	VP
	----- ha -----		Mg ha ⁻¹	Mg	\$ Mg ⁻¹	\$ del año 2020
Maíz amarillo	5 462.53	5 462.53	6.720	36 708.20	3 430.00	125 909 131.49
Maíz blanco	792.96	792.96	7.120	5 645.88	3 488.00	19 692 812.70
Sorgo	11 765.38	11 765.38	4.710	55 414.94	3 138.00	173 892 081.09
Algodón	1 259.25	1 259.25	3.360	4 231.08	11 110.00	47 007 298.80
Soya	58.93	58.93	2.200	129.65	7 100.00	920 486.60
Rye-grass	5.00	5.00	1.400	7.00	2 200.00	15 400.00
Total	19 344.05	19 344.05		102 136.74		367 437 210.68
Media	3 224.01	3 224.01	4.25	17 022.79	5 077.67	61 239 535.11
Desv. Est.	4 650.08	4 650.08	2.35	23 364.29	3 398.94	72 371 571.54
Coef. Var.	1.44	1.44	0.55	1.37	0.67	1.18

Comparación de resultados de los indicadores HHvalor, Vp y ESRhh

El objetivo para esta sección es realizar un análisis comparativo de los impactos económicos del estrés hídrico en los cultivos del Módulo III-4 utilizando los índices HHvalor, Vp y ESRhh, evaluados para la LB y la CR. Los resultados son los siguientes: En la LB, el HHvalor asciende a \$ 1 578 368 023.84 (Cuadro 13), mientras que en la CR disminuye a \$ 780 257 376.20 (Cuadro 14), generando un impacto económico de \$ 798 110 647.64 (Figura 8a, Cuadro 15), equivalente a una reducción del 50.57%. El Vp muestra una reducción del 16.45%, pasando de \$ 439 779 200.00 en la LB a \$ 367 437 210.68 en la CR. La ESRhh cae del 100% en la LB al 61.66% en la CR, con un impacto económico de \$ 215 410 806.25 (Figura 8a, Cuadro 15). La prueba ANOVA entre los tres indicadores muestra un valor F de 2.715, por debajo del crítico (3.098), indicando que no hay diferencias significativas entre los escenarios de LB y CR. Sin embargo, los indicadores revelan pérdidas económicas significativas, siendo mayores para HHvalor (50.57%) y ESRhh (48.98%), en comparación con Vp (16.45%).

Cuadro 10. Impacto económico del estrés hídrico calculado mediante el indicador ESRhh para la LB.
Table 10. Economic impact of water stress calculated using the ESRhh indicator for the LB.

Cultivo	Sup. Cos.	Y	P	PMR	V _p	ESR _{HH}	VP _{ESR}
	ha	Mg ha ⁻¹	Mg	\$ Mg ⁻¹	\$ año 2020	%	\$ año 2020
Maíz amarillo	5 000.00	8.00	40 000.00	3 430.00	137 200 000.00	100.00	137 200 000.00
Maíz blanco	200.00	8.00	1 600.00	3 488.00	5 580 800.00	100.00	5 580 800.00
Sorgo	12 000.00	6.00	72 000.00	3 138.00	225 936 000.00	100.00	225 936 000.00
Algodón	1 260.00	5.00	6 300.00	11 110.00	69 993 000.00	100.00	69 993 000.00
Soya	60.00	2.50	150.00	7 100.00	1 065 000.00	100.00	1 065 000.00
Rye-grass	1.00	2.00	2.00	2 200.00	4 400.00	100.00	4 400.00
TOTAL	18 521.00		120 052.00		439 779 200.00		439 779 200.00
Media	3 086.83	5.25	20 008.67	5 077.67	73 296 533.33	100.00	73 296 533.33
Desv. Est.	4 763.61	2.60	29 746.23	3 398.94	92 269 090.09	0.00	92 269 090.09
Coef. Var.	1.54	0.50	1.49	0.67	1.26	0.00	1.26

ESR_{HH} = eficacia del suministro del riego en función de la huella hídrica de los cultivos; VP_{ESR} = valor de la producción en función de la eficacia del suministro del riego.
 ESR_{HH} = irrigation supply efficiency based on the water footprint of the crops; VP_{ESR} = production value based on the irrigation supply efficiency.

Cuadro 11. Impacto económico del estrés hídrico calculado mediante el indicador ESRhh para la CR.
Table 11. Economic impact of water stress calculated using the ESRhh indicator for the RC.

Cultivo	Sup. Cos.	Y	P	PMR	V _p	ESR _{HH}	VP _{ESR}
	ha	Mg ha ⁻¹	Mg	\$ Mg ⁻¹	\$ año 2020	%	\$ año 2020
Maíz amarillo	5 462.53	6.72	36 708.20	3 430.00	125 909 131.49	61.47	77 396 343.13
Maíz blanco	792.96	7.12	5 645.88	3 488.00	19 692 812.70	63.03	12 412 379.84
Sorgo	11 765.38	4.71	55 414.94	3 138.00	173 892 081.09	59.88	104 126 578.16
Algodón	1 259.25	3.36	4 231.08	11 110.00	47 007 298.80	63.54	29 868 437.66
Soya	58.93	2.20	129.65	7 100.00	920 486.60	60.31	555 145.47
Rye-grass	5.00	1.40	7.00	2 200.00	15 400.00	61.75	9 509.50
TOTAL:	19 344.05		102 136.74		367 437 210.68		224 368 393.75
Media	3 224.01	4.25	17 022.79	5 077.67	61 239 535.11	61.66	37 394 732.29
Desv. Est.	4 650.08	2.35	23 364.29	3 398.94	72 371 571.54	1.45	43 563 381.89
Coef. Var.	1.44	0.55	1.37	0.67	1.18	0.02	1.16

El HHvalor ofrece una evaluación más integral del uso del agua, la ESRhh destaca la baja eficiencia del riego en la CR, y el Vp refleja pérdidas económicas directas en la producción. El estudio de Chapagain y Hoekstra (2004) estima la huella hídrica azul de varios cultivos en climas áridos y semiáridos. Para el maíz es de 1220 m³ Mg⁻¹, para el sorgo 1440 m³ Mg⁻¹, para el algodón 3400 m³ Mg⁻¹, y para la soya 2000 m³ Mg⁻¹. La investigación destaca la cantidad de agua utilizada, diferenciando entre agua azul y verde, pero no asigna un valor económico, como lo hace el presente estudio.

Evapotranspiración del Cultivo de Referencia (ETo) para Tres Sitios

El objetivo de este tema es evaluar la ETo para tres sitios localizados en el Módulo III-4 mediante el uso de la metodología FAO Penman-Monteith y las variables del clima. La ETo media fue de 5.54 mm día⁻¹ (SMN), 5.93 mm día⁻¹ (SWAT) y 5.94 mm día⁻¹ (EstAut), con baja variación, lo que refleja consistencia en las mediciones. La correlación polinómica mostró un coeficiente de determinación (R²) de 0.7855, indicando una correlación

Cuadro 12. Eficacia del Suministro del Riego (ESRhh) para (LB) y (CR).
Table 12. Irrigation Supply Efficiency (ESRhh) for (LB) and (RC).

Cultivo	Eficacia del Suministro del Riego (ESRHH)	
	(LB)	(CR)
Maíz amarillo	100.00	61.47
Maíz blanco	100.00	63.03
Sorgo	100.00	59.88
Algodón	100.00	63.54
Soya	100.00	60.31
Rye-grass	100.00	61.75
Media	100.00	61.66
Desv. Est.	0	1.44
Coef. Var.	0	0.02

Cuadro 13. Índices de los impactos económicos para LB.
Table 13. Indices of economic impact for LB.

Cultivo	HH _{valor}	V _p	ESR _{hh}
	\$	\$ del 2020	\$ del 2020
Maíz amarillo	363 975 248.00	137 200 000.00	137 200 000.00
Maíz blanco	17 408 826.24	5 580 800.00	5 580 800.00
Sorgo	739 127 664.00	225 936 000.00	225 936 000.00
Algodón	454 367 566.80	69 993 000.00	69 993 000.00
Soya	3 484 419.12	1 065 000.00	1 065 000.00
Rye-grass	4 299.68	4 400.00	4 400.00
TOTAL	1 578 368 023.84	439 779 200.00	439 779 200.00
Media	263 061 337.31	73 296 533.33	73 296 533.33
Desv. Est.	306 706 757.64	92 269 090.09	92 269 090.09
Coef. Var.	1.17	1.26	1.26

moderadamente fuerte entre las fuentes de datos. La ANOVA reveló un valor F de 0.355, menor al crítico (2.816), y una probabilidad de 0.785 ($P > 0.05$), aceptando la hipótesis nula de no diferencias significativas en las medias de la ETo entre los tres sitios. La ETo mostró tendencias similares, con máximos en verano (junio-agosto) y mínimos en invierno (enero, noviembre, diciembre), validando la consistencia de las mediciones. Estos resultados resaltan la necesidad de ajustar el riego durante periodos de alta ETo para mitigar el estrés hídrico y reducir pérdidas económicas en la producción (Figura 8b).

El International Water Management Institute (IWMI, 1998) reportó una ETo promedio para el DR. 025 de 1756 mm año⁻¹; la cual es ligeramente menor que la promedio calculada para los tres sitios del estudio (1 844 mm año⁻¹).

Limitaciones del estudio. Este análisis del estrés hídrico en el Módulo III-4 mediante los indicadores HH_{valor}, V_p y ESR_{hh} presenta algunas limitaciones: (a) la falta de mediciones directas y en tiempo real de variables agroclimáticas, lo que afecta la precisión de las estimaciones de la ETo; (b) la dependencia de la base de datos climática generada por WXGEN del modelo SWAT, que aunque cubre un amplio rango histórico, puede no captar las variaciones climáticas más recientes; y (c) la exclusión de la huella hídrica gris, lo que limita la evaluación integral del uso del agua en términos de calidad y contaminación. Estas limitaciones sugieren áreas para futuras investigaciones que aborden estas variables y mejoren la precisión de los modelos.

Cuadro 14. Índices de los impactos económicos para CR.
Table 14. Indices of economic impacts for RC.

Cultivo	HH _{valor}	V _p	ESR _{hh}
	\$	\$ del 2020	\$ del 2020
Maíz amarillo	205 302 454.75	125 909 131.49	77 396 343.13
Maíz blanco	38 692 811.49	19 692 812.70	12 412 379.84
Sorgo	340 662 471.78	173 892 081.09	104 126 578.16
Algodón	193 774 004.51	47 007 298.80	29 868 437.66
Soya	1 816 341.17	920 486.60	555 145.47
Rye-grass	9 292.50	15 400.00	9 509.50
TOTAL:	780 257 376.20	367 437 210.68	224 368 393.75
Media	130 042 896.03	61 239 535.11	37 394 732.29
Mediana	116 233 408.00	33 350 055.75	21 140 408.75
Desv. Est.	138 406 565.18	72 371 571.54	43 563 381.89
Coef. Var.	1.06	1.18	1.16

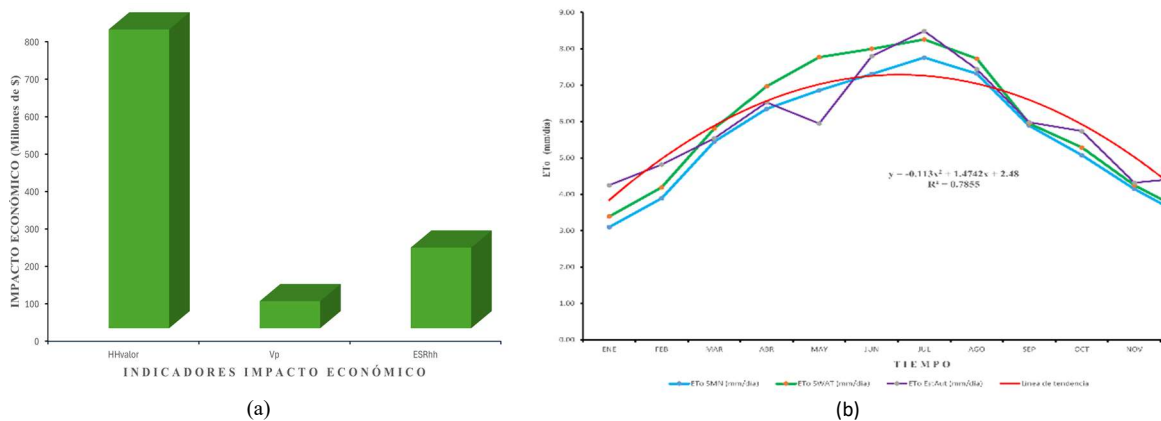


Figura 8. Impactos económicos y análisis de la Evapotranspiración del Cultivo de Referencia: (a) Comparación de los impactos económicos del estrés hídrico; (b) Análisis estadístico de la Evapotranspiración del Cultivo de Referencia en tres sitios del Módulo

Figure 8. Economic impacts and reference crop evapotranspiration analysis: (a) Comparison of the economic impacts of water stress; (b) Statistical analysis of reference crop evapotranspiration in three sites of the Module.

Implicaciones del estudio. Los hallazgos de este estudio proporcionan una comprensión más profunda del impacto económico del estrés hídrico y su aplicación en la gestión del riego en México. El enfoque con los tres indicadores (HHvalor, Vp y ESRhh) permite evaluar la rentabilidad, eficiencia y sostenibilidad del uso del agua, siendo relevante para más de 400 módulos distribuidos en 86 Distritos de Riego que abarcan 8 millones de hectáreas en México. Agencias como CONAGUA, SADER e instituciones de investigación pueden utilizar esta metodología para mejorar la gestión hídrica y optimizar la producción agrícola.

Recomendaciones para investigaciones futuras. Se sugiere incluir la evaluación de la huella hídrica gris para analizar la calidad del agua en la sostenibilidad hídrica de la agricultura de riego. Además, se recomienda investigar los coeficientes de cultivo (Kc) específicos de los principales cultivos del Módulo III-4 para mejorar la precisión de la demanda hídrica. Finalmente, se propone implementar redes de estaciones agrometeorológicas automatizadas para obtener datos agroclimáticos más precisos y en tiempo real, beneficiando a investigadores y usuarios.

Cuadro 15. Impactos económicos del estrés hídrico para los cultivos sembrados en el Módulo III-4.
Table 15. Economic impacts of water stress for crops cultivated in Module III-4.

Cultivo	HH _{valor}	V _p	ESR _{hh}	PROMEDIO
	\$	\$ del 2020	\$ del 2020	\$
Maíz amarillo	158 672 793.25	11 290 868.51	59 803 656.87	76 589 106.21
Maíz blanco	-21 283 985.25	-14 112 012.70	-6 831 579.84	-14 075 859.26
Sorgo	398 465 192.22	52 043 918.91	121 809 421.84	190 772 844.32
Algodón	260 593 562.29	22 985 701.20	40 124 562.34	107 901 275.28
Soya	1 668 077.95	144 513.40	509 854.53	774 148.63
Rye-grass	-4 992.82	-11 000.00	-5 109.50	-7 034.11
TOTAL	798 110 647.64	72 341 989.32	215 410 806.25	361 223 350.95
Media	133 018 441.27	12 056 998.22	35 901 801.04	60 325 746.85
Desv. Est.	170 969 544.45	23 200 596.28	49 673 509.40	80 332 331.39
Coef. Var.	1.29	1.92	1.38	1.33

Posibles sesgos y soluciones. El estudio reconoce algunos sesgos relacionados con la heterogeneidad de los datos meteorológicos y agrícolas, así como con la dependencia de métodos analíticos consistentes. Para mitigar estos sesgos, se aplicó una metodología estadística rigurosa, incluyendo ANOVA y análisis de correlación para validar la coherencia de los resultados. La elección del generador climático WXGEN del modelo SWAT permitió hacer frente a las limitaciones mencionadas, proporcionando cobertura temporal más amplia y consistente. La inclusión de los tres indicadores (HHvalor, Vp y ESRhh) permitió una evaluación más robusta del impacto económico del estrés hídrico desde distintas perspectivas.

CONCLUSIONES

Este estudio demostró suficiente evidencia empírica y estadística, con lo cual se demostró fehacientemente que el impacto económico del estrés hídrico en el Módulo III-4 puede evaluarse de manera integral mediante los indicadores HHvalor, Vp y ESRhh, mostrando variaciones significativas según la métrica. El HHvalor registró la mayor disminución (50.57%), seguido por la ESRhh (48.98%), mientras que el Vp reflejó una caída del 16.45%, lo que indica pérdidas económicas directas debido a la escasez de agua. La comparación entre los escenarios de LB y CR permitió cuantificar un impacto económico promedio de \$ 361 223 351.00 entre los tres indicadores, ofreciendo una herramienta robusta para la toma de decisiones en la gestión de recursos hídricos en módulos de riego en México. Este enfoque es relevante en un contexto de escasez de agua y cambio climático, aportando información estratégica para mejorar la planificación del riego, la asignación de recursos y la formulación de políticas agrícolas. El HHvalor se destaca como un indicador multidimensional, integrando el valor económico y el uso eficiente del agua, resaltando la necesidad de políticas de riego más efectivas para mejorar la sostenibilidad hídrica y la resiliencia agrícola en el Distrito de Riego 025.

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

Deben declararse todas las fuentes de financiamiento para la investigación reportada.

CONTRIBUCIÓN DE LOS AUTORES

Conceptualización, metodología, análisis formal, investigación, escritura, preparación del borrador original, C.L.L. Validación, curación de datos: J.F.V. 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 expresa un sincero y profundo agradecimiento a los productores agrícolas, integrantes del consejo directivo y personal técnico del Módulo de Riego III-4, perteneciente a la *Asociación de Usuarios Hidráulica Los Ángeles, A.C.*, en el Distrito de Riego 025 Bajo Río Bravo, Tamaulipas. De igual manera, se agradece la colaboración brindada por los Módulos 3 y 9 del Distrito de Riego 005 Delicias, Chihuahua. Su disposición, conocimientos y apoyo resultaron fundamentales para el desarrollo de esta investigación.

LITERATURA CITADA

- Allen, R. G., Pereira, S. L., Raes, D., & Smith, M. (2006). *Evapotranspiración del cultivo, guías para la determinación de los requerimientos de agua de los cultivos*. Estudio Rome, Italy: FAO.
- ANUR (Asociación Nacional de Usuarios de Riego). (2020). Información de los módulos de riego en México. Consultada el 23 de febrero, 2024, desde <https://anur.org.mx/>
- Bagnouls, F., & Gaussen, H. (1957). Les climats biologiques et leur classification. In *Annales de géographie* (pp. 193-220). Paris, France: Armand Colin.
- Blaney, H. F., & Criddle, W. D. (1952). 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.
- Chapagain, A. K., & Hoekstra, A. Y. (2004). *Water footprints of nations (Value of Water Resources Report Series; No. 16)*. The Netherlands: Unesco-IHE Institute for Water Education.
- CONAGUA (Comisión Nacional del Agua). (2024). Sistema Nacional de Información del Agua (SINA 3.0). Consultada el 23 de febrero, 2024, desde <https://sinav30.conagua.gob.mx:8080/SINA/?opcion=base>
- CONAGUA (Comisión Nacional del Agua). (2012). *Programa Hídrico Regional Visión 2030. Región Hidrológico-Administrativa VI Río Bravo*. Distrito Federal, México: CONAGUA.
- FAO (Food and Agriculture Organization of the United Nations). (2009). *CropWat 8.0 for Windows: Water requirements and irrigation scheduling program*. Rome, Italy: FAO Land and Water Division.
- Gerten, D., & Rost, S. (2010). *Climate change impacts on agricultural water stress and impact mitigation potential*. Germany: Potsdam Institute for Climate Impact Research (PIK).
- 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*. Enschede, The Netherlands: Water Footprint Network.
- INEGI (Instituto Nacional de Estadística y Geografía). (2014a). Clasificación de suelos bajo el sistema WRB-2014. Consultada el 23 de febrero, 2024, desde <https://www.inegi.org.mx/temas/edafologia/>
- INEGI (Instituto Nacional de Estadística y Geografía). (2014b). Síntesis geográfica del estado de Tamaulipas. Consultada el 23 de febrero, 2024, desde <https://www.inegi.org.mx/temas/mg/>
- INEGI (Instituto Nacional de Estadística y Geografía). (2014c). Carta de Climas de México, Serie V. Consultada el 23 de febrero, 2024, desde <https://www.inegi.org.mx/temas/climatologia/>
- Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (INIFAP). (2023). Paquetes tecnológicos para la producción de cultivos del norte de Tamaulipas: maíz, sorgo, algodón y otros. Tamaulipas México: INIFAP.
- International Water Management Institute (IWMI). (1998). Analysis of irrigation performance in the Bajo Río Bravo and Bajo Río San Juan Irrigation Districts. Tamaulipas, Mexico: IWMI.
- Khan, T., Nouri, H., Booi, M. J., Hoekstra, A. Y., Khan, H., & Ullah, I. (2021). Water footprint, blue water scarcity, and economic water productivity of irrigated crops in Peshawar Basin, Pakistan. *Water*, 13(9), 1-17. <https://doi.org/10.3390/w13091249>
- Martínez-Austria, P. F., & Patiño-Gómez, C. (2012). Efectos del cambio climático en la disponibilidad de agua en México. *Tecnología y Ciencias del Agua*, 3(1), 5-20.
- Mejía-Saenz, E., Palacios-Vélez, E., Chávez-Morales, J., Zazueta-Ranahan, F., Tijerina-Chávez, L., & Casas-Díaz, E. (2003). Evaluación económica del proceso de transferencia del Distrito de Riego 011 Alto Río Lerma, Guanajuato, México. *Terra Latinoamericana*, 21(4), 523-531.
- 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>
- QGIS.org (2021). *QGIS Geographic Information System. User's Guide. Version 3.18*. Grüt, Switzerland: QGIS Association.
- Renault, D., & Wallender, W. W. (2000). Nutritional water productivity and diets. *Agricultural Water Management*, 45(3), 275-296. [https://doi.org/10.1016/S0378-3774\(99\)00107-9](https://doi.org/10.1016/S0378-3774(99)00107-9)
- SEGOB (Secretaría de Gobernación). (2016). ACUERDO por el que se da a conocer el resultado de los estudios técnicos de las aguas nacionales subterráneas del acuífero Bajo Río Bravo, clave 2801, en el Estado de Tamaulipas, Región Hidrológico-Administrativa Río Bravo. *Diario Oficial de la Federación*. Ciudad de México, México: SEGOB.
- Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera (SIAP). (2020). Reporte Anual de Estadísticas Agropecuarias de Tamaulipas. Consultada el 23 de febrero, 2024, desde <https://www.gob.mx/siap>
- Servicio Meteorológico Nacional (SMN). (2020). Información estadística climatológica de México. Consultada el 23 de febrero, 2024, desde <https://smn.conagua.gob.mx/es/climatologia/informacion-climatologica/informacion-estadistica-climatologica>
- The World Bank (2010). *Sustaining water for all in a changing climate: World Bank Group implementation progress report of the water resources sector strategy*. Washington D.C., USA: The International Bank for Reconstruction and Development. ISBN: 978-0-615-37923-4
- 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.
- Velasco-Muñoz, J. F., Aznar-Sánchez, J. A., Belmonte-Ureña, L. J., & Román-Sánchez, I. M. (2018). Sustainable water use in agriculture: A review of worldwide research. *Sustainability*, 10(4), 1084. <https://doi.org/10.3390/su10041084>
- Zisopoulou, K., & Panagoulia, D. (2021). An in-depth analysis of physical blue and green water scarcity in agriculture in terms of causes and events and perceived amenability to economic interpretation. *Water*, 13(12), 1693. <https://doi.org/10.3390/w13121693>