

Índice de estrés hídrico (IEH) e índice de servicio del riego (ISR) en función de la huella hídrica de los cultivos en los módulos de riego en México

Carlos López-López¹

Carlos.lopezll65@gmail.com

<https://orcid.org/0000-0002-3191-1005>

Colegio de Postgraduados. Campus Montecillo.

Adolfo A. Exebio-García

exebio@colpos.mx

<https://orcid.org/0000-0002-3280-0278>

Colegio de Postgraduados. Campus Montecillo.

Jorge Flores-Velázquez

jorgelv@colpos.mx

<https://orcid.org/0000-0003-0895-4645>

Colegio de Postgraduados. Campus Montecillo.

Adolfo E. Juárez Márquez

15bjuarezmarquez@gmail.com

<https://orcid.org/0000-0001-5710-0297>

Colegio de Postgraduados. Campus Montecillo.

RESUMEN

El estrés hídrico total al que se someten los cultivos, ocasionado principalmente por los impactos del cambio climático sobre los recursos hídricos; puede ser evaluado mediante índices cuantitativos de tipo porcentual. Por tal razón, se definió como estudio de caso el módulo de riego III-4 del Distrito de Riego 025 Bajo Río Bravo, Tamaulipas, en el cual los cultivos agrícolas han sufrido escasez de agua de forma cíclica; ya que no se les aplican los volúmenes de agua requeridos para lograr su potencial productivo. El objetivo es crear y proponer el **Índice de Estrés Hídrico (IEH)** y el **Índice de Servicio del Riego (ISR)** en función de la huella hídrica de los cultivos. La metodología consistió en establecer la **Línea Base (LB)** para el escenario sin estrés hídrico y luego la **Condición Real (CR)** para el escenario con estrés hídrico del patrón de cultivos; para lo cual se determinó la Evapotranspiración del Cultivo (ET_c), los Volúmenes de Agua Aplicados (CWU) y la Huella Hídrica de los Cultivos (HH) de ambos escenarios; luego se normalizaron los resultados obtenidos. Los resultados obtenidos fueron cuatro expresiones matemáticas multidimensionales para calcular el IEH y el ISR.

Palabras clave: cambio climático; lámina de riego; producción agrícola, sequía; cultivos.

¹ Autor Principal

Water stress index (IEH) and irrigation service index (ISR) based on the water footprint of crops in irrigation modules in Mexico

ABSTRACT

The total water stress to which crops are subjected, caused mainly by the impacts of climate change on water resources; It can be evaluated through quantitative indexes of percentages type. For this reason, the irrigation module III-4 of the Irrigation District 025 Bajo Río Bravo, Tamaulipas was defined as a case study, in which agricultural crops have suffered cyclical water scarcity; since the volumes of water required to achieve their productive potential are not applied to them. The objective is to create and propose the Water Stress Index (WSI) and the Irrigation Service Index (ISI) based on the water footprint of crops. The methodology consisted of establishing the Base Line (BL) for the scenery without water stress and then the Real Condition (RC) for the scenery with water stress of the crop pattern; for which the Evapotranspiration of the Crop (ETc), the Volumes of Water Applied (CWU) and the Water Footprint of the Crops (HH) of both scenery were determined; then the results obtained were normalized. The results obtained were four multidimensional mathematical expressions to calculate the WSI and the ISI.

Keywords: *climate change; irrigation sheet; agricultural production; drought; crops.*

Artículo recibido 15 abril 2023

Aceptado para publicación: 07 mayo 2023

INTRODUCCIÓN

Los países que presentan déficit de agua para la producción de alimentos de origen vegetal, animal y bienes diversos; como consecuencia de los efectos del cambio climático, han optado por importar grandes cantidades de alimentos para subsanar dicha escasez, con lo cual están importando indirectamente cuantiosos volúmenes de agua que fueron utilizados en los lugares de origen para la producción, embalaje y el transporte; a lo que se le denomina Agua Virtual (Rocha, 2016)ⁱ. Concepto que fue acuñado por primera vez en 1993 por el profesor John Anthony Allan de la Escuela de Estudios Orientales y Africanos de la Universidad de Londres.

Por otro lado, el concepto de Huella Hídrica fue introducido por Hoekstra (2002, 2003)ⁱⁱ para tener un indicador multidimensional basado en el consumo de agua que pudiera proporcionar información útil, extra a los indicadores tradicionales que miden el uso del agua en el sector productivo; de tal forma que Chapagain y Hoekstra (2004)ⁱⁱⁱ definen la Huella Hídrica de un individuo, empresa o nación como el “Volumen total de agua dulce que se utiliza para la producción de bienes y servicios consumidos por el individuo, una empresa o nación, así como los volúmenes de agua contaminada en el proceso de producción en cuestión. Por lo que dicho concepto también se utiliza para medir el impacto de las actividades humanas durante el proceso de aprovechamiento de los recursos hídricos.

La Huella Hídrica se calcula para diferentes escalas geográficas y resolución; puede calcularse para un producto, lugar específico, región, país, continente o todo el globo terráqueo. La Huella Hídrica de un producto se define como el volumen total de agua dulce utilizada a través de toda la cadena productiva de dicho producto. Es un indicador multidimensional, ya que muestra los volúmenes de agua consumidos por fuente de abastecimiento y los volúmenes de agua que se contaminan por cada tipo de contaminante durante el proceso de producción; todos los componentes de una Huella Hídrica Total se especifican geográfica y temporalmente. Por lo que la Huella Hídrica Total de un producto está integrada por la Huella Hídrica Azul, la Huella Hídrica Verde y la Huella Hídrica Gris, Hoekstra et al. (2009)^{iv}.

La Huella Hídrica Verde se refiere al agua de lluvia almacenada en el suelo como humedad aprovechable, particularmente se refiere al uso del agua de lluvia que es utilizada por los cultivos para la evapotranspiración, la cual es utilizada en la agricultura y en la producción forestal. La Huella Hídrica

Azul se refiere al volumen de agua superficial y subterráneo extraído de los acuíferos, lagos, ríos, presas (embalses) y arroyos; la cual es consumida por las plantas para la producción de un bien o producto. La Huella Hídrica Gris se refiere al volumen de agua dulce que se requiere para asimilar una carga de contaminantes, basada en las normas ambientales de calidad del agua existentes en un país. La Huella Hídrica de un cultivo está dada por el cociente del volumen total de agua utilizada para la producción y su rendimiento al final del ciclo agrícola, Hoekstra et al. (2009).

La Huella Hídrica de un producto se expresa en volumen de agua por unidad de producto obtenido con esa agua, por lo general las unidades son $\text{m}^3 \cdot \text{Ton}^{-1}$ o Kg^{-1} , o por porción. La cual es la suma de las huellas hídricas de cada paso tomado en el proceso para producir el producto en cuestión, Mekonnen y Hoekstra (2011)^y; quienes realizaron un estudio para determinar la Huella Hídrica verde, azul y gris que genera la producción mundial de cultivos de una forma espacialmente explícita para el período 1996-2005; estimando la Huella Hídrica de 126 cultivos en una cuadrícula de 5 por 5 minutos de arco. Utilizaron un modelo de balance de agua dinámico basado en la cuadrícula para calcular el consumo de agua de los cultivos a lo largo del tiempo, con un intervalo de tiempo de un día. Dicho modelo toma en cuenta el balance hídrico diario del suelo y las condiciones climáticas para cada celda de la cuadrícula. Además, la contaminación del agua asociada con el uso de fertilizantes nitrogenados en la producción de los cultivos, se calcula para cada celda de la cuadrícula antes mencionada. La evapotranspiración del cultivo para los 20 cultivos menores adicionales fue calculada con el modelo CROPWAT. Adicionalmente, calcularon la Huella Hídrica de más de 200 productos derivados de los cultivos, en los que se incluyen diversos tipos de harinas, bebidas, fibras y biocombustibles. Utilizaron el marco de evaluación de la Huella Hídrica que reporta la guía de la Water Footprint Network (La Red de la Huella Hídrica). Considerando los resultados obtenidos de las Huellas Hídricas de los cultivos primarios, encontraron que el promedio mundial de la huella hídrica por tonelada de cultivo producido se incrementa a partir de los cultivos de azúcar (Aproximadamente $200 \text{ m}^3 \cdot \text{ton}^{-1}$), vegetales ($300 \text{ m}^3 \cdot \text{ton}^{-1}$), tubérculos y raíces ($400 \text{ m}^3 \cdot \text{ton}^{-1}$), frutales ($1000 \text{ m}^3 \cdot \text{ton}^{-1}$), cereales ($1600 \text{ m}^3 \cdot \text{ton}^{-1}$), cultivos oleaginosos ($2400 \text{ m}^3 \cdot \text{ton}^{-1}$) hasta pulsos ($4000 \text{ m}^3 \cdot \text{ton}^{-1}$). Sin embargo, la Huella Hídrica varía entre distintos cultivos y entre categorías de los cultivos, así como por región geográfica de producción. Cuando se analiza la Huella Hídrica por kcal en lugar de tonelada, el panorama se mantiene con las variaciones antes precisadas. Los

cultivos básicos que presentan una Huella Hídrica relativamente grande son: el café, el té, la cocoa, el tabaco, las especias, las nueces, el caucho y las fibras. Finalmente el presente trabajo reportó que la Huella Hídrica mundial relacionada con la producción agrícola para el periodo de 1996-2005 fue de 7,404 miles de millones de metros cúbicos por año (78% verde, 12% azul y 10% gris). Se obtuvo una gran Huella Hídrica total para el cultivo de trigo, el arroz y el maíz. El trigo y el arroz tienen las Huellas Hídricas azules más grandes y juntos representan el 45% de la Huella Hídrica azul mundial. A nivel de países, la Huella Hídrica total fue mayor en la India, en segundo lugar está China, en tercer lugar los Estados Unidos.

Por otro lado, Arévalo et al. (2012)^{vi}, realizaron el cálculo de la Huella Hídrica para el sector agrícola de Colombia, para lo cual utilizaron la metodología que reporta el Water Footprint Network; luego definieron la escala temporal para el estudio de un año (2018), posteriormente calcularon la Huella Hídrica por tipo de producto agrícola y área geográfica delimitada con información de tres grandes bloques: información de producción agrícola, información geográfica e información agroclimática; los resultados globales de la estimación de los componentes de la Huella Hídrica para el sector agrícola de Colombia son: Huella Hídrica Verde (34.242 Mm³/año), Huella Hídrica Azul (2.804 Mm³/año), Huella Hídrica Gris (2.098 Mm³/año) y la Huella Hídrica Total (39.144 Mm³/año). Los productos agrícolas de los cuales estimaron la Huella Hídrica Total y sus componentes son: café, maíz, arroz, plátano, caña de azúcar, palma africana, yuca, papa, cacao, banano y otros; así mismo determinaron la Huella Hídrica a nivel municipal y departamental.

Con la finalidad de poder determinar el momento adecuado para aplicar el riego a los cultivos agrícolas y que estos no sufran estrés hídrico, se han desarrollado investigaciones en torno al Índice de Estrés Hídrico de los Cultivos (Crop Water Stress Index, CWSI por sus siglas en inglés), todas ellas tratando de cuantificar el grado o porcentaje de falta de humedad en la zona radicular de las plantas y su transpiración. López et al. (2009)^{vii}, desarrollaron varios ensayos para determinar el CWSI, para lo cual determinaron la tasa de transpiración actual de un cultivo mediante la medición de la temperatura del dosel y el déficit de presión de vapor; todo ello con la finalidad de presentar los aspectos teóricos y metodológicos del CWSI y su utilidad práctica que tiene para la programación del riego en los cultivos agrícolas. Dicho índice ha tenido utilidad práctica en regiones áridas y semiáridas debido a que el equipo

requerido para su implementación es fácil de manejar. Este método del CWSI también se puede utilizar en regiones con clima húmedo, donde los cultivos requieren riego en la época seca y la radiación solar sea alta. Este índice se basa en la teoría del balance de energía en una superficie, las funciones lineales del diferencial de temperatura entre el cultivo y el aire y el déficit de presión de vapor, las cuales dependen del cultivo y las condiciones atmosféricas. La termometría infrarroja es una herramienta sencilla, práctica y confiable para la estimación del estrés hídrico de los cultivos, la programación del riego y la predicción de rendimientos. El objetivo final de los ensayos en cuestión fue presentar los aspectos teóricos y metodológicos del índice de estrés hídrico de los cultivos, así como la utilidad práctica que tiene en la calendarización y optimización del agua de riego en los cultivos agrícolas.

Por otro lado, Jackson et al. (1981), citado por López et al (2009), indican que el agua evaporada por una superficie vegetal funciona al mismo tiempo como un estabilizador de la temperatura de las hojas ante la demanda evapotranspirativa de la atmósfera. A partir de lo cual presentaron la teoría del balance energético que separa la radiación neta en calor sensible del aire y calor latente que incide en la transpiración. También indican que cuando el cultivo se somete a estrés hídrico, los estomas se cierran, la transpiración decrece y la temperatura de la hoja aumenta. Cuando una planta transpira sin estrés hídrico, la temperatura de la hoja es entre 1 y 4 °C menor que la temperatura ambiental, en este caso el índice de estrés hídrico del cultivo (CWSI) es 0. Cuando la transpiración decrece, la temperatura de la hoja asciende y puede alcanzar de 4 a 6 °C más que la temperatura del aire. En este caso, el déficit hídrico es alto, la transpiración de las hojas se ve drásticamente reducida con el incremento de la temperatura foliar; cuando la planta está muerta o ya no transpira durante mucho tiempo, el CWSI vale

Idso et al. (1981), citado por López et al (2009), desarrollaron el método empírico del CWSI para la cuantificación de la humedad atmosférica y de la planta en regiones áridas, la cual depende de la determinación de la “Línea base del cultivo sin estrés hídrico”, que facilitan la normalización de cambios en la temperatura del dosel para condiciones ambientales reales. Dicha “Línea base del cultivo sin estrés hídrico”, son específicas para cada cultivo en una condición climática dada y están influenciadas por el clima. Por otro lado, Jackson et al. (1981), citados por López et al. (2009), modificaron el CWSI para incluir una predicción más teórica de los efectos del clima sobre la temperatura del dosel que incluye explícitamente el déficit de presión del vapor de agua, la radiación neta y la resistencia aerodinámica.

Esta aproximación teórica para determinar la humedad atmosférica que utiliza el CWSI es más precisa que la aproximación empírica, particularmente en climas húmedos, Keener y Kircher (1983). Se espera que el CWSI varíe entre 0 a 1 cuando las plantas van de una condición bien regada a una condición totalmente estresada.

Por lo tanto, el método del Índice de Estrés Hídrico de los Cultivos (CWSI), es una medida de la transpiración que ocurre en una planta en el tiempo de medición real, mediante el registro de la temperatura de la planta y el déficit de presión de vapor del agua. Este enfoque metodológico es necesario para la correcta programación del riego en cultivos agrícolas en campos abiertos y grandes extensiones agrícolas sembradas. Las mediciones del estrés hídrico de los cultivos combinado con sistemas eficientes de riego permitirán maximizar los rendimientos a través de un manejo eficiente del riego, Garrot et al. (1990), citado por López et al (2009).

Así que el Índice de Estrés Hídrico de los Cultivos (CWSI), ha tenido un importante uso práctico dentro de la programación del riego en regiones áridas y semiáridas, Calado et al., (1990); Itier et al., (1993); Anconelli et al., (1994); Jones (1999); Orta et al., (2003); Yuan et al., (2004); Simsek et al., (2005); Erdem et al., (2005); citados por López et al. (2009); esto se debe principalmente a que el equipo requerido es de fácil manejo. En la agricultura de riego, el costo económico y ecológico del agua de riego es alto, si se considera la incertidumbre en su disponibilidad acrecentada por el cambio climático, de ahí que el costo del equipo para cuantificar las variables climáticas y el estrés hídrico puede justificar la inversión.

Desde el punto de vista del Cambio Climático provocado por el Calentamiento Global; el Estrés Hídrico se define como una medida de la relación que existe entre el volumen de agua requerida por un uso determinado y el volumen disponible en las fuentes de abastecimiento; por tal razón, se considera como un indicador de la escasez de agua en cualquier unidad de análisis, Munia et al. (2020)^{viii}; el Cambio Climático podría moldear el estrés hídrico de los países, las cuencas, los sistemas productivos, las plantas, los animales y las personas; por tal razón, se requiere generar indicadores que cuantifiquen los niveles de estrés hídrico total de los cultivos agrícolas en los Distritos de Riego.

Munia et al. (2020)^{ix}; calculó el estrés hídrico al que se están sometiendo las subcuencas de todo el mundo por los efectos del Cambio Climático, donde analizó el índice de estrés hídrico para las condiciones pasadas de 1980, para el presente en 2010 y para las condiciones futuras en 2050, todo ello con el análisis de diferentes escenarios del calentamiento global (RCP 6.0). Los valores de este índice van de 0 a 1; los valores de cambio negativo significan que el nivel de estrés ha disminuido y los positivos significan que el nivel de estrés ha aumentado.

METODOLOGÍA

Los materiales que se utilizaron para realizar la presente investigación consisten en la climatología obtenida de la base de datos climática del SWAT para una estación hipotética localizada en la zona de estudio, las estadísticas de producción agrícola del patrón de cultivos y la hidrometría del módulo de riego III-4 (Ver Figura 1), la información de los cultivos que se siembran en el lugar (Fecha de siembra, fecha de cosecha, ciclo vegetativo), los coeficientes de los cultivos y la duración de las etapas de desarrollo. El Sistema de Información Geográfica utilizado fue el QGIS 3.14.16, también se utilizaron el CropWat 8.0 y ClimWat 2.0 de la FAO.

Para desarrollar la presente investigación científica y poder lograr los objetivos planteados se utilizó la Metodología Cuasiexperimental; ya que los efectos de las variables dependientes e independientes utilizadas ya se han producido para el caso de la información en análisis (climatología), las variables independientes no se modifican, solo se seleccionan y se observan los resultados en las variables dependientes, la orientación de las variables se basa en mediciones del pasado y no hay aleatorización de grupos, ya que los grupos son naturales previamente formados.

Finalmente se utilizaron dos diseños experimentales en la presente investigación; el primero las “Series temporales interrumpidas con un grupo” y el Segundo son las “Series temporales interrumpidas con grupos de control”; el primero consiste en que las series temporales están formadas por observaciones repetitivas sin un grupo de control y el segundo se diferencia del primero en que contempla un grupo de control para poder comparar los resultados analizados de las variables temporales, Atenea Alonso Serrano et al (). En resumen la investigación se llevó a cabo aplicando los siguientes pasos metodológicos: obtención de la información meteorológica del lugar de estudio, Evaluación de la

Evapotranspiración del Cultivo de Referencia, información agronómica y fisiológica de los cultivos, coeficientes de los cultivos y sus gráficas, Evapotranspiración del Cultivo, precipitación efectiva, requerimiento de riego, estadísticas agrícolas e hidrométricas, productividad media de la tierra, productividad media del agua de riego y la evaluación de la huella hídrica del patrón de cultivos del módulo de riego; los cuales se detallan ampliamente a continuación:

Información meteorológica. La información meteorológica consistente en la temperatura mínima, temperatura máxima, humedad relativa, velocidad del viento y las horas luz; todas ellas promedios mensuales, fueron obtenidas a partir de la base datos climatológica del SWAT del periodo 1979-2014 (35 años) para la estación climatológica virtual ubicada dentro del área de estudio con clave 258-981 y complementada con la estación automatizada del módulo de riego en estudio. El diseño experimental utilizado para obtener la información meteorológica son las “Series temporales interrumpidas con un grupo”. Los estadísticos calculados son la media aritmética, la sumatoria y la desviación estándar.

Evaluación de la Evapotranspiración del Cultivo de Referencia (ET_o). La Evapotranspiración del Cultivo de Referencia (ET_o), se evaluó mediante el método estándar denominado FAO Penman-Monteith recomendado en el Boletín Número 56 de la Serie Riego y Drenaje de la FAO y el uso del software CropWat versión 8.0; la ecuación de FAO Penman-Monteith se basa en el método combinado del balance energético y el método de la transferencia de masa, así como en el uso de factores de resistencia para las superficies cultivadas. **La expresión matemática utilizada para tal fin es la que se indica a continuación:**

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

Donde:

ET_o=Evapotranspiración del Cultivo de Referencia, mm.día⁻¹

R_n=Radiación neta en la superficie del cultivo, MJ m⁻² día⁻¹

R_a=Radiación extraterrestre, mm día⁻¹

G=Flujo del calor de suelo, MJ m⁻² día⁻¹

T=Temperatura media del aire a 2 m de altura, °C

u₂=Velocidad del viento a 2 m de altura, m s⁻¹

e_s =Presión de vapor de saturación, kPa

e_a =Presión real de vapor, kPa

$e_s - e_a$ =Déficit de presión de vapor, kPa

Δ =Pendiente de la curva de presión de vapor, kPa

Información agronómica y fisiológica de los cultivos. La información agronómica y fisiológica de los cultivos, correspondiente a la fecha óptima de siembra, fecha de cosecha, duración del ciclo vegetativo, duración de las etapas de desarrollo fisiológico, fueron investigadas mediante entrevistas directas a los productores y funcionarios del módulo de riego; también se compararon dichos datos con los reportados en el Boletín No. 56 de la FAO.

Coefficientes de los cultivos y sus gráficas. Los Coeficientes de los Cultivos (K_c) para cada etapa de desarrollo fisiológico se evaluaron mediante revisión bibliográfica del Boletín No. 56 de la FAO; las gráficas de los K_c fueron elaboradas en hojas electrónicas de Excell; con las cuales se obtuvieron los K_c mensuales para cada cultivo del módulo de riego.

Evapotranspiración del cultivo (ET_c). La Evapotranspiración del Cultivo (ET_c), se evaluó mediante la multiplicación de la Evapotranspiración del Cultivo de Referencia (ET_o) en cada mes y su respectivo K_c mensual; tal como se indica en la expresión matemática siguiente:

$$ET_c = ET_o * K_c \dots\dots\dots 2$$

Donde:

ET_c=Evapotranspiración del Cultivo en el periodo contemplado, mm

ET_o=Evapotranspiración del Cultivo de Referencia en el periodo contemplado, mm

K_c =Coeficiente del cultivo en el periodo contemplado, adimensional

Precipitación efectiva. La precipitación efectiva para cada periodo de desarrollo de los cultivos se evaluó mediante el software denominado CropWat versión 8.0 de la FAO, el cual utiliza el Método del Servicio de Conservación de Suelos del USDA (USDA-SCS); cuya **expresión matemática es la siguiente:**

$$P_e = (1.25247 * P_t^{0.82416} - 2.93522) * 10^{0.00095*U} * f \dots\dots\dots 3$$

Donde:

Pe=Precipitación Efectiva mensual, mm

Pt=Precipitación total mensual, mm

U=Uso consuntivo medio mensual, mm

Δ_s = Lámina de riego neta, mm

$$f = 0.531747 + 0.011621 * \Delta_s - ((8.9 * 10^{-5}) * \Delta_s^2) + (2.3 * 10^{-7} * \Delta_s^3) \dots\dots\dots 4$$

La expresión matemática anterior se simplifica utilizando dos rangos de la precipitación total, tal como se indica a continuación:

$$P_e = P_t * (125 - 0.2P_t / 125) \dots\dots\dots 5$$

Para $P_t < 250$ mm

$$P_e = 125 + 0.1P_t \dots\dots\dots 6$$

Para $P_t > 250$ mm

Requerimiento de riego. Los requerimientos de riego netos para cada uno de los cultivos en estudio se evaluaron mediante la diferencia que hay entre la Evapotranspiración del Cultivo (ETc) y la Precipitación Efectiva (Pe), para lo cual se utilizó una hoja electrónica de Excell. La expresión matemática utilizada para tal fin es la siguiente:

$$RR_n = ET_c - P_e \dots\dots\dots 7$$

Donde:

RRn=Requerimiento de Riego Neto, mm

Pe=Precipitación Efectiva, mm

Estadísticas agrícolas e hidrométricas. La información de la estadística agrícola e hidrométrica correspondiente a superficie sembrada, superficie cosechada, rendimientos promedios, producción agrícola, precio medio rural, valor de la producción, volúmenes brutos, volúmenes netos y eficiencias de manejo del agua se evaluaron mediante la información del formato denominado EA (Estadísticas agrícolas), que generó el módulo de riego para los últimos 10 ciclos agrícolas.

Productividad media de la tierra. La productividad media de la tierra (Pt), es un índice que permite relacionar el valor de la producción con la superficie cosechada para un cultivo dado en un subciclo agrícola en estudio. Este índice unitario es una técnica que permite rápidamente analizar la rentabilidad de un patrón de cultivos establecidos y poder detectar su variación en el tiempo. El índice de productividad media de la tierra está dado por el cociente del valor de la producción y la superficie cosechada, la expresión matemática que se utilizó para evaluar la productividad media de la tierra es la siguiente:

$$P_t = \frac{V_p}{Sup} \dots\dots\dots 8$$

Donde:

Pt=Productividad media de la tierra, \$.ha⁻¹

Vp=Valor de la producción, \$

Sup=Superficie cosechada, ha

Productividad media del agua de riego. La Productividad media del agua (Pa), es un índice que relaciona el valor de la producción con el volumen de agua extraído de las fuentes de abastecimiento para lograr dicha producción agrícola, sea ésta de un cultivo o de un patrón de cultivos. Este índice unitario es una forma rápida de analizar la conversión de los volúmenes de agua extraídos de las fuentes de abastecimiento en pesos para un patrón de cultivos establecidos en cuestión y poder detectar la variación en el tiempo, la cual puede deberse a un cambio en el patrón de cultivos o por disminución en los rendimientos o precios medios rurales, la expresión matemática que permite evaluar este valor es la siguiente:

$$P_a = \frac{V_p}{Vol} \dots\dots\dots 9$$

Donde:

Pa=Productividad media del agua, \$.m³

Vp=Valor de la producción agrícola, \$

Vol=Volumen de agua extraída y aplicada, m³

Evaluación de la Huella Hídrica de los cultivos. Para evaluar la Huella Hídrica Verde, Huella Hídrica Azul y la Huella Hídrica Total de los cultivos que se siembran en el módulo de riego en cuestión, se aplicó la metodología de la WFN (Water Footprint Network, por sus siglas en inglés); las expresiones matemáticas utilizadas en el presente estudio son las que se reportan en el Manual de la Huella Hídrica, las cuales fueron programadas en hojas electrónicas de Excell y se reportan a continuación:

$$HH_c = \frac{\text{Uso de agua del cultivo (CWU)}}{\text{Rendimiento del cultivo (Y)}} = \frac{CWU}{Y} \dots\dots\dots 10$$

Donde:

HHc=Huella Hídrica de un cultivo, m³. Ton⁻¹

CWU=Uso del agua del cultivo, m³. Ha⁻¹

Y =Rendimiento del cultivo, Ton . Ha⁻¹

La Huella Hídrica Verde y la Huella Hídrica Azul expresadas en función de las láminas de agua para cada uno de los cultivos del módulo de riego se evaluaron con las siguientes expresiones matemáticas, las cuales fueron programadas en hojas electrónicas de Excell.

$$ET_{Verde} = Min(ET_c , P_e) \dots\dots\dots 11$$

Donde:

Min=Mínimo valor, adimensional

ET_{Verde}=Huella Hídrica Verde del cultivo, mm

ETc=Evapotranspiración del cultivo, mm

Pe=Precipitación efectiva, mm

$$ET_{Azul} = Min(RR_{Bruto} , RR_{Neto}) \dots\dots\dots 12$$

Donde:

Min=Mínimo valor, adimensional

ET_{Azul}=Huella Hídrica Azul del cultivo, mm

RR_{Bruto}=Requerimiento de Riego Bruto del cultivo, mm

RR_{Neto}=Requerimiento de Riego Neto del cultivo, mm

Por otro lado, la Huella Hídrica Verde y la Huella Hídrica Azul de los cultivos en función de los volúmenes de agua aplicados se evaluaron mediante las dos expresiones matemáticas siguientes, las cuales fueron programadas en una hoja de Excell.

$$WF_{\text{cultivo,green}} = \frac{CWU_{\text{green}}}{Y} \dots\dots\dots 13$$

Donde:

WF_{cultivo,green}=Huella Hídrica Verde del Cultivo, m³.ton⁻¹

CWU_{green} = Uso de Agua Verde por el Cultivo, m³.ha⁻¹

Y = Rendimiento del cultivo, Ton.ha⁻¹

$$WF_{\text{cultivo,blue}} = \frac{CWU_{\text{blue}}}{Y} \dots\dots\dots 14$$

Donde:

WF_{cultivo,blue}=Huella Hídrica Azul del cultivo, m³.ton⁻¹

CWU_{blue} = Uso de Agua Azul por el Cultivo, m³.ha⁻¹

Y = Rendimiento del cultivo, ton.ha⁻¹

Finalmente, la Huella Hídrica Total de los cultivos que se siembran en el módulo de riego III-4 se evaluó con la expresión matemática siguiente, la cual se programó en una hoja electrónica de Excell.

$$HH_T = \frac{\sum_{i=1}^n CWU_i}{\sum_{i=1}^n Y_i} \dots\dots\dots 15$$

Donde:

HH_T = Huella Hídrica Total de los cultivos del módulo de riego; m³.ton⁻¹

i =Cultivo i-ésimo, adimensional

n = Cultivo n-ésimo, adimensional

CWU_i = Volumen de agua utilizado por el cultivo i-ésimo, m³

Y_i = Producción del cultivo i-ésimo, Ton.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

RESULTADOS

Índice de Estrés Hídrico de los cultivos (IEH). El resultado final de la aplicación de la metodología explicada ampliamente en el capítulo correspondiente, son la creación de cuatro expresiones matemáticas lineales inéditas para evaluar el estrés hídrico real al que se someten los cultivos en zonas de riego por la escasez de agua para riego en las fuentes de abastecimiento y la variación de la precipitación pluvial, ocasionados en gran parte, por los efectos del Cambio Climático (CC) y las políticas del manejo de los recursos hídricos; las cuales se detallan a continuación:

Índice de Estrés Hídrico en función de la Evapotranspiración (IEHETc). La creación del Índice de Estrés Hídrico de los cultivos en función de la Evapotranspiración del Cultivo, (IEHETc); se expresa como la diferencia que existe entre el Total de la Evapotranspiración de un Cultivo en condiciones óptimas de humedad y la suma de la lámina de agua que proporciona la lluvia sin estrés hídrico más la lámina de agua extraída de las fuentes de abastecimiento y aplicada realmente a los cultivos bajo condiciones reales de estrés hídrico, entre la Evapotranspiración del Cultivo ajustada sin estrés hídrico; el cual se evalúa con la siguiente expresión matemática:

$$IEH_{ETc} = 100 - \left\{ \left[\frac{ET_{Verde1} + ET_{Azul2}}{ET_{cAjust1}} \right] * 100 \right\} \dots\dots\dots 16$$

Donde:

IEH_{ETc} = Índice de Estrés Hídrico del cultivo en función de la Evapotranspiración del cultivo, %

ET_{Verde1} = Evapotranspiración Verde del cultivo sin estrés hídrico, mm

ET_{Azul2} = Evapotranspiración Azul del cultivo con estrés hídrico, mm

$ET_{cAjust1}$ = Evapotranspiración del Cultivo ajustada sin estrés hídrico, mm

La expresión matemática anterior, también se puede expresar en función de la Precipitación Efectiva (Pe), la cual equivale a la Huella Hídrica Verde del cultivo, y la Lámina de Riego Neta realmente aplicada al cultivo en condición de estrés hídrico (LRN_2), la cual equivale a la Huella Hídrica Azul del cultivo en la condición de estrés hídrico; tal como se puede ver a continuación:

$$IEH_{ETc} = 100 - \left\{ \left[\frac{P_e + LRN_2}{ETc_{Ajust1}} \right] * 100 \right\} \dots\dots\dots 17$$

Donde:

IEH_{ETc}=Índice de Estrés Hídrico del cultivo en función de la Evapotranspiración, %

Pe=Precipitación efectiva, mm

LRN₂=Lámina de Riego Neta aplicada al cultivo con estrés hídrico, mm

ETc_{Ajust1}=Evapotranspiración del Cultivo ajustada sin estrés hídrico, mm

Índice de Estrés Hídrico en función de los Volúmenes de agua (IEHCWU). La creación del Índice de Estrés Hídrico de los cultivos en función de los Volúmenes de Agua realmente aplicados al Cultivo, (IEH_{cwu}); se expresa como la diferencia que existe entre el Total del Volumen de agua Requerido por el cultivo en condiciones óptimas de humedad y la suma del volumen total de agua aplicado al cultivo proveniente de la lluvia en condición de estrés hídrico más el volumen total de agua aplicado al cultivo proveniente de las distintas fuentes de almacenamiento en condición de estrés hídrico; entre el volumen total de agua requerido por el cultivo sin estrés hídrico; el cual se evalúa con la siguiente expresión matemática:

$$IEH_{cwu} = 100 - \left\{ \left[\frac{CWU_{Verde2} + CWU_{Azul2}}{CWU_1} \right] * 100 \right\} \dots\dots\dots 18$$

Donde:

IEH_{cwu}=Índice de Estrés Hídrico del cultivo en función del volumen de agua, %

CWU_{Verde2}=Consumo de Agua Verde por el cultivo con estrés hídrico, m³.ha⁻¹

CWU_{Azul2}=Consumo de Agua Azul por el cultivo con estrés hídrico, m³.ha⁻¹

CWU₁=Consumo de Agua Total por el cultivo sin estrés hídrico, m³.ha⁻¹

Índice de Estrés Hídrico en función de la Huella Hídrica del cultivo (IEHHH). La creación del Índice de Estrés Hídrico de los cultivos en función de la Huella Hídrica de los cultivos, (IEHHH); se expresa como la diferencia que existe entre la Huella Hídrica Total del cultivo en condiciones óptimas de humedad y la suma de la Huella Hídrica Verde, proveniente de la lluvia en condición de estrés hídrico más la Huella Hídrica Azul, que equivale al volumen total de agua aplicado al cultivo proveniente de

las distintas fuentes de almacenamiento en condición de estrés hídrico; entre la Huella Hídrica Total del Cultivo sin estrés hídrico; el cual se evalúa con la siguiente expresión matemática:

$$IEH_{HH} = 100 - \left\{ \left[\frac{HH_{Verde2} + HH_{Azul2}}{HH_1} \right] * 100 \right\} \dots\dots\dots 19$$

Donde:

IEH_{HH}=Índice de Estrés Hídrico en función de la Huella Hídrica del cultivo, %

HH_{Verde2}=Huella Hídrica Verde del cultivo con estrés hídrico, m³.ton⁻¹

HH_{Azul2}=Huella Hídrica Azul del cultivo con estrés hídrico, m³.ton⁻¹

HH₁=Huella Hídrica Total del cultivo sin estrés hídrico, m³.ton⁻¹

Criterio e interpretación del Índice de Estrés Hídrico (IEH). Los criterios y la interpretación creados para el Índice de Estrés Hídrico (IEH) evaluado con las cuatro expresiones matemáticas planteadas anteriormente para cualquier cultivo establecido en el mundo, se plantea a continuación:

CRITERIO

A: Si el IEH ≥ 100 No hay estrés hídrico en los cultivos

B: Si el IEH < 100 Existe estrés hídrico en los cultivos

INTERPRETACIÓN

1. IEH_{ETc}: Representa el porcentaje de la Evapotranspiración del cultivo que no se aplicó y/o el porcentaje de la lámina de riego neta requerida que no se aplicó al cultivo.
2. IEH_{cwu}: Representa el porcentaje del volumen neto total de agua requerida por el cultivo que no se aplicó
3. IEH_{HH}: Representa el porcentaje de la disminución del rendimiento potencial unitario del cultivo por el estrés hídrico al que se somete por la falta de agua.

Índice de Servicio del Riego de los cultivos (ISR). El resultado final de la aplicación de la metodología explicada ampliamente en el capítulo correspondiente, son la creación de cuatro expresiones matemáticas diferentes para evaluar el Índice de Servicio del Riego o el porcentaje del agua requerida por los cultivos, al que se someten los cultivos en zonas de riego por la escasez de agua para riego en las fuentes de abastecimiento y la variación de la precipitación pluvial, ocasionados en gran parte, por

los efectos del Cambio Climático (CC) y las políticas del manejo de los recursos hídricos; las cuales se detallan a continuación:

Índice de Servicio del Riego en función de la Evapotranspiración (ISRETc). La creación del Índice de Servicio del Riego de los cultivos en función de la Evapotranspiración del Cultivo, (ISRETc); se expresa como la suma de la lámina de agua que proporciona la lluvia sin estrés hídrico más la lámina de agua extraída de las fuentes de abastecimiento y aplicada realmente a los cultivos bajo condiciones reales de estrés hídrico, entre la Evapotranspiración del Cultivo ajustada sin estrés hídrico; el cual se calcula con la siguiente expresión matemática:

$$ISRETc = \left\{ \left[\frac{ET_{Verde1} + ET_{Azul2}}{ETc_{Ajust1}} \right] * 100 \right\} \dots\dots\dots 20$$

Donde:

ISRETc=Índice de Servicio del Riego en función de la Evapotranspiración del cultivo, %

ET_{Verde1}=Evapotranspiración Verde del cultivo sin estrés hídrico, mm

ET_{Azul2}=Evapotranspiración Azul del cultivo con estrés hídrico, mm

ETc_{Ajust1}=Evapotranspiración del Cultivo ajustada sin estrés hídrico, mm

La expresión matemática mostrada anteriormente, también se puede expresar en función de la Precipitación Efectiva (Pe), la cual equivale a la Huella Hídrica Verde del cultivo y la Lámina de Riego Neta realmente aplicada al cultivo en condición de estrés hídrico (LRN2), la cual equivale a la Huella Hídrica Azul del cultivo en la condición de estrés; tal como se puede ver a continuación:

$$ISRETc = \left\{ \left[\frac{Pe + LRN2}{ETc_{Ajust1}} \right] * 100 \right\} \dots\dots\dots 21$$

Donde:

ISRETc=Índice de Servicio del Riego del cultivo en función de la Evapotranspiración, %

Pe=Precipitación efectiva, mm

LRN2=Lámina de Riego Neta aplicada al cultivo con estrés hídrico, mm

ETc_{Ajust1}=Evapotranspiración del Cultivo ajustada sin estrés hídrico, mm

Índice de Servicio del Riego en función de los Volúmenes de Agua (ISRCWU). La creación del Índice de Servicio del Riego de los cultivos en función de los Volúmenes de Agua realmente aplicados al Cultivo, (ISRCWU); se expresa como la suma del volumen total de agua aplicado al cultivo proveniente de la lluvia en condición de estrés hídrico más el volumen total de agua aplicado al cultivo proveniente de las distintas fuentes de almacenamiento en condición de estrés hídrico; entre el volumen total de agua requerido por el cultivo sin estrés hídrico; el cual se evalúa con la siguiente expresión matemática:

$$ISRCWU = \left\{ \left[\frac{CWU_{Verde2} + CWU_{Azul2}}{CWU_1} \right] * 100 \right\} \dots\dots\dots 22$$

Donde:

ISRCWU=Índice de Servicio del Riego del cultivo en función del volumen de agua aplicado, %

CWU_{Verde2}=Consumo de Agua Verde por el cultivo con estrés hídrico, m³.ha⁻¹

CWU_{Azul2}=Consumo de Agua Azul por el cultivo con estrés hídrico, m³.ha⁻¹

CWU₁=Consumo de Agua Total por el cultivo sin estrés hídrico, m³.ha⁻¹

Índice de Servicio del Riego en función de la Huella Hídrica del cultivo (ISRHH). La creación del Índice de Servicio del Riego de los cultivos en función de la Huella Hídrica de los cultivos, (ISRHH); se expresa como la suma de la Huella Hídrica Verde proveniente de la lluvia en condición de estrés hídrico más la Huella Hídrica Azul que equivale al volumen total de agua aplicado al cultivo proveniente de las distintas fuentes de almacenamiento en condición de estrés hídrico; entre la Huella Hídrica Total del Cultivo sin estrés hídrico; el cual se evalúa con la siguiente expresión matemática

$$ISRHH = \left\{ \left[\frac{HH_{Verde2} + HH_{Azul2}}{HH_1} \right] * 100 \right\} \dots\dots\dots 23$$

Donde:

ISRHH=Índice de Servicio del Riego en función de la Huella Hídrica del cultivo, %

HH_{Verde2}=Huella Hídrica Verde del cultivo con estrés hídrico, m³.ton⁻¹

HH_{Azul2}=Huella Hídrica Azul del cultivo con estrés hídrico, m³.ton⁻¹

HH₁=Huella Hídrica Total del cultivo sin estrés hídrico, m³.ton⁻¹

Criterio e interpretación del Índice de Servicio del Riego (ISR). Los criterios y la interpretación creados para el Índice de Servicio del Riego (ISR) evaluado con las cuatro expresiones matemáticas planteadas anteriormente para cualquier cultivo establecido en el mundo, se plantea a continuación:

CRITERIO

A: Si el $ISR \geq 100$ No hay déficit en el riego

B: Si el $ISR < 100$ Si hay déficit en el riego

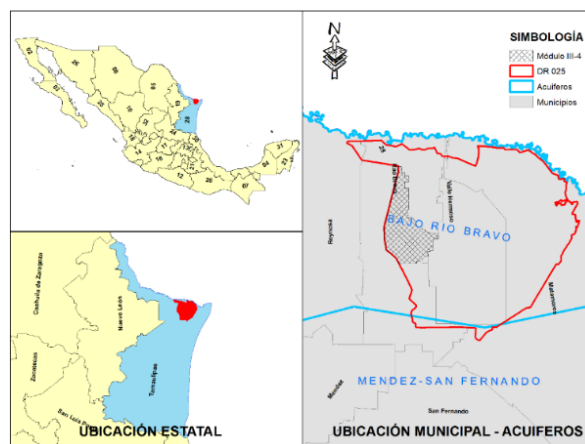
INTERPRETACIÓN

1. ISR_{ETc} : Representa el porcentaje de la Evapotranspiración del cultivo que se aplicó y/o el porcentaje de la lámina de riego neta requerida que se aplicó al cultivo.
2. ISR_{CWU} : Representa el porcentaje del volumen neto total de agua requerida por el cultivo que se aplicó
3. ISR_{HH} : Representa el porcentaje del rendimiento potencial por obtener del cultivo por el estrés hídrico al que se somete por la falta de agua.

Estudio de Caso: Módulo de Riego III-4 Hidráulica los Ángeles

Para comprobar la veracidad de las expresiones matemáticas creadas en la presente investigación científica, las cuales permiten evaluar de cuatro formas diferentes el estrés hídrico total al que se someten los cultivos por la escasez de agua para riego en un caso real, se utilizó la información de operación de 10 ciclos agrícolas que generó el módulo de riego III-4 denominado “**Asociación de Usuarios Hidráulica Los Ángeles, A.C.**”, del Distrito de Riego 025 Bajo Río Bravo, Tamaulipas; México; como caso de estudio piloto. Figura 1.

Figura 1. Localización geográfica del módulo de riego III-4.



(Fuente: Elaboración propia del autor).

El módulo de riego III-4 se localiza en la región Norte del estado de Tamaulipas, zona que pertenece al Organismo de Cuenca Número VI Río Bravo; Región Hidrológica número 24 Bravo Conchos; Cuenca

Río Bravo-Matamoros-Reynosa; Subcuenca Río Bravo-Reynosa; a nivel local se localiza en el municipio de Río Bravo, Tamaulipas.

La zona de estudio tiene un clima cálido subtropical con veranos húmedos y calurosos e inviernos secos. Los vientos húmedos procedentes del Golfo predominan durante la primavera, verano y otoño; originando una precipitación media anual de 605 mm. Las lluvias, en forma de tormentas, se distribuyen en 2 periodos: uno que ocurre a fines de mayo y principios de junio; otro, que se presenta en septiembre. Los meses restantes, aunque con algunas lluvias, se consideran secos. Esta irregularidad en la precipitación hace necesario el riego para cubrir las necesidades de agua de los cultivos. Además, con frecuencia también afectan las labores de preparación del suelo, cosecha, control de plagas, programación de riegos y secado de los granos; lo cual se acentúa en las áreas con problemas de drenaje.

Huella Hídrica de los cultivos para la Línea Base (Sin estrés hídrico₁). La Huella Hídrica de los cultivos para la “Línea Base”, evaluada con la metodología explicada ampliamente en el apartado correspondiente, se puede ver en el cuadro siguiente para la condición óptima de humedad y el potencial de producción máximo de los cultivos.

Cuadro 1. Huella hídrica de los cultivos del módulo de riego sin estrés hídrico (Línea Base).

CULTIVO	ETcAdj (mm)	ETVerde (mm)	ETAzul (mm)	CWU (m3/ha)	CWUVerde (m3/ha)	CWUAzul (m3/ha)	REND. (Ton/ha)	HHc (m3/ton)	HHVerde (m3/ton)	HHAzul (m3/ton)
Maíz A.	949.00	245.80	703.29	9,490.90	2,458.00	7,032.90	8.00	1,186.36	307.25	879.11
Maíz B.	973.65	277.80	724.93	9,736.50	2,778.00	7,249.30	8.00	1,217.06	347.25	906.16
Sorgo	790.68	195.90	613.72	7,906.80	1,959.00	6,137.20	6.00	1,317.80	326.50	1,022.87
Algodón	1,215.40	279.00	936.40	12,154.00	2,790.00	9,364.00	5.00	2,430.80	558.00	1,872.80
Soya	827.26	195.90	631.36	8,272.60	1,959.00	6,313.60	2.50	3,309.04	783.60	2,525.44
Rye Grass	728.76	175.90	552.86	7,287.60	1,759.00	5,528.60	2.00	3,643.80	879.50	2,764.30
Total/ Promedio	914.13	228.38	693.76	9,141.40	2,283.83	6,937.60	5.25	13,104.86	3,202.10	9,970.68

ETcAdj=Evapotranspiración del cultivo ajustada

ETVerde=Evapotranspiración del cultivo de la lluvia

HHAzul=Huella Hídrica del riego

CWUVerde=Volumen de agua usado de lluvia

HHc=Huella Hídrica total de cultivo

ETAzul=Evapotranspiración del cultivo del riego

CWU=Volumen de agua total usado por el cultivo

HHVerde=Huella Hídrica de la lluvia

CWUAzul=Volumen de agua usado del riego

El cultivo del algodón es el que mayor agua requiere, luego le sigue el cultivo del maíz blanco, en tercer lugar tenemos el maíz amarillo, en cuarto lugar está la soya, en quinto lugar el sorgo y el cultivo que

menor agua requiere es el pasto. Con respecto a la Evapotranspiración de los cultivos producto de la precipitación efectiva, el cultivo del algodón es el que mayor evapotranspiración verde presenta, luego le sigue el maíz blanco, seguido por el maíz amarillo, luego el sorgo junto con la soya y finalmente el pasto. Por otro lado, la Evapotranspiración de los cultivos producto del riego se tiene que el cultivo del algodón es el que mayor agua evapotranspira, en segundo lugar se tiene al maíz blanco, luego le sigue el maíz amarillo, en cuarto lugar se tiene la soya, en quinto el sorgo y finalmente los pastos.

Con respecto a los volúmenes totales de agua requerida por los cultivos, el cultivo del algodón es el que mayor volumen de agua requiere, luego le sigue el maíz blanco, en tercer lugar está el maíz amarillo, en cuarto lugar está la soya, en quinto lugar el sorgo y en último lugar los pastos. Con respecto a los volúmenes de agua provenientes de la lluvia, se tiene que el cultivo que mayor agua requiere es el algodón, luego le sigue el maíz blanco, en tercer lugar está el maíz amarillo, en cuarto lugar el sorgo y la soya está en quinto lugar, y en último lugar los pastos. Con respecto a los volúmenes de agua provenientes del riego, se tiene que el cultivo que mayor agua requiere es el algodón, en segundo lugar le sigue el maíz blanco, en tercer lugar está el maíz amarillo, en cuarto lugar está la soya, en quinto lugar el sorgo y en último lugar los pastos.

Los rendimientos potenciales de los cultivos del módulo de riego en cuestión, sin que les falte el riego, son los siguiente: el maíz amarillo 8.0 Ton/ha, el maíz blanco 8.0 Ton/ha, el sorgo 6.0 Ton/ha, el algodón 5.0 Ton/ha, la soya 2.50 Ton/ha y los pastos tipo Rye Grass 2.0 Ton/ha.

Con respecto a la Huella Hídrica Total de los cultivos sin restricción de agua (Línea base), se tiene que los pastos son los que mayor agua requieren para producir una tonelada, luego le sigue la soya, en tercer lugar está el algodón, en cuarto lugar el sorgo, en quinto lugar el maíz blanco y finalmente el maíz amarillo. Con respecto a la Huella Hídrica de la lluvia, se tiene que los pastos presentan la mayor huella hídrica verde, luego le sigue la soya, en tercer lugar está el algodón, en cuarto lugar está el maíz blanco, en quinto lugar está el sorgo y finalmente el maíz amarillo. Con respecto a la Huella Hídrica del riego, se tiene que los pastos presentan la mayor huella hídrica azul, luego le sigue la soya, en tercer lugar se tiene el algodón, en cuarto lugar el sorgo, en quinto lugar el maíz blanco y en último lugar el maíz amarillo.

Huella Hídrica de los cultivos para la Condición Real (Con estrés hídrico₂). La Huella Hídrica de los cultivos para la “Condición Real”, es decir; para la condición promedio histórica con escasez de agua, evaluada con la metodología explicada ampliamente en el apartado correspondiente, se puede ver en el cuadro siguiente para la condición real de sequía y la producción promedio histórica real de los cultivos agrícolas.

Cuadro 2. Huella hídrica de los cultivos del módulo de riego con estrés hídrico (Condición Real)

CULTIVO	ET_{cAdj} (mm)	ET_{Verde} (mm)	ET_{Azul} (mm)	CWU (m ³ /ha)	CWU_{Verde} (m ³ /ha)	CWU_{Azul} (m ³ /ha)	REND. (Ton/ha)	HH_c (m ³ /ton)	HH_{Verde} (m ³ /ton)	HH_{Azul} (m ³ /ton)
Maíz A.	949.09	245.80	244.21	4,900.10	2,458.00	2,442.10	6.72	729.29	365.83	363.46
Maíz B.	973.65	277.80	268.01	5,458.10	2,778.00	2,680.10	7.12	767.13	390.44	376.68
Sorgo	790.68	195.90	175.79	3,716.90	1,959.00	1,757.90	4.71	789.15	415.92	373.23
Algodón	1,215.40	279.00	239.64	5,186.40	2,790.00	2,396.40	3.36	1,544.49	830.85	713.64
Soya	827.26	195.90	243.16	4,390.60	1,959.00	2,431.60	2.20	1,995.73	890.45	1,105.27
Rye Grass	728.76	175.90	139.10	3,150.00	1,759.00	1,391.00	1.40	2,250.00	1,256.43	993.57
Total/ Promedio	914.13	228.38	218.32	4,467.02	2,283.83	2,183.18	4.25	8,074.22	4,149.11	3,925.11

El cultivo del algodón es el que mayor agua requiere, luego le sigue el cultivo del maíz blanco, en tercer lugar tenemos el maíz amarillo, cuarto lugar la soya, en quinto lugar el sorgo y el cultivo que menor agua requiere es el pasto. Con respecto a la Evapotranspiración de los cultivos producto de la precipitación efectiva, el cultivo del algodón es el que mayor evapotranspiración verde presenta, luego le sigue el maíz blanco, seguido por el maíz amarillo, luego el sorgo junto con la soya y finalmente el pasto. Por otro lado, la Evapotranspiración de los cultivos producto del riego se tiene que el cultivo del maíz blanco es el que mayor agua evapotranspira, en segundo lugar se tiene al maíz amarillo, luego le sigue la soya, en cuarto lugar se tiene el algodón, en quinto el sorgo y finalmente los pastos.

Con respecto a los volúmenes totales de agua consumida por los cultivos, el cultivo del maíz blanco es el que mayor volumen de agua requiere, luego le sigue el algodón, en tercer lugar está el maíz amarillo, en cuarto lugar está la soya, en quinto lugar el sorgo y en último lugar los pastos. Con respecto a los volúmenes de agua provenientes de la lluvia, se tiene que el cultivo que mayor agua requiere es el algodón, luego le sigue el maíz blanco, en tercer lugar está el maíz amarillo, en cuarto lugar el sorgo y la soya y en último lugar los pastos. Con respecto a los volúmenes de agua provenientes del riego, se

tiene que el cultivo que mayor agua requiere es el maíz blanco, en segundo lugar le sigue el maíz amarillo, en tercer lugar está la soya, en cuarto lugar está el algodón, en quinto lugar el sorgo y en último lugar los pastos.

Los rendimientos reales promedio históricos de los cultivos del módulo de riego en cuestión, con estrés hídrico, son los siguiente: el maíz amarillo 6.72 Ton/ha, el maíz blanco 7.12 Ton/ha, el sorgo 4.71 Ton/ha, el algodón 3.36 Ton/ha, la soya 2.20 Ton/ha y los pastos tipo Rye Grass 1.40 Ton/ha. Con respecto a la Huella Hídrica Total de los cultivos con restricción de agua, se tiene que los pastos son los que mayor agua requieren para producir una tonelada, luego le sigue la soya, en tercer lugar está el algodón, en cuarto lugar el sorgo, en quinto lugar el maíz blanco y finalmente el maíz amarillo.

Con respecto a la Huella Hídrica de la lluvia, se tiene que los pastos presentan la mayor huella hídrica verde, luego le sigue la soya, en tercer lugar está el algodón, en cuarto lugar está el sorgo, en quinto lugar está el maíz blanco y finalmente el maíz amarillo. Con respecto a la Huella Hídrica del riego, se tiene que la soya presentan la mayor huella hídrica azul, luego le sigue el pasto, en tercer lugar se tiene el algodón, en cuarto lugar el maíz blanco, en quinto lugar el sorgo y en último lugar el maíz amarillo.

Índice de Estrés Hídrico e Índice de Servicio del Riego. Aplicando las expresiones matemáticas 16, 17, 18 y 19 creadas por los autores de la presente investigación científica; se obtienen los valores numéricos de las cuatro formas de calcular el Índice de Estrés Hídrico y el Índice de Servicio del Riego, así como su interpretación, los cuales se reportan en el siguiente cuadro.

Cuadro 3. Índices de Estrés Hídrico (IEH) e Índice de Servicio del Riego (ISR).

CULTIVO	ÍNDICE DE ESTRÉS HÍDRICO (IEH) EN (%)			ÍNDICE DE SERVICIO DEL RIEGO (ISR) EN (%)		
	IEH _{ETc}	IEH _{CWU}	IEH _{HH}	ISR _{ETc}	ISR _{CWU}	ISR _{HH}
Maíz amarillo	48.37	48.37	38.53	51.63	51.63	61.47
Maíz blanco	43.94	43.94	36.97	56.06	56.06	63.03
Sorgo	52.99	52.99	40.12	47.01	47.01	59.88
Algodón	57.33	57.33	36.46	42.67	42.67	63.54
Soya	46.93	46.93	39.69	53.07	53.07	60.31
Rye Grass	56.78	56.78	38.25	43.22	43.22	61.75
TOTAL/PROMEDIO	51.06	51.06	38.34	48.94	48.94	61.66

1.-Cultivo del maíz amarillo: Este cultivo se somete a un 48.37% de estrés hídrico, es decir; que del total del volumen de agua que requiere el cultivo en cuestión, tan solo se le aplicó el 51.63% y se le dejó

de aplicar el 48.37%. Con lo cual se espera tan solo el 61.47% de su rendimiento potencial y una disminución del rendimiento del 38.53%.

2.-Cultivo del maíz blanco: Este cultivo se somete a un 43.94% de estrés hídrico, es decir; que del total del volumen de agua que requiere el cultivo en cuestión, tan solo se le aplicó el 56.06% y se le dejó de aplicar el 43.94%. Con lo cual se espera tan solo el 63.03% de su rendimiento potencial y una disminución del rendimiento del 36.97%.

3.-Cultivo del sorgo: Este cultivo se somete a un 52.99% de estrés hídrico, es decir; que del total del volumen de agua que requiere el cultivo en cuestión, tan solo se le aplicó el 47.01 % y se le dejó de aplicar el 52.99%. Con lo cual se espera tan solo el 59.88% de su rendimiento potencial y una disminución del rendimiento del 40.12%.

4.-Cultivo del algodón: Este cultivo se somete a un 57.33% de estrés hídrico, es decir; que del total del volumen de agua que requiere el cultivo en cuestión, tan solo se le aplicó el 42.67 % y se le dejó de aplicar el 57.33%. Con lo cual se espera tan solo el 63.54% de su rendimiento potencial y una disminución del rendimiento del 36.46%.

5.-Cultivo de la soya: Este cultivo se somete a un 46.93% de estrés hídrico, es decir; que del total del volumen de agua que requiere el cultivo en cuestión, tan solo se le aplicó el 53.07 % y se le dejó de aplicar el 46.93%. Con lo cual se espera tan solo el 60.31% de su rendimiento potencial y una disminución del rendimiento del 39.69%.

6.-Cultivo del Rye Grass: Este cultivo se somete a un 56.78% de estrés hídrico, es decir; que del total del volumen de agua que requiere el cultivo en cuestión, tan solo se le aplicó el 43.22 % y se le dejó de aplicar el 56.78%. Con lo cual se espera tan solo el 61.75% de su rendimiento potencial y una disminución del rendimiento del 38.25%.

Discusión

El concepto de Agua Virtual considera los requerimientos de agua para la producción de bienes y servicios, incluyendo el embalaje y el transporte hasta los consumidores finales, como lo definen algunos autores, entre ellos John Anthony Allan (1993), citado por Rocha (2016) y otros autores más; sin embargo, este concepto no toma en cuenta los volúmenes reales de agua aplicados a los cultivos en

condiciones de escasez de agua generados por los efectos del cambio climático, mucho menos diferencia entre volúmenes netos y brutos realmente aplicados a los cultivos como se realiza en el presente estudio. Las metodologías para calcular la Huella Hídrica de los cultivos (Huella Hídrica Verde, Huella Hídrica Azul, Huella Hídrica Gris y Huella Hídrica Total), definido por Hoekstra (2002) y trabajado por Chapagain y Hoekstra (2004) y diversos autores más; no proponen alguna forma para comparar los resultados calculados de las Huellas Hídricas de los cultivos en alguna zona; tan solo reportan un valor para cada color del agua y otro para la Huella Hídrica Total; de tal forma que no se puede decir si dichos valores son bajos, medios o altos, o cualquier otra forma de calificarlos; la creación del Índice de Estrés Hídrico (IEH) y el Índice de Servicio del Riego (ISR) que se realiza en la presente investigación, permite definir dos escenarios, el primero para la Línea Base como Escenario Óptimo (Sin escasez de agua para riego) y el segundo para la Condición Real (Con escasez de agua); con lo cual se podrá calificar los resultados de los valores de las Huellas Hídricas de los cultivos.

Otros trabajos científicos han calculado la Huella Hídrica para el sector agrícola en función de las estadísticas agrícolas de producción, información geográfica e información agroclimática y la escala temporal para un año en particular, tal como lo reportó en su publicación Arévalo et al. (2012); el presente trabajo utilizó las estadísticas de producción agrícola del módulo de riego piloto de los últimos diez ciclos agrícolas y se trabajó con los promedios históricos en lo que respecta a los rendimientos unitarios de los cultivos y los volúmenes netos y brutos de agua que realmente se aplicaron a los cultivos en condiciones reales de sequía (estrés hídrico).

Con respecto al Índice de Estrés Hídrico de los Cultivos (CWSI, por sus siglas en inglés), se han desarrollado diversas investigaciones al respecto, todas ellas tratan de cuantificar la falta de humedad en la zona radicular de las plantas y su transpiración en función de la temperatura del dosel y el déficit de presión de vapor de agua en el entorno de la planta, tal como lo reporta inicialmente Idso et al. (1981), Jackson et al. (1981), Keener y Kircher (1983), Garrot et al. (1990), todos ellos citados por López et al. (2009).

Por lo tanto, el Índice de Estrés Hídrico de los Cultivos ha cobrado gran importancia en la programación del riego en tiempo real en regiones áridas y semiáridas, tal como lo reportan Calado et al., (1990); Itier et al., (1993); Anconelli et al., (1994); Jones (1999); Orta et al., (2003); Yuan et al., (2004); Simsek et

al., (2005); Erdem et al., (2005); citados por López et al. (2009). Sin embargo, el enfoque empírico del CWSI desarrollado por los investigadores citados con anterioridad no calculan el estrés hídrico total al que se someten los cultivos en todo su ciclo vegetativo y mucho menos estiman el porcentaje de agua que les faltó por aplicar derivado de la escasez de agua que provocan los diversos efectos del cambio climático y las políticas del manejo de los recursos hídricos; sin embargo, el Índice de Estrés Hídrico (IEH) y el Índice de Servicio del Riego (ISR) creados en la presente investigación científica si calculan el estrés hídrico total al que se someten los cultivos.

CONCLUSIONES

Las expresiones matemáticas del Índice de Estrés Hídrico (IEH) y del Índice de Servicio del Riego (ISR), creadas en función de la Evapotranspiración de los Cultivos (ET_o), los Volúmenes de Agua Aplicados (CWU) y las Huellas Hídricas de los Cultivos (HH), permiten evaluar el estrés hídrico total al que se someten los cultivos en los Distritos y Unidades de Riego durante todo su ciclo vegetativo; por falta de agua suficiente y oportuna para riego, ocasionada en gran medida, por los efectos del Cambio Climático (CC) y las políticas del manejo de los recursos hídricos.

El Índice de Estrés Hídrico (IEH) y el Índice de Servicio del Riego (ISR) son indicadores multidimensionales que permiten combinar variables ambientales, económicas y sociales para diferenciar las responsabilidades de los diversos actores en el manejo del agua con el enfoque de sostenibilidad y sustentabilidad; es decir, la responsabilidad que tienen los productores agrícolas, las autoridades de los módulos de riego, las sociedades de responsabilidad limitada, las autoridades federales representadas por los funcionarios de los Distritos de Riego, los Comités Hidroagrícolas, los Consejos de Cuencas y la Comisión Nacional del Agua.

El Índice de Estrés Hídrico (IEH) y el Índice de Servicio del Riego (ISR), contribuyen a mejorar la operación y administración de las Unidades, módulos y Distritos de Riego; con un enfoque de sustentabilidad y manejo integral de los recursos hídricos.

LISTA DE REFERENCIAS

- Arévalo, D. et al. (2012). Estudio nacional de huella hídrica Colombia sector agrícola. Revista Internacional de Sostenibilidad, Tecnología y Humanismo. Núm. 6. P. 101-126. ISSN: 1988-0928. <http://hdl.handle.net/2099/11915>
- Chapagain, A.K, y Hoekstra, A.Y. 2004. Water Footprints of nations. Unesco-IHE Institute for Water Education.
<https://research.utwente.nl/en/publications/water-footprints-of-nations>
- Hoekstra, A.Y. 2003. Virtual Water Trade, Proceedings of the International Expert Meeting on Virtual Water Trade. Value of Water Research Report Series No. 12.
https://www.worldwatercouncil.org/fileadmin/www/Programs/Virtual_Water/VirtualWater_Proceedings_IHE.pdf#page=13
- Hoekstra et al. (2009). Water Footprint Manual: State of the Art 2009. Water Footprint NETWORK. Enschede, The Netherlands.
https://www.researchgate.net/profile/Mesfin-Mekonnen/publication/228356003_Water_footprint_manual/links/02bfe50ced11c8dbef000000/Water-footprint-manual.pdf
- López, L.R. et al. (2009). Índice de estrés hídrico como un indicador del momento de riego en cultivos agrícolas. Agricultura técnica en México. Vol. 35. No. 1.
http://www.scielo.org.mx/scielo.php?pid=S0568-25172009000100010&script=sci_arttext
- Mekonnen, M.M. and Hoekstra, A.Y. 2011. The green, blue and grey water Footprint of crops and derived crop products. Hydrology and Earth System Sciences. 15(1577-1600). DOI: <https://doi.org/10.5194/hess-15-1577-2011>
- Munia, A.H. et al. (2020). Future Transboundary Water Stress and Its Drives Under Climate Change: A Global Study. Earth's Future. Volumen 8.
DOI: <https://doi.org/10.1029/2019EF001321>
- Rocha, F.A. 2016. El agua virtual en el mundo del siglo XXI. Perfiles de Ingeniería, 1(10). DOI: https://doi.org/10.31381/perfiles_ingenieria.v1i10.433

ⁱ El agua virtual en el mundo del siglo XXI. Doi:

https://doi.org/10.31381/perfiles_ingenieria.v1i10.433

ⁱⁱ Hoekstra 2003, Concepto de Huella Hídrica.

https://www.worldwatercouncil.org/fileadmin/wwc/Programs/Virtual_Water/VirtualWater_Proceedings_IHE.pdf#page=13

ⁱⁱⁱ Water Footprint of nations, volumen 1: Main report, Hoekstra y Chapagain, 2004.

<https://research.utwente.nl/en/publications/water-footprints-of-nations>

^{iv} Water Footprint manual, state of the art, 2009. Hoekstra et al 2009.

https://www.researchgate.net/profile/Mesfin-Mekonnen/publication/228356003_Water_footprint_manual/links/02bfe50ced11c8dbef000000/Water-footprint-manual.pdf

^v The Green, blue and grey water Footprint of crops and derived crop products. 2011. Mekonnen and Hoekstra.

DOI: www.hydrol-earth-syst-sci.net/15/1577/2011/

DOI: <https://doi.org/10.5194/hess-15-1577-2011>

^{vi} Estudio nacional de Huella Hídrica Colombia sector agrícola. 2012. Arévalo et al. (2012). Doi:

<http://hdl.handle.net/2099/11915>

^{vii} Índice de Estrés Hídrico como un indicador del momento de riego en cultivos agrícolas,

López et al. (2009). http://www.scielo.org.mx/scielo.php?pid=S0568-25172009000100010&script=sci_arttext

^{viii} Future Transboundary Water Stress and Its Drivers Under Climate Change: A Global Study. (2020). Advancing Earth and Space Science. Vol. 8.

<https://doi.org/10.1029/2019EF001321>