

Estimación de la huella hídrica agrícola del DR 011, alto río Lerma

César Botello-Aguillón¹
Ramón Valdivia Alcalá^{1,§}
Dora Ma. Sangerman-Jarquín²
Juan Hernández Ortiz¹
Francisco Gerardo Gutiérrez García¹
Fermín Sandoval Romero¹

1 Universidad Autónoma Chapingo. Chapingo, Texcoco, Estado de México, México. CP. 56230. (cbotelloa@gmail.com; jhdzo@yahoo.com.mx; franko-3g@yahoo.com.mx; fsandoval.romero@gmail.com).

2 Campo Experimental Valle de México-INIFAP. Coatlinchán, Texcoco, Estado de México, México. CP. 56250. (sangerman.dora@inifap.gob.mx).

Autor para correspondencia: ramvaldi@gmail.com.

Resumen

En la búsqueda de indicadores coadyuven a medir el impacto de las actividades humanas en el medio ambiente y los recursos naturales, existe uno que resulta de gran utilidad como indicador de la demanda sobre los recursos hídricos mundiales. La estimación de la huella hídrica de la producción agrícola permitió la identificación de cultivos que pueden reducirla en favor de aumentar la eficiencia del uso del agua. Se usó la metodología de Hoekstra *et al.* (2011), para estimar la huella hídrica de productos agrícolas del Distrito de Riego 011. Se encontró que de 14 cultivos del distrito, la huella hídrica total promedio en los módulos de riego ($\text{dam}^3 \text{t}^{-1}$), la del cacahuate, frijol y nopal reportan los mayores niveles (1.7, 1.6 y 1.8, respectivamente) mientras que la de los cultivos de lechuga, tomate de cáscara y zanahoria son las menores (0.15, 0.29 y 0.25, respectivamente). De la huella hídrica del total de la producción agrícola (dam^3), se observó que el maíz participa con el 43.4%; sin embargo, representó el 52.8% de la producción total. Los cultivos de cacahuate y alfalfa del módulo 05 son económicamente incosteables, presentaron costos de agua azul por tonelada elevados (\$8 623.00 y \$11 914.00); sin embargo, ocupan el 1% del área sembrada. La variación de la huella hídrica de cultivos entre los módulos de riego obtenida es de ayuda para identificar las prácticas agrícolas que contribuyeron a aumentar rendimientos y a optimizar la aplicación del riego y en consecuencia aportar mayores beneficios económicos a los productores.

Palabras clave:

agua virtual, eficiencia, escasez hídrica.



Introducción

Desde hace décadas los debates sobre el impacto de las actividades humanas en los recursos mundiales del agua se han incrementado, creando enormes desafíos para los habitantes y para todos los diferentes usuarios del agua, intensificándose donde las consecuencias del cambio climático empiezan a manifestarse de forma inobjetable (Bernauer y Böhmelt, 2020). En la conferencia internacional sobre el agua y el medio ambiente de Dublín, Irlanda, se produjo la 'Declaración de Dublín', que constituyó el principal elemento sobre los problemas de agua dulce (WMO, 1992).

Vale la pena recordar dos de los cuatro principios rectores de la conferencia que son relevantes para el estudio en cuestión, lo que no significa que los otros dos tengan menos importancia. Se trata del principio rector número 1 y el número 4 (WMO, 1992): principio número 1, el agua dulce es un recurso finito (2.5% de los 1 400 millones de kilómetros cúbicos de agua en el planeta) y vulnerable, esencial para sostener la vida, el desarrollo y el medio ambiente' y principio rector número 4, el agua tiene un valor económico en todos sus diversos usos en competencia a los que se destina y debería reconocérsele como un bien económico'.

Estos dos principios además de admitir sin ambages la importancia del agua para la vida y todas las actividades humanas y el medio ambiente, señala que, por su escasez y los múltiples usos se debe reconocer como un bien económico y por tanto, la economía y sus principios resultan de utilidad para mejorar su uso.

Gracias al constante diálogo sobre la problemática del recurso agua, a los avances científicos y tecnológicos que se han desarrollado alrededor del tema hídrico, se ha llegado a comprender los procesos que se dan para cuantificar la disponibilidad del recurso a lo largo del ciclo del agua, se han identificado las instituciones involucradas en la regularización de los intercambios entre los sistemas ecológico y socioeconómico y los precursores de la aparente escasez de agua y se han propuesto y aplicado metodologías para identificar el estado de la gobernanza multinivel del agua (OCDE, 2015).

En las últimas décadas se han desarrollado conceptos e indicadores que contribuyeron a medir el impacto de las actividades humanas sobre el medio ambiente y los recursos naturales. Entre éstos se encuentra la huella ecológica, la huella de carbono, el agua virtual y la huella hídrica. La huella hídrica (HH), es un concepto desarrollado en analogía con el concepto de huella ecológica, que analiza los patrones de consumo de recursos y la producción de desechos de una población determinada (Hoekstra y Chapagain, 2006), el concepto de HH se introdujo una década después del concepto de agua virtual (Allan, 1994), en conferencias de expertos del agua por Hoekstra y Hung.

La HH y el agua virtual (AV) están estrechamente relacionadas (Chapagain y Hoekstra, 2004), el AV se define como el volumen de agua necesario para producir un producto o servicio, además de agua física que puede contener, también incluye la cantidad de agua que se ha requerido para generar dicho producto o servicio (Oltra-Cámara y Jiménez-Honrado, 2018), mientras que la descripción de HH, es el volumen de agua necesario para la producción de los bienes y servicios que consumen los habitantes dentro de un área geográfica, una cuenca hidrográfica o un país (Dan *et al.*, 2021).

La HH se presenta como un marcador de uso del agua que está detrás de cada producto. El concepto se utiliza para evaluar el uso del agua a lo largo de las cadenas de suministro (Hoekstra, 2016), la sostenibilidad del uso del agua dentro de las cuencas fluviales (Abbasi *et al.*, 2019), la eficiencia del uso del agua (Cao *et al.*, 2021), la equidad en la asignación del agua (Kumar, 2021) y la dependencia del agua en la cadena de suministro (Aivazidou *et al.*, 2018). Hoekstra *et al.* (2011), mencionan que el agua en una cuenca debe ser asignada de forma económicamente eficiente a los diferentes usuarios y cada usuario también debe utilizar su agua asignada de manera eficiente.

La HH se ha utilizado como herramienta para evaluar y mejorar la eficiencia en el uso del agua y la gestión de los recursos hídricos (Lathuillière *et al.*, 2018), una ventaja de la utilización de los enfoques de HH y AV se encuentra en el hecho de dar sentido a la idea de transversalidad

requerida en la implementación de la política hídrica de un país (Pérez-Espejo *et al.*, 2016), de tal modo que algunos investigadores piden que para el análisis de las políticas de gestión de los recursos hídricos, los enfoques anteriores sean reemplazados por los enfoques del AV y la HH (Bazrafshan *et al.*, 2020).

Existen tres componentes de la HH, en función de la procedencia del agua: huella hídrica verde (lluvia), huella hídrica azul (agua dulce) y huella hídrica gris (calidad del agua), éste último se refiere al volumen necesario para la asimilación de contaminantes, juntos estos componentes proporcionan un panorama completo del uso del agua al delinear la fuente de agua consumida.

Los beneficios económicos asociados a una HH, en cualquiera de sus componentes (verde, azul o gris), que resultan de usar el agua para un fin determinado deben sobrepasar el costo total asociado a esta HH (Hoekstra *et al.*, 2011). En la cuenca hidrográfica de Lerma-Chapala en México la escasez de agua y su creciente demanda para el riego ha causado crisis de años secos intermitentes desde 1950 (Vargas-Velázquez, 2007), por tal motivo se ha despertado gran interés sobre el recurso hídrico en términos de calidad y cantidad en tiempos prolongados de estiaje, ya que se generan conflictos en la región entre usuarios y autoridades del agua por la fuerte competencia existente del recurso hídrico entre los sectores que lo demandan (Fernández-Durán y Lloret-Carrillo, 2016).

La presencia y aumento de la escasez del agua, la competencia creciente del agua entre sectores y la reducción de opciones en estrategias de suministro del recurso hídrico en la agricultura de la cuenca Lerma-Chapala, motivaron a realizar la presente investigación sobre la HH azul, verde y gris de la producción agrícola del Distrito de Riego 011, Alto Río Lerma (DR 011), de tal modo que los resultados permitan la identificación de cultivos que pueden reducir su huella hídrica para fortalecer la gestión de la demanda del agua y aumentar la eficiencia de su uso en la agricultura.

Materiales y métodos

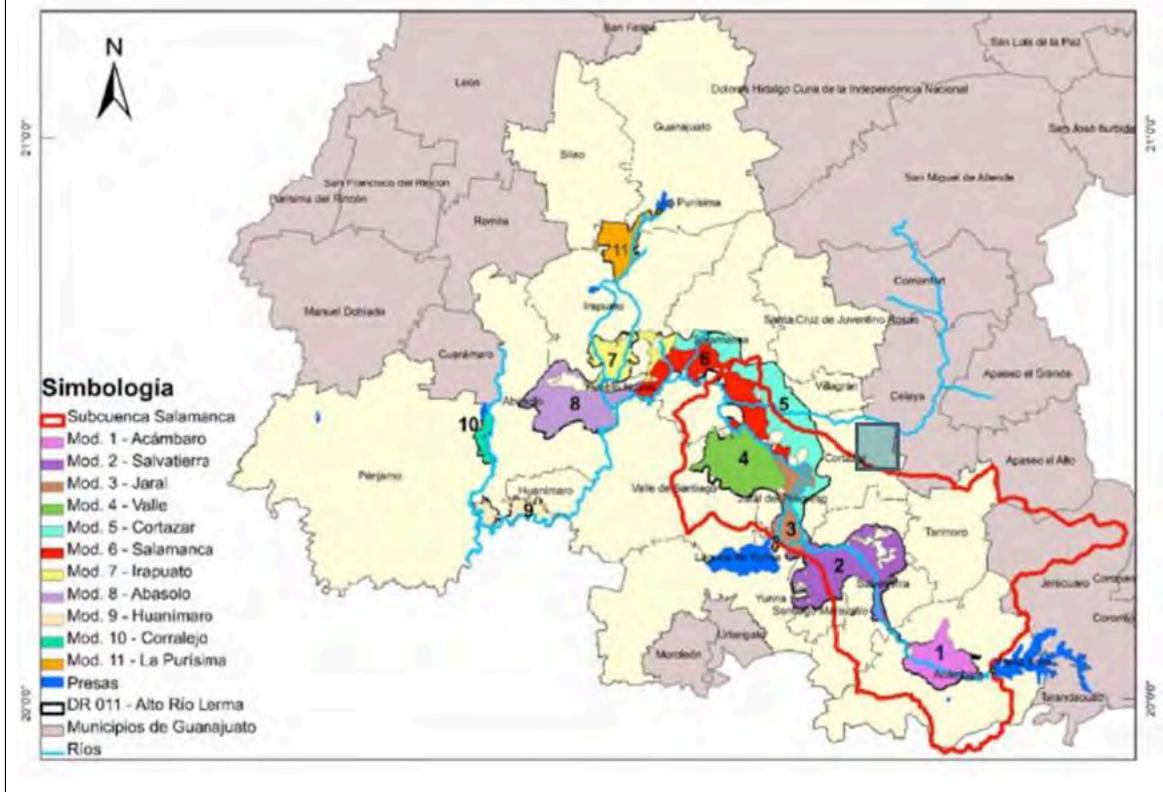
El DR 011 está ubicado en El Bajío guanajuatense, cuenta con 11 asociaciones de usuarios de riego conocidos como 'módulos de riego', mismos que agrupan a 26 611 usuarios, tiene un total de 111 242.55 ha de las cuales 110 299.45 son de riego (Rodríguez-Flores *et al.*, 2019).

El desarrollo del estudio estuvo basado en la aplicación de la metodología para la contabilidad de la huella hídrica de productos agrícolas o forestales (Hoekstra *et al.*, 2011). La metodología para el cálculo de la HH se realizó en dos etapas. En la primera se definió el alcance general de la evaluación, para tal proceso se siguieron cuatro pasos básicos con el fin de dar claridad al tipo de información necesaria y de las fuentes de búsqueda.

Primero se definió el DR 011 como el área de estudio para calcular la HH azul, verde y gris de la producción agrícola (Figura 1), mismo que se extiende desde la Presa Solís (municipio de Acámbaro), hasta la zona de influencia del Río Turbio. Las presas que proveen al distrito son cuatro embalses de almacenamiento: la Presa Tepuxtepec, la Presa Solís, el Lago Yuriria y la Presa Purísima. En segundo lugar, se acotó el alcance de la investigación, con capacidad de proponer alternativas a nivel regional que mejoren las políticas de gestión de los recursos hídricos de la zona de estudio.



Figura 1. Ubicación del Distrito de Riego 011 (Magaña-Zamora *et al.*, 2017).



En el tercer paso, se definieron estrategias para la recolección de información primaria, donde las autoridades de la jefatura del DR 011, otorgaron facilidades para la obtención de la información de los rendimientos de los cultivos, la programación del riego y producción agrícola de cada uno de los 11 módulos de riego que componen al distrito. La información hidro-climática requerida de cada uno de los módulos del DR 011 (Cuadro 1) se obtuvo con ayuda de la base de datos de Aquastat (FAO, 2022).

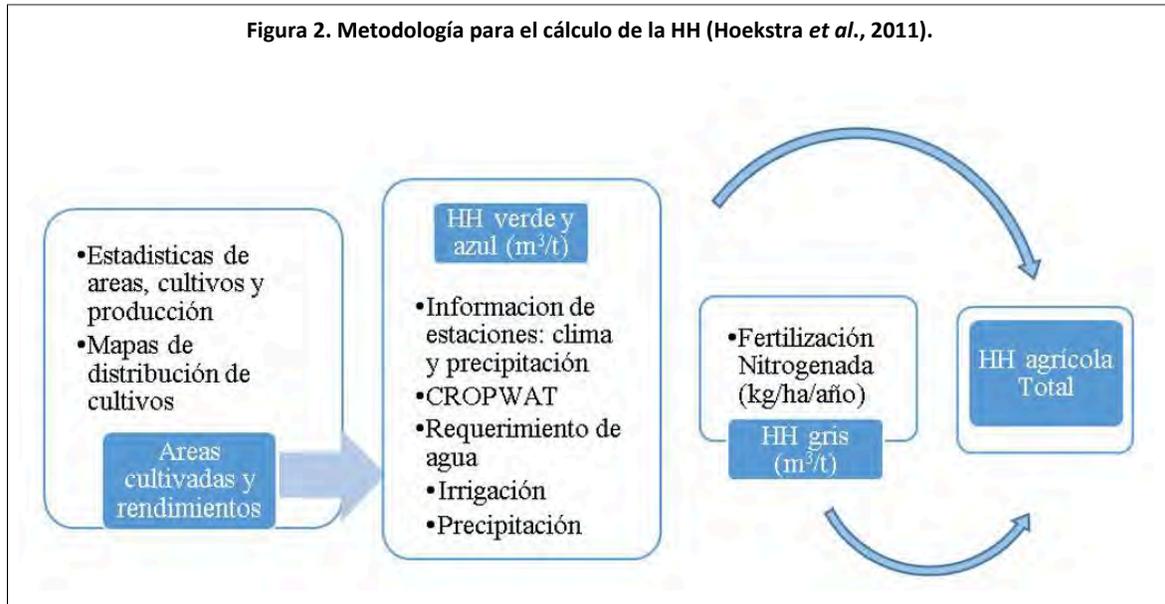
Cuadro 1. Ubicación geográfica de los módulos de riego del DR 011, Alto Río Lerma.

Módulo		Latitud N	longitud O	Altitud (m)
1	Acámbaro	20.08	100.77	1 846
2	Salvatierra	20.24	100.95	1 743
3	Jaral	20.33	101.03	1 729
4	Valle	20.42	101.14	1 718
5	Cortázar	20.47	101.02	1 730
6	Salamanca	20.58	101.19	1 715
7	Irapuato	20.62	101.35	1 717
8	Abasolo	20.51	101.46	1 700
9	Huanímaro	20.34	101.53	1 692
10	Corralejo	20.48	101.62	1 692
11	La purísima	20.80	101.36	1 749

Información de la Jefatura del Distrito de Riego 011.

Por último, se analizó la confiabilidad de la información. Luego de realizar los pasos básicos, se organizó la información en diferentes grupos, que contuvieran cada uno: la información base para el estudio, la información hidro-climática y los aspectos económicos.

En la segunda etapa se realizó la estimación de la HH del proceso de los cultivos (huella hídrica agrícola) con riego de las fuentes de abastecimiento superficial del ciclo agrícola 2021-2022, la cual se compone por la huella hídrica azul, verde y gris y se expresa en $m^3 t^{-1}$ (Figura 2).



Con la información hidro-climática se utilizó el software Cropwat 8.0 de la FAO para la estimación del agua azul evapotranspirada (ET_{azul}) y el agua verde evapotranspirada (ET_{verde}), las cuales se expresan en $mm \text{ periodo}^{-1}$ y que con una relación de 10 se convierten en agua azul utilizada por el cultivo ($CWU_{\text{verde}}, m^3 ha^{-1}$) y agua verde utilizada por el cultivo ($CWU_{\text{verde}}, m^3 ha^{-1}$), finalmente se calculó el componente azul de la huella hídrica ($Ec1$) de un cultivo ($HH_{\text{cultivo, azul}}, m^3 t^{-1}$), como el agua azul utilizada por el cultivo dividido por el rendimiento de los cultivos ($Y, t ha^{-1}$). El componente verde ($Ec2$) ($HH_{\text{cultivo, verde}}, m^3 t^{-1}$) se calculó de una manera similar.

$$HH_{\text{cultivo, azul}} = \frac{CWU_{\text{azul}}}{Y}$$

Ec1.

$$HH_{\text{cultivo, verde}} = \frac{CWU_{\text{verde}}}{Y}$$

Ec2.

El componente gris de la huella hídrica de cada cultivo ($HH_{\text{cultivo, gris}}, m^3 t^{-1}$), se calculó multiplicando la tasa de aplicación de fertilizante nitrogenado por hectárea ($TA, kg ha^{-1}$) por la fracción de lixiviación-escorrentía superficial (α) dividido entre la concentración máxima permitida ($C_{\text{máx}}, kg m^{-3}$), menos la concentración natural para fertilizante nitrogenado que es aplicado ($C_{\text{nat}}, kg m^{-3}$) y posteriormente se dividió entre el rendimiento del cultivo ($R, t ha^{-1}$).

$$HH_{\text{proc, gris}} = \frac{(\alpha \cdot TA) / (C_{\text{máx}} - C_{\text{nat}})}{R}$$

Ec3.

Se consideró a α como un 10% de la tasa de fertilización aplicada como lo marcan Hoekstra *et al.* (2011). La concentración máxima permitida en masas de aguas superficiales fue tomada de la norma mexicana NOM-127-SSA1-2021, que indica 10 mg L^{-1} (medidos como N), se consideró la concentración natural igual a cero por falta de información apropiada y la información referente a la tasa de aplicación de nitrógeno en los cultivos fue tomada de la agenda técnica agrícola del estado de Guanajuato (SAGARPA, 2015).

Cuando el precio del agua para el usuario está por debajo de su costo económico real, generalmente resulta en un uso ineficiente, como en general es el caso en la agricultura. Para hacer un análisis económico de la HH azul superficial para riego, se tomó en cuenta la investigación de Botello-Aguillón *et al.* (2022), donde encontraron que en promedio el precio sombra (la productividad marginal) del agua de los módulos 02 y 05 del DR 011 era mayor (26 veces) a las cuotas de riego pagadas por los usuarios, utilizando los valores de la investigación (Cuadro 2), se multiplicaron por la HH de cada cultivo para conocer la pérdida económica real del agua superficial que es consumida (extraída de la cuenca) en la producción agrícola.

Cuadro 2. Precio sombra del agua superficial para riego en el DR011 (Botello-Aguillón *et al.*, 2022).

Ciclo	Precio sombra del agua ($\$ \text{ dam}^{-3}$)	
	M02	M05
O-I	1 284	1 371
P-V	2 084	3 872
Perennes	1 964	12 771

La HH total de un área geográfica genera un punto crítico económico; es decir, es económicamente insostenible cuando el agua no se asigna y usa de manera económicamente eficiente. Los beneficios de una HH (verde, azul o gris) que son resultados del uso de agua para un determinado fin deberían superar el coste total asociado con esta huella hídrica, incluyendo las externalidades y los costes de escasez del agua (Hoekstra, *et al.*, 2011).

En el DR 011 se siembra en el ciclo otoño-invierno (O-I) que va de octubre a noviembre, las cosechas se realizan en febrero y marzo y se cultivan principalmente trigo, cebada y hortalizas como brócoli y lechuga. En el ciclo primavera-verano (P-V) la siembra va de los meses de marzo y abril y las cosechas de septiembre a octubre, se cultivan maíz y sorgo principalmente. Hay cultivos perennes, los principales son alfalfa y esparrago. Se consideran como segundos cultivos al maíz y al sorgo sembrados generalmente en el mes de mayo.

Resultados y discusión

Siguiendo la metodología descrita anteriormente, se obtuvieron los componentes azul, verde y gris por cultivo en cada módulo de riego del DR 011 (Cuadro 3). Se debe señalar que se ignoró la evapotranspiración del agua en las zonas de captación y los canales de conducción y no se contabilizó el agua verde y azul incorporadas a los cultivos debido a que es considerado en la literatura entre el 75 y el 80% (Hoekstra *et al.*, 2011), lo que supone menos de 1% de la huella hídrica con respecto al agua evaporada. El componente gris del garbanzo es considerado 0% debido a que no se aplica fertilizante nitrogenado porque la siembra del cultivo generalmente se hace bajo condiciones de humedad restringida.

Cuadro 3. Huella hídrica por componente de cada cultivo del DR 011.

	Componentes de huella hídrica por cultivo		
	azul ($\text{m}^3 \text{ t}^{-1}$)	verde ($\text{m}^3 \text{ t}^{-1}$)	gris ($\text{m}^3 \text{ t}^{-1}$)
Alfalfa	298.7	478.5	30.4

	Componentes de huella hídrica por cultivo		
	azul (m ³ t ⁻¹)	verde (m ³ t ⁻¹)	gris (m ³ t ⁻¹)
Avena	935.1	140.7	166.2
Cacahuate	1 055.8	535.5	89
Cebada	722.9	66.8	149.6
Espárrago	1 015.2	1 345.3	85.9
Frijol	1 116.8	279.7	200.1
Garbanzo	1 064.4	249.9	0
Lechuga	74.3	9.5	61.5
Maíz grano	85.3	321.7	211.3
Nopal	892.5	770.1	125
Sorgo grano	68.2	352.8	249.9
Tomate de cáscara	195.9	46.7	50.1
Trigo	626.4	60.5	391.5
Zanahoria	193.6	22.1	30.8

La WWF (2012), en un reporte de huella hídrica de la agricultura colombiana que considera la huella gris, reportan porcentajes de los componentes azul, verde y gris del 7.1, 87.1 y 5.8%, respectivamente, a diferencia del presente estudio donde los porcentajes son de 56.1, 31.5 y 12.4%, respectivamente, la diferencia entre los porcentajes de HH azul y verde pueden responder a la diferencia de las precipitaciones.

Autores como Álvarez *et al.* (2016), mencionan que la huella hídrica azul, se hace más relevante con la menor ocurrencia de precipitaciones, lo que implica una mayor demanda de agua de riego, mientras Colombia presentó una precipitación media anual de 1 293.1 mm, en Guanajuato, México la precipitación media anual es de apenas 478.4 mm (Weather Spark, 2022).

Cuando el fenómeno climático de la niña se presenta en invierno y primavera, se registra regularmente una sequía en el centro y norte de México. La investigación de Lobato-Sánchez y Mejía-Estrada (2021), coinciden que fue la situación que se presentó en 2020, debido a que se mantuvo la condición de la niña desde el último trimestre del año 2020, ocasionando que la temporada de lluvia estuviera por debajo de su valor promedio.

La relación de la HH gris que guardan los estudios es mas acotada, las diferentes dosis de fertilización o falta de datos, son una posible causa de la diferenciación. Arenas *et al.* (2020), encontraron en el área estudiada que las proporciones de HH en la agricultura cambiaron de 18% (azul), 78% (verde) y 4% (gris) para un año húmedo (1 030.6 mm, en 2007) a 68% (azul), 29% (verde) y 3% (gris) respecto a un año seco (675.1 mm, en 2015).

Sumando los componentes de huella hídrica, se determinó la HH total para cada cultivo por ciclo agrícola y módulo, para agua superficial. Se estimó la HH total promedio de 14 cultivos, de los cuales el cacahuate, frijol y nopal reportan mayor HH, mientras que las hortalizas con los cultivos de lechuga, tomate de cáscara y zanahoria son las de menor HH (Cuadro 4).

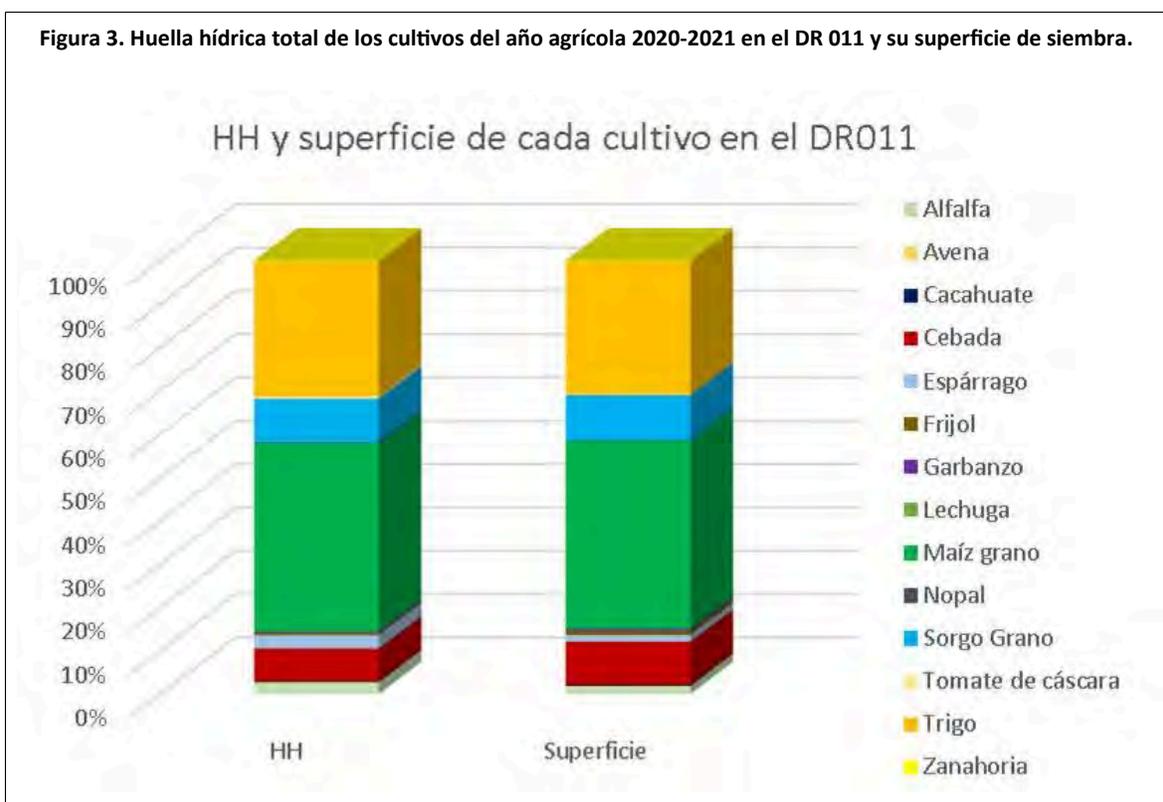
Cultivo	Huella hídrica (dam ³ t ⁻¹)											
	Módulo	01	02	03	04	05	06	07	08	09	10	11
Alfalfa		0.4	0.7	0.5	0.3	2.4	0.7	0.4	1.1			
Avena		0.4	3.7		0.3	1.5		0.3				
Cacahuate			1			2.9						1.1
Cebada		0.7	1.3	0.9	0.8	0.9	1	0.9	1	0.9		1
Espárrago						2.5	1.5	3.3	2.6			

Cultivo Módulo	Huella hídrica (dam ³ t ⁻¹)										
	01	02	03	04	05	06	07	08	09	10	11
Frijol		1.9			1.3						
Garbanzo	1.5	0.6	1.9	1.2	1.6		1.1				
Lechuga					0.1						
Maíz grano	0.7	0.5	0.6	0.6	0.6	0.7	0.6	0.6	0.6	0.5	0.7
Nopal						1.8					
Sorgo grano	0.6	0.6	0.6	0.6	0.7	0.8	0.7	0.7	0.6	0.6	0.8
Tomate de cáscara	0.3										
Trigo	0.9	1.1	1.2	1.1	0.9	1.2	1.1	1.1	1.2		1.2
Zanahoria		0.2									

Los resultados de huella hídrica promedio de los cultivos del ciclo agrícola de la presente investigación guardan relación con Magaña-Zamora *et al.* (2017), que para el mismo distrito de riego contabilizaron la HH azul promedio de riego de presas y bombeo y encontraron que los cultivos que tienen una HH azul menor son las hortalizas, representados por la lechuga, zanahoria y la sandía (21, 14 y 15 m³ t⁻¹, respectivamente), mientras que los valores más altos son en los cultivos perennes como el espárrago, la alfalfa y el zacate (1 235, 452 y 333 m³ t⁻¹, respectivamente).

En los resultados de HH de la producción total del DR 011 y su superficie de siembra (Figura 3), se observó que los cultivos de maíz y trigo tienen alto peso en términos de HH total, participando con el 74% del total, el maíz 43% y el trigo 31%, pero los cultivos representaron respectivamente el 53% y 22% de la producción total del DR 011, al contraste con el cultivo de lechuga que representa apenas el 0.007% de la HH total con solo el 0.04% del total de la producción total.

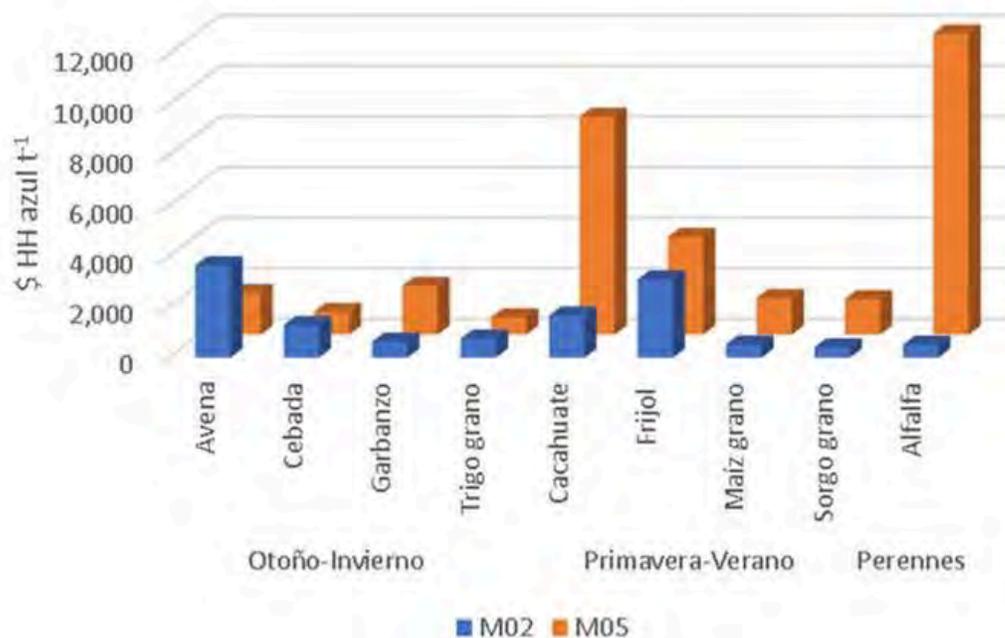
Figura 3. Huella hídrica total de los cultivos del año agrícola 2020-2021 en el DR 011 y su superficie de siembra.



Los cultivos de maíz, trigo, sorgo y cebada necesitan grandes cantidades de agua debido a la extensa superficie que ocupan. Tan solo estos cuatro cultivos usan de 94% de la extensión de superficie de riego por gravedad.

La relación entre la HH azul de los cultivos y el precio sombra del agua superficial obtenido de Botello-Aguillón *et al.* (2022) en los módulos 02 y 05 se utilizaron para conocer el valor de la HH azul por tonelada de cada cultivo (Figura 4). Los cultivos de alfalfa, cacahuete y frijol son los más costosos en términos de agua azul, principalmente debido a que presentan baja productividad agrícola respecto a otros módulos. Una de las características de la HH es que es un indicador espacial y temporal.

Figura 4. Valor de la HH azul por tonelada de cultivos del M02 y M05.

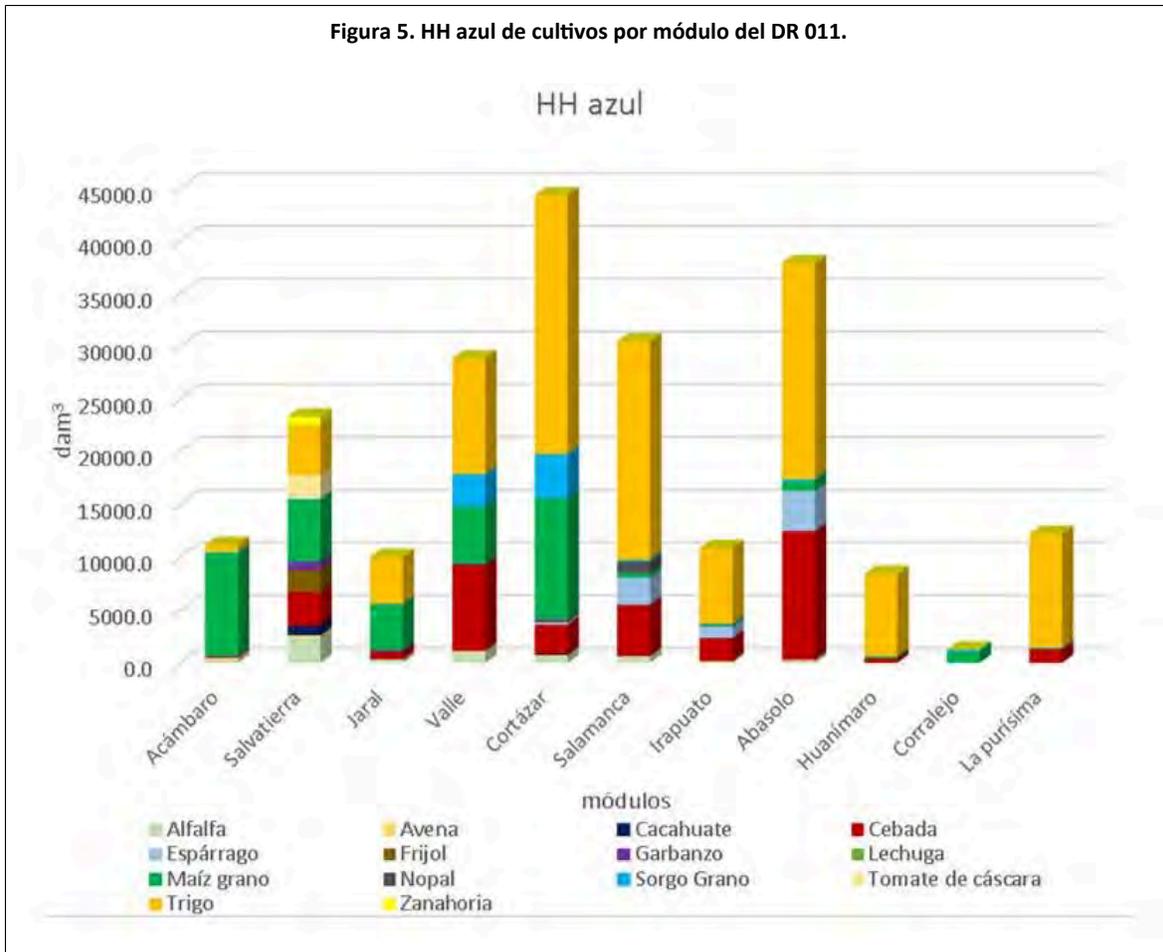


El bajo rendimiento de estos cultivos puede ser causado por agentes negativos, externos y temporales, por lo tanto, se necesita un análisis profundo de las posibles causas para que se implemente una estrategia que ayude al aumento de la producción y así mejorar los beneficios económicos del uso del agua azul.

En la Figura 5 se presenta la distribución de HH azul por cultivo en cada módulo del DR 011, donde se observa el peso que tiene la HH azul (dam³) de la producción total de los cultivos de trigo, maíz y cebada, que juntos suman el 85.8% del total de HH azul, con el 51.3, 18.1 y 16.4%, respectivamente. Resalta el módulo 05: Cortázar, como el de mayor HH azul coincidiendo con Magaña-Zamora *et al.* (2017), mientras el módulo 10: Corralejo como el de menor HH azul; sin embargo, este último es el de menor superficie sembrada con menos del 1%.



Figura 5. HH azul de cultivos por módulo del DR 011.



Investigaciones como las de Mekonnen y Gerbens (2020), mencionan que la valoración económica debe integrarse con la evaluación de las huellas hídricas y los flujos de agua virtuales para asignar el agua de manera eficiente y en combinación con el comercio de agua virtual ayudarán a evitar el uso insostenible del agua.

Conclusiones

La variación de la huella hídrica ($\text{dam}^3 \text{ t}^{-1}$) entre cultivos indican cambios en las prácticas agrícolas que se pueden identificar para reducir la HH de los cultivos que presentan mayores valores. El porcentaje de HH azul es importante para identificar el uso de agua utilizada para riego en la agricultura, el porcentaje azul será mayor cuando se tengan menores precipitaciones en la zona geográfica de estudio, la baja productividad de los cultivos ocasiona el aumento de las HH azul y verde.

La HH gris representa un porcentaje considerable (17%) en la contabilidad de la HH total, se debe prestar atención en las dosis de fertilización que aplican los usuarios del DR 011, un uso eficiente de fertilizantes y plaguicidas puede disminuir considerablemente el componente gris. Las mejoras en las prácticas agrícolas que contribuyan a aumentar rendimientos de los cultivos y aquellas que optimicen la aplicación del riego, reducirán la huella hídrica en cada cultivo y en consecuencia aportarán mayores beneficios económicos a los productores derivados de un mejor uso del agua. El agua es un recurso importante en la agricultura y es primordial contar con medidas que ayuden a contribuir a un uso eficiente, principalmente donde se presente escasez de este recurso, como zonas áridas y semiáridas.

Bibliografía

- 1 Abbasi, H.; Delavar, M. and Bigdeli, R. 2019. Evaluation of climate change impacts on water resource sustainability in river basins using the water footprint scarcity indicators. *Iran Water Resources Research*. 15(4):259-272.
- 2 Aivazidou, E.; Tsolakis, N.; Vlachos, D. and Iakovou, E. 2018. A water footprint management framework for supply chains under green market behavior. *Journal of Cleaner Production*. 197(1):592-606. [10.1016/j.jclepro.2018.06.171](https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.06.171).
- 3 Allan, J. A. 1994. Overall perspectives on countries and regions. *In: water in the Arab world: perspectives and prognoses*. Ed. Harvard University Press. Cambridge, Massachusetts. 65-100 pp.
- 4 Álvarez, A. , Morábito J. A. y Schilardi C. 2016. Huellas hídricas verde y azul del cultivo de maíz (*Zea mays*) en provincias del centro y noreste argentino. *Revista de la Facultad de Ciencias Agrarias*. 48(1):161-177. <https://www.redalyc.org/pdf/3828/382846012006.pdf>.
- 5 Arenas, C. F.; Correa, S. N. y Pineda, S. M. 2020. Estimación de la huella hídrica en la producción agrícola de lima Tahití en la cuenca la angula, Santander, Colombia. *Investigación y Ciencia*. 28(79):52-61. <https://www.redalyc.org/journal/674/67462875006/html/>.
- 6 Bazrafshan, O.; Zamani, H.; Etedali, H. R.; Moshizi, Z. G.; Shamili, M.; Ismaelpour, Y. and Gholami, H. 2020. Improving water management in date palms using economic value of water footprint and virtual water trade concepts in Iran. *Agricultural Water Management*. 229(1):105941. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2019.105941>.
- 7 Bernauer, T. and Böhmelt, T. 2020. International conflict and cooperation over freshwater resources. *Nature Sustainability*. 3(5):350-356. <https://doi.org/10.1038/s41893-020-0479-8>.
- 8 Botello-Aguillón, C.; Valdivia-Alcalá, R.; Hernández-Ortiz, J.; Sangerman- Jarquín, D. M. and Gutiérrez, F. G. 2022. Reallocation of water in agriculture under drought conditions as economic efficiency maximizer. *Agro productividad*. 15(8):187-194. <https://doi.org/10.32854/agrop.v15i8.2191>.
- 9 Cao, X.; Zeng, W.; Wu, M.; Li, T.; Chen, S.; and Wang, W. 2021. Water resources efficiency assessment in crop production from the perspective of water footprint. *Journal of Cleaner Production* . 309(1):127371. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.127371>.
- 10 Chapagain, A. K. and Hoekstra, A. Y. 2004. Water footprints of nations. *Unesco-IHE Institute for Water Education*. 1(16):11-75. <https://www.waterfootprint.org/resources/Report16Vol1.pdf>.
- 11 Dan, W.; Hubacek, K.; Shan, Y.; Gerbens, W.; and Liu, J. 2021. A review of water stress and water footprint accounting. *Water*. 13(2):201. <https://doi.org/10.3390/w13020201>.
- 12 FAO. 2022. Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO). AQUASTAT-mapa global de superficies de riego. <https://www.fao.org/aquastat/es/geospatial-information/climate-information>.
- 13 Fernández-Durán, J. J. y Lloret-Carrillo, A. 2016. Consumo de agua y producto interno bruto en la cuenca Lerma Chapala. *Tecnología y Ciencias del Agua*. 7(4):129-138. <https://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci-arttext&pid=S2007-24222016000400129>.
- 14 Hoekstra, A. Y. 2016. A critique on the water-scarcity weighted water footprint in LCA. *Ecological Indicators*. 66(1):564-573. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2016.02.026>.
- 15 Hoekstra, A. Y. and Chapagain, A. K. 2006. Water footprints of nations: water use by people as a function of their consumption pattern. *In: integrated assessment of water resources and global change*. Springer, Dordrecht. 35-48 pp. [10.1007/978-1-4020-5591-1-3](https://doi.org/10.1007/978-1-4020-5591-1-3).
- 16 Hoekstra, A. Y.; Chapagain, A. K.; Mekonnen, M. M. and Aldaya, M. M. 2011. The water footprint assessment manual: setting the global standard. *Routledge*. 46-51 pp. <https://doi.org/10.4324/9781849775526>.

- 17 Kumar, T. 2021. Water footprints and water allocation in a sustainable manner. *Asian Journal of Multidimensional Research*. 10(12):51-56. <https://doi.org/10.5958/2278-4853.2021.01185.x>.
- 18 Lathuilière, M. J.; Bulle, C. and Johnson, M. S. 2018. A contribution to harmonize water footprint assessments. *Global Environmental Change*. 53(1):252-264. <https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2018.10.004>.
- 19 Lobato-Sánchez, R. y Mejía-Estrada, P. I. 2021. Perspectiva sobre la sequía actual en México. Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA). *Perspectivas*. Núm. 16. Morelos. 1-3 pp. <https://doi.org/10.24850/b-imta-perspectivas-2021-16>.
- 20 Magaña-Zamora, J. D.; Ortiz-Aguilar, T. LI. y Hernández-Gen, J. 2017. La huella hídrica de productos agrícolas de la subcuenca salamanca. *In: huella hídrica en México: análisis y perspectivas*. Ed. Instituto Mexicano de Tecnología del Agua. Progreso, Morelos, México. 175-206 pp.
- 21 Mekonnen, M. M. and Gerbens-Leenes, W. 2020. The water footprint of global food production. *Water*. 12(10):2696. <https://doi.org/10.3390/w12102696>.
- 22 OCDE. 2015. Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económicos. Principios de gobernanza del agua de la OCDE. <https://www.oecd.org/cfe/regional-policy/OECD-Principles-Water-spanish.pdf>.
- 23 Oltra-Cámara, M. A. y Jiménez-Honrado, F. 2018. La huella hídrica en el sector agrario de la Vega Baja. *In: agroalimentación, agua y sostenibilidad*. Ed. Orihuela. Ayuntamiento de Alicante, Universidad. 91-99 pp. <http://hdl.handle.net/10045/83930>.
- 24 Pérez-Espejo, R. H.; Constantino-Toto, R. M. and Dávila-Ibañez, H. R. 2016. Water, food and welfare: water footprint as a complementary approach to water management in Mexico. Springer. 189-198 pp. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-28824-6>.
- 25 Rodríguez-Flores, J. M.; Medellín-Azuara, J.; Valdivia-Alcalá, R.; Arana, O. A. and García, R. C. 2019. Insights from a calibrated optimization model for irrigated agriculture under drought in an irrigation district on the central mexican high plains. *Water*. 11(4):858. <https://doi.org/10.3390/w11040858>.
- 26 SAGARPA. 2015. Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación. *Agenda Técnica Agrícola Michoacán*.
- 27 Vargas-Velázquez, S. 2007. Agua y sociedad en el alto Lerma: el módulo Tepetitlán. *Agricultura, Sociedad y Desarrollo*. 4(1):1-17. <https://www.scielo.org.mx/scielo.php?pid=S1870-54722007000100001&script=sci-abstract>.
- 28 Weather Spark. 2022. El clima y el tiempo promedio en todo el año en Guanajuato. Elaborado por Cedar Lake Ventures, Inc. <https://es.weatherspark.com/y/4641/Clima-promedio-en-Guanajuato-M%C3%A9xico-durante-todo-el-a%C3%B1o>.
- 29 WMO. 1992. World Meteorological Organization. International conference on water and the environment: development issues for the 21st Century, Dublin, Ireland. The Dublin statement and report of the conference. 3-8 pp. <https://www.ircwash.org/resources/international-conference-water-and-environment-development-issues-21st-century-26-31-0>.
- 30 WWF. 2012. World Wildlife Fund. Una mirada a la agricultura de Colombia desde su huella hídrica. Colombia. 1-40 pp. <https://wwfeu.awsassets.panda.org/downloads/anexo-1-v2.pdf>.





Estimación de la huella hídrica agrícola del DR 011, alto río Lerma

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

Article/Issue Information
Date received: 01 June 2024
Date accepted: 01 August 2024
Publication date: 01 October 2024
Publication date: Aug-Sep 2024
Volume: 15
Issue: 6
Electronic Location Identifier: e3319
DOI: 10.29312/remexca.v15i6.3319

Categories

Subject: Artículo

Palabras clave:

Palabras clave:

agua virtual
eficiencia
escasez hídrica

Counts

Figures: 5
Tables: 4
Equations: 6
References: 30
Pages: 0