

**Huella hídrica de un producto industrial: una
metodología adaptada**
**Water footprint of an industrial product: An adapted
methodology**

Ismael Arroyo¹

Gemma Cervantes²

¹Universidad de Guanajuato, Guanajuato, Guanajuato,
i.arroyotena@ugto.mx

² Universidad De La Salle Bajío, Guanajuato, Guanajuato,
gemma.cervantes@gmail.com

Autor para correspondencia: Gemma Cervantes Torre-Marín,
gemma.cervantes@gmail.com

Resumen

La huella hídrica (HH) se define como un indicador de la apropiación de recursos hídricos y su efecto antropogénico. Existen dos metodologías para su cálculo, la primera es la descrita por la Water Footprint Network (WFN) y es referida para procesos, productos, consumidores, naciones y empresas. La segunda se basa en el análisis del ciclo de vida (ACV) enfocado al uso de agua a lo largo de la elaboración de un producto (Norma ISO-14046). Dado que la HH es un concepto reciente, las metodologías existentes no cubren ciertos aspectos de cálculo de HH para casos específicos. Por ejemplo, no se cuenta con una metodología explicada para el cálculo de la HH de un producto industrial tomando en cuenta el tipo de empresa (número de empleados y volumen de producción), y las tecnologías disponibles pertenecientes a una región geográfica delimitada.

El objetivo de este trabajo se centra en establecer una metodología para el cálculo de la HH de un producto industrial que tenga en cuenta características referentes al contexto; por tanto, se describe una

metodología detallada aplicable para un producto industrial procesado, teniendo en cuenta el tipo de empresa (número de empleados y volumen de producción), así como las tecnologías disponibles pertenecientes a una región geográfica delimitada, incluyendo aspectos del enfoque del ACV y de la WFN. La metodología descrita se aplicó en el estado de Guanajuato, al proceso de industrialización de la piel bovina curtida al cromo, con base en datos recopilados en un estudio de campo, calculando el tamaño de las empresas evaluadas, su índice de producción y la HH azul del proceso industrial. Lo anterior resultó en una HH azul del proceso de 11.29 m³ de agua azul utilizada por tonelada de piel curtida, siendo el subproceso de ribera el que más aporta a la HH con 6.7 m³/ton, y en cuanto al tipo de empresa, aquellas que son de categoría grande, representan el consumo más elevado del sector con 4.31 m³/ton.

La comparación con estimados mundiales muestra que, para los subprocesos de ribera y curtido, la industria de curtido del estado de Guanajuato trabaja con estándares de alta eficiencia en uso de agua, mientras que el subproceso de acabado presenta estándares de baja eficiencia.

Palabras clave: huella hídrica, análisis del ciclo de vida, metodología y producto.

Abstract

The water footprint (WF) is defined as an indicator for the appropriation of fresh water resources and its anthropogenic effect. There are two methodologies for the calculation of the WF. The first is described by the Water Footprint Network (WFN) and it is applied to processes, products, consumers, countries and companies. The second is based on life-cycle assessment (LCA) perspective (NOM ISO-14046) and it is focused on the use of water throughout the development of a product. Since WF is a recent concept, existing methodologies do not cover certain aspects of calculation for specific cases. For instance, there is not yet an explained methodology for WF calculation of an industrial product that considers the type of the enterprise (number of employees and production volume) and available technologies within a defined geographical region. The aim of this work focuses on having a methodology for calculating the WF of an industrial product related to the context. Therefore, this paper describes a detailed methodology applicable for an industrial

product processed within a defined geographical region, considering the type of the enterprise (number of employees and production volume) and available technologies combining aspects from the LCA approach and from the WFN methodology. The described methodology was applied to the industrialization process of chrome-tanned bovine leather in the state of Guanajuato based on data collected in a field study. It was calculated the size of the enterprises, their production index and the blue WF of the industrial process. Results show a process blue WF of 11.29 m³ of blue water used per ton of tanned leather. The soaking sub-process is the one that contributes the most to the WF with 6.7 m³/ton. Regarding the type of enterprise, the large enterprises represent the highest consumption in the sector with 4.31 m³ per ton. Comparison with world estimates shows that for soaking and tannery subprocesses, the tanning industry of the state of Guanajuato works with high efficiency water use standards, while finishing sub-process presents low efficiency standards in terms of water use.

Keywords: Water footprint, life-cycle assessment, methodology, product.

Recibido: 31/10/2016

Aceptado: 02/05/2018

Introducción

Para mejorar y lograr un mayor entendimiento del uso y consumo de agua a lo largo del proceso de elaboración de un producto, es necesario contar con herramientas que permitan una gestión adecuada de los recursos hídricos. La huella hídrica (HH) considera el uso del agua a lo largo de las cadenas de suministro y ha cobrado interés después de la introducción de dicho concepto por Hoekstra en 2002. Es un indicador multidimensional, que muestra los volúmenes de consumo de agua por fuentes y por contaminación, cuyos componentes de huella hídrica total pueden ser especificados geográfica y temporalmente (Hoekstra, Chapagain, Aldaya, & Mekonnen, 2011). En particular, la HH de los productos industrializados considera el uso, consumo y contaminación

de agua a lo largo de los subprocesos y subproductos requeridos para su elaboración. Se refiere a la fracción de recursos hídricos que son destinados para llegar hasta la obtención de un producto final. Lo anterior hace ver que la HH de los productos industriales, y por tanto, del sector industrial, es mucho mayor que si sólo es considerada la parte del proceso de manufactura en sí.

Existen dos metodologías para el cálculo de la HH. La descrita por la Water Footprint Network (WFN) aplicada para procesos, productos, consumidores, naciones y empresas; así como la metodología basada en el enfoque del análisis del ciclo de vida (ACV), la cual se plasma en la Norma ISO-14046 (2014).

Según la WFN, la HH total se compone por: HH azul, que refiere el consumo de los recursos hídricos azules (agua dulce), superficial o subterránea, en toda la cadena de producción de un producto. HH gris, se refiere a la contaminación, y está definida como el volumen de agua dulce que requerido para asimilar una carga de contaminantes dadas las concentraciones naturales y estándares ambientales de calidad de agua. HH verde, indica el consumo de recursos de agua verdes (agua de lluvia que no se convierte en escorrentía, sino que se incorpora en productos agrícolas).

La HH es un concepto que cada día cobra mayor aceptación y que ha demostrado ser de gran utilidad para el sector público y privado. De los estudios publicados con relación la HH se encuentran investigaciones en términos globales para productos provenientes de la crianza de animales, como el de Mekonnen y Hoekstra (2012), en el que se efectúa un análisis y comparación de la HH de productos como carne, huevo, leche, etc.; HH de naciones, específicas como el caso de una matriz insumo-producto, elaborada en términos de agua para China (Zhao, Chen, & Yang, 2009); el intercambio de agua analizado entre las regiones propias del Reino Unido, evaluando las HH internas, como externas, de cada una estas regiones (Yu, Hubacek, Feng, & Guan, 2010), o un estudio de la HH nacional agrícola de Colombia (Arévalo, Lozano, & Sabogal, 2011). Existen estudios de HH de regiones o cuencas, como el expuesto por Alday, Martínez-Santos, & Llamas, (2010), en el que se analizan políticas públicas con base en la HH de los productos agrícolas en la región de la Mancha Occidental en España. La HH de productos agrícolas con altos requerimientos hídricos como los endulzantes y el etanol que se obtiene de la caña de azúcar (Gerbens-Leenes & Hoekstra, 2009); la producción de algodón y sus implicaciones a nivel global en el consumo de los recursos hídricos (Chapagain,

Hoekstra, Savenije, & Gautam, 2006). De igual forma, se encuentran estudios de HH de empresas específicas como el caso de la cervecera SabMiller en el Reino Unido, el cual evalúa los requerimientos de agua a lo largo del proceso de fabricación, con el objetivo de tener una mayor eficiencia de consumo hídrico (SabMiller, Plc, WWF-UK, 2010). La HH también puede vincular el uso eficiente del agua, así como los planes y programas de estímulo económico para el consumo y la protección de los recursos hídricos. Es un indicador útil para lograr dicho objetivo, principalmente, desde el punto de vista del consumo (Velázquez, Madrid, & Beltrán, 2010), involucrando el uso directo e indirecto de agua de un producto o proceso (Aldaya *et al.*, 2010).

De las metodologías mencionadas, la de la WFN se centra en el intercambio de agua virtual entre regiones y naciones, o en la HH que generan los productos agrícolas. Por otra parte, el cálculo de HH basado en el enfoque de ACV deja de lado conceptos importantes para el análisis de HH descritos por la WFN, que han demostrado ser de gran utilidad, como el diferenciar la HH en HH azul, HH verde, HH gris, HH interna, HH externa, HH directa y HH indirecta. Aún no se cuenta con una metodología de cálculo de la HH para un producto industrial procesado en una región definida, diferenciando tipos de empresa (número de empleados y volumen de producción), y tecnologías disponibles. Por lo cual es necesario plantear una metodología para dicho caso que considere un análisis integral de HH que contemple las diferencias en cuanto a los requerimientos hídricos que existen en la elaboración de un producto, tomando en cuenta el tipo de empresa, y las tecnologías disponibles, perteneciente a una región geográfica delimitada.

El objetivo de este trabajo se centra en disponer de una metodología para el cálculo de la HH, de un producto industrial que tenga en cuenta características referentes al contexto; del mismo modo, se propone una metodología adaptada que incorpora aspectos de metodologías validadas, pero específicas para el cálculo de la HH de un producto considerando la problemática ya mencionada, incluyendo tipo de empresa y las tecnologías disponibles pertenecientes a una región geográfica delimitada. El desarrollo de dicha metodología permitirá contar con una herramienta de cálculo de la HH que en su aplicación aportará beneficios con respecto al uso y consumo de agua dentro del sector industrial.

La metodología descrita se elaboró tomando en cuenta las limitaciones que surgieron al calcular la HH para una tonelada de cuero bovino

curtido al cromo, en el estado de Guanajuato; sin embargo, pretende que su aplicación sea válida para cualquier producto industrial, considerando las características mencionadas.

Se calculó la HH del proceso industrial para una tonelada de piel curtida al cromo, aplicable al estado de Guanajuato, México, empleando la metodología adaptada para dicho producto industrial.

Metodología

Para la adaptación metodológica de cálculo de la HH de un producto industrial se acoplaron elementos de las dos metodologías aprobadas internacionalmente para tal fin. La metodología descrita en el *Water Footprint Assessment Manual: Setting the Global Standard*, el cual provee una guía entendible de métodos para la evaluación de la HH, y aspectos que se establecen en la norma ISO-14046-2014 que contiene los principios, requerimientos y lineamientos para el cálculo de la HH basado en el Análisis del Ciclo de Vida (ACV). Partiendo de dichas metodologías se adaptaron factores específicos como región geográfica, tipo de empresa según consideraciones de la Secretaría de Economía (2009) (número de empleados y volumen de producción), y tecnología de proceso.

La metodología de cálculo de la HH de un producto industrial requirió considerar el cálculo de la HH de todas las entradas de materia prima relacionadas al producto, desde la parte inicial de la cadena de suministro, así como de los procesos en los cuales se involucra de alguna manera agua para la conversión final. Se realizó la evaluación de la HH en distintas etapas para una mejor comprensión y análisis. Se diferenció de esta manera la HH del proceso industrial, como HH directa y la HH de los insumos y procesos previos como la HH indirecta. La HH total acopla ambas para la obtención de un solo cálculo global.

Para la delimitación del sistema se propuso la evaluación de la HH del proceso de industrialización de una tonelada de piel curtida al cromo aplicable en el estado de Guanajuato. El sistema se delimitó de forma que comprendiera el uso, consumo y contaminación de agua dentro de diferentes tipos de empresas dedicadas al procesamiento de curtido de piel

bovina al cromo asentadas en el estado de Guanajuato, México. El proceso de curtido se tomó en cuenta desde la recepción de materia prima, hasta la salida de una tonelada de piel bovina curtida al cromo, pasando por los subprocesos identificados como ribera, curtido y acabado.

La recopilación de datos se obtuvo con base en visitas a empresas dedicadas al curtido de piel bovina, en el estado de Guanajuato, poniendo especial atención en el uso y consumo de agua, tanto dentro del proceso, como en la cadena de producción para la piel curtida. Se visitaron empresas del sector de manera que los datos recabados se integraran en un estudio representativo de la HH del proceso industrial. Se tomaron en cuenta empresas pequeñas, medianas y grandes, ya sea que se dedicaran a una o más etapas del proceso general de curtido de piel bovina al cromo (ribera, curtido y/o acabado), y también se completaron datos que pudieran suponer un proceso completo para cada tipo de empresa. Por lo anterior, se recolectaron datos que permitieron completar adecuadamente el cálculo y la siguiente información por visita: número de empleado; etapas del proceso que se llevan a cabo; volumen de agua usada para el proceso industrial; procedencia del agua; volumen total del efluente; cantidad de producción; peso promedio de la piel a la entrada y salida del proceso; porcentaje de humedad de la piel a la entrada y la salida; volumen de reutilización de agua; volumen de agua tratada, caracterización del efluente y volumen de agua utilizada en los distintos subprocesos (ribera, curtido y acabado). De igual forma se gestionó información general que permitiera una visión más amplia y completa del uso del agua dentro del sector con instancias relacionadas directa o indirectamente con el proceso de curtido y el empleo de agua dentro del mismo. Tal fue el caso de la Cámara de la Industria de la Curtiduría (CICUR), del Sistema de Agua Potable y Alcantarillado de León (SAPAL), del Centro de Innovación Avanzada en Tecnologías Competitivas (CIATEC), e instancias gestoras de residuos procedentes de la industria de la curtiduría.

Para el cálculo de la HH azul del proceso de curtido al cromo para una tonelada de piel bovina se aplicaron las ecuaciones propuestas dentro de la metodología adaptada.

Resultados

Se presentan los resultados de la metodología desarrollada para calcular la HH de un producto industrial, considerando el tipo de empresa y tecnologías disponibles en una región geográfica delimitada.

Cálculo de la HH del proceso industrial

Los resultados para la delimitación del sistema comprenden desde la recepción de insumos, hasta la obtención de una unidad de producto, aplicable en una región determinada.

Como parte de los elementos a acoplar para la metodología se diferenciaron los distintos tipos de empresas dedicadas al procesamiento industrial de manufactura, determinando su nivel de impacto sobre la HH general del proceso en la región estudiada. Dicha diferenciación consideró el tipo de empresa y la tecnología utilizada, asumiendo que los procesos industriales varían de acuerdo con el tipo de empresa, y por ende, también los patrones de uso y consumo de agua.

Se dividió la HH del proceso industrial en sus componentes azul, verde y gris ecuación (1.1).

$$HH_{proceso} = HH_{proceso_{azul}} + HH_{proceso_{verde}} + HH_{proceso_{gris}} \quad (1.1)$$

Para determinar el tipo de empresa se calculó el puntaje de la misma (P_{emp}), el cual es igual al 10% del total de trabajadores (Tt) de la empresa, más el 90% de ventas anuales (Va) de la empresa (ecuación (1.2)); y debe ser menor o igual al tope máximo combinado de acuerdo con la Secretaría de Economía (2009), de cada clasificación (micro, pequeña, mediana y grande).

$$P_{emp} = (0.1 * Tt) + (0.9 * Va) \quad (1.2)$$

Para la determinación del índice de impacto para cada tipo de empresa se aplicó la ecuación (1.3).

$$ii_e = \frac{P_e}{P_T} \quad (1.3)$$

Donde ii_e es el índice de impacto para cada uno de los tipos de empresas evaluadas, P_e la producción del tipo de empresa evaluada para el año reportado (ton), y P_T la producción total evaluada en la región determinada, para el año reportado. Los elementos anteriores se acoplaron como parte de una nueva consideración de impacto a la HH de un producto industrial.

Cálculo de la HH azul del proceso industrial

Para el cálculo de la HH azul de un proceso se diferencié entre el agua que se evapora y el agua que se incorpora al producto, más un volumen de agua asociada con pérdidas y que no vuelven al ciclo hidrológico, y se resta para los casos en que exista la parte del agua que es reutilizada para el mismo u otros procesos o actividades de la empresa (ecuación (2.1)).

$$HH_{\text{proceso}}_{\text{azul}} = \text{Evap}_{\text{azul}} + \text{Incorp}_{\text{azul}} + \text{Pérdidas}_{\text{azul}} - \text{Reutilizada}_{\text{azul}} \quad (2.1)$$

Donde $HH_{\text{proceso}}_{\text{azul}}$ se refiere a la HH azul del proceso evaluado; $\text{Evap}_{\text{azul}}$ al volumen de agua evaporada; $\text{Incorp}_{\text{azul}}$ a la sumatoria del volumen de agua incorporada al producto; $\text{Pérdidas}_{\text{azul}}$ se refiere al volumen de agua asociada con pérdidas por ineficiencia del proceso y $\text{Reutilizada}_{\text{azul}}$ al volumen de agua reutilizada; todo ello expresado en m^3/ton o en l/unidad .

En procesos industriales donde el volumen de agua que se pierde por evaporación es muy pequeño, de la ecuación (2.1) $\text{Evap}_{\text{azul}}$ fue despreciada. $\text{Incorp}_{\text{azul}}$ se obtuvo determinando la diferencia entre la cantidad de agua contenida en el producto terminado y la cantidad de agua contenida en los insumos requeridos para el procesamiento industrial teniendo en la ecuación (2.2) que:

$$\text{Incorp}_{\text{azul}} = \text{Incorp}_{\text{azul producto}} - (\text{Incorp}_{\text{azul insumo1}} + \text{Incorp}_{\text{azul insumo2}} + \dots + \text{Incorp}_{\text{azul insumon}}) \quad (2.2)$$

Debido a que es posible conocer el volumen del efluente de salida del proceso ($\text{Efluente}_{\text{azul}}$), así como el volumen de agua incorporada al producto, la extracción de agua azul necesaria para el procesamiento

industrial ($Extrac_{azul}$), y el agua reutilizada en el proceso ($Reutilizada_{azul}$); se calculó de la ecuación (2.1) $Pérdidas_{azul}$ por medio de la ecuación (2.3).

$$Pérdidas_{azul} = Extrac_{azul} - Efluente_{azul} - Incorp_{azul} - Reutilizada_{azul} \quad (2.3)$$

Expresadas también en términos de m^3/ton o $l/unidad$. Una vez calculadas las ecuaciones en términos de cada tipo de empresa se obtuvo la HH azul total para el proceso ($HHproceso_{azul}$), la cual está dada por la ecuación (2.4):

$$HHproceso_{azul} = \sum_A^D (HHproceso_{azul} \cdot ii_e) \quad (2.4)$$

Donde A , B , C y D se refieren a los distintos tipos de empresas según su estratificación (micro, pequeña, mediana, grande).

Cálculo de la HH verde del proceso industrial

Del mismo modo, para calcular la HH verde de un proceso se tuvo en cuenta el volumen de agua verde evaporada en el proceso más la parte incorporada al producto (ecuación 3.1).

$$HHproceso_{verde} = Evap_{verde} + Incorp_{verde} \quad (3.1)$$

Dado que la HH verde se refiere al aprovechamiento de agua de lluvia, en la mayoría de los procesos industriales este componente se igualó a cero.

Cálculo de la HH gris del proceso industrial

Para el cálculo de la huella gris del proceso ($HHproceso_{gris}$), sólo se calculó para el contaminante más crítico del proceso analizado, por lo que no se sumaron los distintos contaminantes presentes. Para ello se dividió la carga contaminante ($Q_{contamin}$), entre el resultado de restar la concentración máxima permitida en la legislación para ese contaminante

($C_{m\acute{a}x}$), menos la concentración existente de manera natural de ese contaminante en la masa de agua receptora (C_{nat}) (ecuación (4.1)).

$$HH_{proceso_{gris}} = \frac{Q_{Contam}}{C_{m\acute{a}x} - C_{nat}} \quad (4.1)$$

Para la ecuación (4.1) $C_{m\acute{a}x}$ se establece de acuerdo con los parámetros establecidos en la legislación y C_{nat} se consideró cero.

La carga contaminante (ecuación (4.2)) se calculó al restar el volumen del vertido multiplicado por la concentración del contaminante en el vertido, menos el volumen de agua extraído multiplicado por la concentración de ese contaminante, en la masa de agua original extraída. Donde Q_{Contam} se expresa en kg y $C_{m\acute{a}x}$ y C_{nat} se expresan en kg/m^3 .

$$Q_{Contam} = [(Vol_{Vertido} \cdot C_{Vertido}) - (Vol_{Extr} \cdot C_{Orig})] \quad (4.2)$$

En el caso de la HH gris, cuando se realice un tratamiento de las aguas residuales cumpliendo la normativa sobre la calidad del agua en la zona de vertido, se asumió que la HH gris del proceso es cero.

Para la ecuación (4.2) $Vol_{Vertido}$ se calculó con base en los datos de efluentes de salida para los distintos tipos de empresas evaluadas, expresado en términos de m^3 por cada tonelada de producto. Asimismo, $C_{Vertido}$ se calculó con base en los datos de la concentración del contaminante principal a la salida, para los distintos tipos de empresas evaluadas. Vol_{Extr} se refiere al agua extraída para el uso del proceso, y dado que la concentración del contaminante evaluado en el volumen de agua extraído se consideró en la mayoría de los casos como cero, esa parte de la ecuación se despreció; quedando representada la carga contaminante para cada tipo de empresa evaluada en la ecuación (4.3).

$$Q_{Contam}^e = Vol_{Vertido}^e \cdot C_{Vertido}^e \quad (4.3)$$

Por lo que Q_{Contam} para el proceso en general quedó determinado por la ecuación (4.4)

$$Q_{Contam} = \sum_A^D Q_{Contam}^e \cdot ii_e \quad (4.4)$$

Cálculo de la HH de los insumos

Para calcular la HH de un producto, al generar los insumos HH distintas, dependiendo del lugar de origen en cuestión, se realizó el cálculo de la HH de cada insumo de manera separada según su lugar de origen.

En los insumos se diferenciaron dos tipos de consumo de agua: uno directo, a través del consumo de agua del animal y del consumo efectuado en los servicios relacionados con el manejo de la explotación; y otro indirecto, a través del consumo de alimentos del animal. Lo anterior si el insumo requerido para el procesamiento industrial es de origen animal.

El contenido de huella hídrica de los animales (V_a , m³/animal), se calculó en función de los contenidos de agua virtual de los productos empleados en su alimentación (V_{alim} , m³/animal), y de los volúmenes de agua requeridos en el manejo del animal a lo largo de su vida (V_{cons} y V_{serv} , m³/animal).

Se realizó la sumatoria de la multiplicación de las toneladas ingeridas de producto por cada animal a lo largo de su crianza (T , ton/animal) por los contenidos de agua virtual de cada producto (V , m³/ton), obteniendo el contenido de HH relativo a la alimentación.

Lo anterior se evaluó para cada una de las regiones identificadas, teniendo en cuenta un promedio de la edad de sacrificio del ganado, así como el tipo y la cantidad de alimento consumido por el animal.

Para la obtención del contenido de agua virtual de un producto agrícola o ganadero procesado se partió del contenido de agua virtual del cultivo o animal del que procede. Cuando se obtuvieron dos o más productos al procesar un animal o un producto agrícola, se distribuyó el agua virtual contenida en el animal entre los distintos productos. Para ello se utilizaron los términos fracción de producto y fracción de valor. La fracción de producto (pf) de un producto es definido como las toneladas de producto obtenido (P_{prod}) por tonelada de animal P .

La fracción de valor (vf) se refiere a la relación del valor de mercado del producto evaluado (i), entre el valor de mercado de todos los productos obtenidos ($i-n$) a partir del animal o producto agrícola.

Fracción de producto (ecuación (5.3))

$$pf = \frac{P_{prod}}{P} \quad (5.3)$$

Fracción de valor (ecuación (5.4))

$$vf = \frac{v_i \times pf_i}{\sum_i^n (v_i \times pf_i)} \quad (5.4)$$

Huella Hídrica de un animal (ecuación (5.1))

$$V_a = V_{alim} + V_{cons} + V_{serv} \quad (5.1)$$

Huella Hídrica generada por la alimentación (ecuación (5.2))

$$V_{alim} = \sum_{j=producto} T_j \times V_j \quad (5.2)$$

V_{cons} se refiere al agua consumida directamente por el animal durante su crianza y V_{serv} a la cantidad de agua requerida por animal para el mantenimiento de las instalaciones durante su crianza. Al igual que para V_{alim} , dichas cantidades se evaluaron para cada región.

Donde la variable v_i es el valor del mercado (US\$/ton). Las ecuaciones (5.3 y 5.4) se calcularon para cada región identificada, de modo que la HH de una tonelada de insumo para una región específica V_{prod} se obtuvo por la ecuación (5.5).

$$V_{prod} = \left(V_{proceso} + \frac{V_a}{pf} \right) \cdot vf \quad (5.5)$$

Siendo $V_{proceso}$ (m^3/ton) el agua necesaria para procesar un insumo industrial de origen animal.

En caso de que el insumo provenga de fuentes distintas al sector agropecuario, se evaluó el agua requerida para el procesamiento de una

tonelada o un kilogramo de insumo. De forma análoga a la subetapa anterior en el índice de impacto, se evaluó el índice de participación por región al total de insumos procesados, para ello se aplicó la ecuación (5.6) para cada insumo, en cada región.

$$ip_r = \frac{P_r}{P_T} \quad (5.6)$$

Donde ip_r es el índice de participación por insumo para la región evaluada, P_r la cantidad de insumo destinado por parte de la región evaluada para el año reportado (ton), y P_T la cantidad total del insumo evaluado, destinado al proceso industrial para cada región identificada, en el año reportado.

Al evaluar las regiones propuestas de acuerdo con su índice de participación y haciendo su sumatoria, se obtuvo el agua virtual o HH para una tonelada de insumos destinados al proceso industrial en la región evaluada. ($HH_{insumos}$), representada en la ecuación (5.7).

$$HH_{insumos} = \sum_1^n (V_{prod} \cdot ip_r) \quad (5.7)$$

Donde los insumos van desde 1 hasta n , dependiendo de las distintas materias primas identificadas para la ponderación de la HH.

Cálculo de la HH total

Finalmente, para calcular la HH total se sumó la HH correspondiente a cada insumo a la HH resultante del proceso industrial (ecuación (6.1)).

$$HH_{total} = HH_{insumos} + HH_{proceso} \quad (6.1)$$

De igual forma, para un mejor análisis de la HH y para la identificación de puntos críticos de uso de agua, se desagregó la información obtenida en los pasos anteriores. Así fue posible la obtención de datos diferenciados que revelan información significativa y que deriva en un entendimiento mucho más amplio de la HH total.

Aplicación de la metodología adaptada al cálculo de la HH azul del proceso

Se aplicó la metodología adaptada, descrita en los apartados 1 al 6 al caso de estudio de la piel bovina curtida al cromo en el estado de Guanajuato. Se presentan sólo los resultados referentes a la HH azul del proceso de curtido de piel bovina al cromo. Con los datos recopilados descritos en la metodología se hicieron los cálculos de los cuales se desprendió la clasificación de las empresas evaluadas, así como el uso de agua dentro de los subprocesos que cada una de ellas lleva a cabo, mostrándose lo anterior en la Tabla 1. Para los subprocesos que no muestran datos se debió a que la empresa evaluada solamente lleva a cabo uno o dos subprocesos propios del proceso de curtido según sea el caso.

Tabla 1. Clasificación de empresas evaluadas y uso de agua en sus subprocesos (m³/ton de piel bovina procesada).

Empresa	Subprocesos Industriales (m ³ /ton)			Total (m ³ /ton)	Tipo de empresa
	Ribera	Curtido	Acabado		
A	3.9	2.4	-	6.3	Grande
B	1.97	0.9	1.06	3.93	Grande
C	8.69	3.21	-	11.9	Mediana
D	-	-	1.4	1.4	Mediana
E	-	-	4.89	4.89	Mediana
F	5.41	2.79	1.24	9.44	Grande
G	-	-	1.3	1.3	Pequeña
H	-	-	0.52	0.52	Pequeña
I	19.46	7.57	-	27.03	Pequeña

La Tabla 1 muestró la evaluación de un total de nueve empresas, tres de tipo pequeña, tres medianas y tres grandes. Aunque no en todos los casos se evaluó el proceso completo (ribera, curtido y acabado), fue

posible integrar procesos completos para cada tipo diferente de empresa como si fuera una misma, por lo que se acoplaron los estudios dependiendo al tipo de empresa perteneciente. Con lo anterior se conjuga en la Tabla 2, el uso de agua típico para una empresa pequeña, una mediana y una grande de acuerdo con el estudio de campo, así como el cálculo del índice de impacto para cada una de ellas de acuerdo con datos de la Cámara de la Industria de la Curtiduría del Estado de Guanajuato CICUR (2016).

El índice de impacto se refiere al porcentaje de producción que cada tipo de empresa tiene con respecto a la producción total en el estado de Guanajuato, es decir las pequeñas empresas participan con 10% de la producción, las empresas medianas con 28% y las empresas grandes con el 62%.

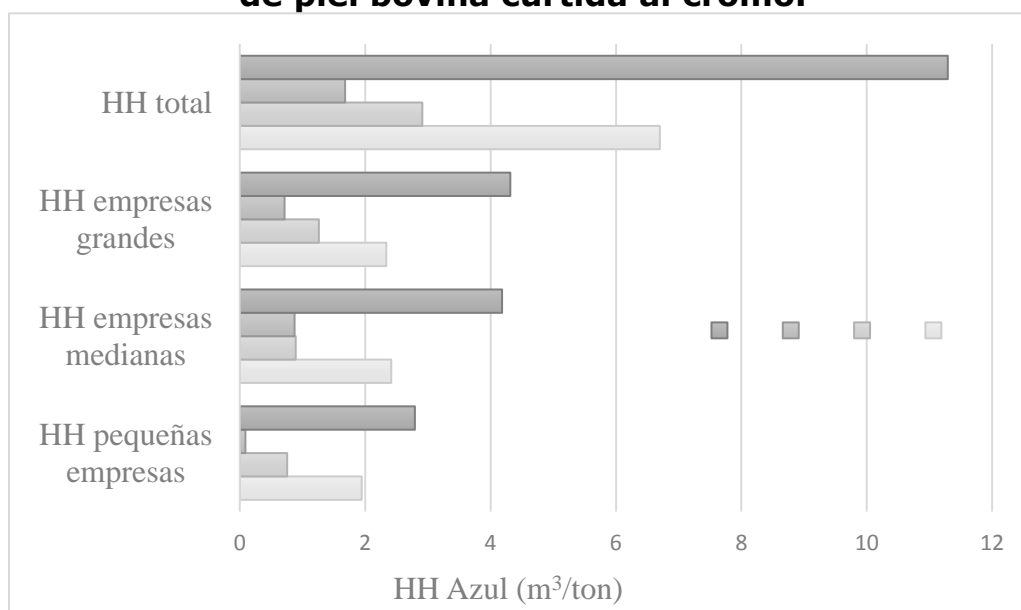
Tabla 2. Uso de agua en los diferentes tipos de empresa e índice de impacto aplicable en el estado de Guanajuato (2015).

Tipo de empresa	Subprocesos Industriales (m ³ /ton)			Total (m ³ /ton)	Índice de impacto
	Ribera	Curtido	Acabado		
Pequeña	19.46	7.57	0.91	27.94	0.1
Mediana	8.69	3.21	3.145	15.045	0.28
Grande	3.76	2.03	1.15	6.94	0.62

Aplicando la metodología descrita se calculó la HH azul incorporando los subprocesos industriales de cada tipo de empresa a una ponderación final aplicable a una tonelada de piel bovina curtida al cromo en el estado de Guanajuato. De acuerdo con dicha ponderación se estableció la HH total del proceso, dividiéndola también en los subprocesos principales (ribera, curtido y acabado). Los resultados mostrados en la Figura 1 muestran también el peso que tienen las empresas pequeñas, medianas y grandes dentro de la HH azul total del proceso. Para la HH azul del proceso se obtuvo 11.29 m³ de agua azul utilizada por tonelada de piel curtida, repartida en sus subprocesos de la siguiente manera: 6.7 m³ para los procesos de ribera; 2.91 m³ para los procesos de curtido, y 1.68 m³ para los procesos de acabado. En tanto que, habiendo tomado en cuenta el tamaño de las empresas y su participación dentro de la producción total de piel bovina curtida al cromo en el estado de Guanajuato, las empresas pequeñas contribuyen

con 2.79 m³ del total de la HH azul del proceso, las empresas medianas con 4.19 m³ y las empresas grandes con 4.31 m³.

Figura 1. Ponderación del cálculo de la HH azul de una tonelada de piel bovina curtida al cromo.



Se compararon los resultados obtenidos con datos bibliográficos. Steinfeld, Gerber, Wassenaar, Castel, Rosales, & de Haan (2009), reporta el uso de agua dentro de las operaciones de curtiembre con tecnología convencional y avanzada, con estimaciones promedio a nivel mundial. Para las operaciones comprendidas dentro del subproceso de ribera, el uso de agua oscila de 8.5 m³/ton de cuero fresco con tecnología avanzada hasta 29 m³/ton con tecnología convencional. Para el subproceso de curtido reporta de 3.5 m³/ton a 14 m³/ton y para el proceso de acabado reporta de 0 m³/ton a 2 m³/ton con tecnología avanzada y convencional respectivamente. Lo anterior, comparado con la HH azul total del proceso de curtido de la piel bovina al cromo para el estado de Guanajuato calculada en este trabajo, muestra que en general los valores resultantes del presente estudio están cercanos a los reportados para tecnologías avanzadas de alta eficiencia en el uso de agua dentro de los subprocesos de ribera y curtido, siendo el acabado, un área de mejora, ya que el valor mencionado en este presente estudio se acerca más al mostrado para tecnologías convencionales. Dicho subproceso de acabado se encuentra por encima del valor esperado

promedio, reportado en las estimaciones mundiales para los procesos típicos de curtido utilizando tecnología avanzada.

Conclusiones

Se detalló una metodología adaptada de cálculo de HH, que al ser aplicada, ayudará al sector industrial para una mejor gestión de los recursos hídricos, tanto en el proceso industrial, como a lo largo de la cadena de suministro, ya que se introdujeron aspectos importantes que influyen en la HH final de un producto, como son: el tipo de empresa (incluyendo número de empleados y volumen de producción), tecnologías disponibles para la elaboración de un producto industrial y región geográfica delimitada. Dichos aspectos no están considerados en las metodologías existentes en la bibliografía.

La metodología podrá ser utilizada por entes que pretendan conocer la HH de un producto industrial y que deseen efectuar un análisis mucho más completo al incorporar factores que intervienen para una ponderación final de la HH. Tiene la posibilidad de ser aplicada por gobiernos municipales, estatales, organismos gestores de agua, organismos del sector industrial que tengan interés común en la producción de algún producto o comercializadoras, entre otros.

Lo anterior permitió contar con una metodología de cálculo de HH que abarca a mayor detalle un sistema de producción delimitado, por lo que, al acoplarse los elementos ya mencionados, a las metodologías de cálculo existentes, se obtiene información que permite conocer datos precisos del uso, consumo y contaminación de los recursos hídricos, ya sea en el proceso industrial o a lo largo de la cadena de suministro, permitiendo un análisis que conlleve la implementación de acciones específicas para la disminución y mejora de la HH de un determinado producto.

Se observa en la HH azul de la industria del curtido para una tonelada piel curtida al cromo aplicable al estado de Guanajuato, México, al desagregar la información en los diferentes tipos de empresas, un área de mejora en el consumo de agua azul, específicamente para los subprocesos de ribera y curtido en empresas pequeñas y medianas. La

HH azul de una tonelada de piel curtida al cromo, aplicable al estado de Guanajuato, disminuye de manera considerable al aportar las empresas grandes el 62% del total del volumen de producción para el estado de Guanajuato. Se identificó a las empresas grandes como entes que disponen de tecnología y buenas prácticas dentro del proceso, que permite la reducción del uso y consumo de agua a nivel ponderado en la industria del curtido para la región especificada. Al comparar el presente estudio con estimados mundiales, se deduce que para los subprocesos de ribera y curtido, la industria de curtido del estado de Guanajuato trabaja con estándares de alta eficiencia en cuanto al uso de agua, mientras que el subproceso de acabado, presenta estándares de baja.

Es importante que las empresas transiten hacia tecnologías más limpias y buenas prácticas dentro del proceso, ya que es fundamental para una mejor eficiencia hídrica dentro del sector industrial. Al conocer el cálculo de su HH, las empresas del sector curtido pueden contar con una serie de datos cuantitativos que permiten comparar los impactos provocados a nivel social y ambiental, mejorando así, la toma de decisiones y el consumo de agua dentro del proceso.

Agradecimientos

Este proyecto fue financiado parcialmente por los proyectos: Proyecto PRODEP NPTC 2015: "Propuesta de simbiosis industrial, huella de carbono y eco-innovación para la industria de curtiduría en León (Guanajuato)" (SEP); Redes de Cuerpos Académicos-2015 (SEP) y proyecto UG institucional 2016: "Ecología Industrial y cambio tecnológico en los sectores agroalimentario y curtiduría del Estado de Guanajuato" (UG). Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT), por la beca de maestría para Ismael Arroyo Tena.

Referencias

- Aldaya, M. M., Martínez-Santos, P., & Llamas, M. R. (2010). Incorporating the water footprint and virtual water into policy: Reflections from the Mancha Occidental region, Spain. *Water Resources Management*, 24(5), 941–958. Recuperado de <http://doi.org/10.1007/s11269-009-9480-8>.
- Arévalo, D., Lozano, J. G., & Sabogal, J. (2011). Estudio nacional de Huella Hídrica Colombia Sector Agrícola. *Revista Internacional de Sostenibilidad, Tecnología y Humanismo*, 7, 103–126.

- Chapagain, A. K., Hoekstra, A. Y., Savenije, H. H. G. & Gautam, R. (2006). 'The water footprint of cotton consumption: An assessment of the impact of worldwide consumption of cotton products on the water resources in the cotton producing countries', *Ecological Economics*, 60(1), 186-203
- Gerbens-Leenes, P. W., Hoekstra, A. Y. (2009). *The water footprint of sweeteners and bio-ethanol from sugar cane, sugar beet and maize*. (Value of Water Research Report Series No. 38). Delft, Netherlands: UNESCO-IHE Institute for Water Education.
- Hoekstra, A. Y., Chapagain, A. K., Aldaya, M., & Mekonnen, M. M. (2011). *The water footprint assesment manual. Setting the global standad*. London, UK: *Earthscan*.
- ISO, International Organization for Standardization. (2014). ISO 14046 *Environmental management, Water footprint-Principles, requirements and guidelines*. ISO.
- Mekonnen, M. M., & Hoekstra, A. Y. (2012). A Global Assessment of the Water Footprint of Farm Animal Products. *Ecosystems*, 15(3), 401-415. Recuperado de <http://doi.org/10.1007/s10021-011-9517-8>.
- SABMiller, GTZ and WWF (2010) Water Futures: Working Together for a Secure Water Future, SABMiller, Woking and WWF-UK, Goldalming., <https://waterfootprint.org/media/downloads/SABMiller-GTZ-WWF-2010-WaterFutures.pdf>
- Steinfeld, H., Gerber, P., Wassenaar, T., Castel, V., Rosales, M., & de Haan, C. (2009). *La larga sombra del Ganado. Problemas ambientales y opciones*. Roma, Italia: Food and Agriculture of the United Nations.
- SE, Secretaría de Economía. (30 de Junio de 2009). Acuerdo por el que se establece la estratificación de las micro, pequeñas y medianas empresas. *Diario Oficial de la Federación*. Ley Orgánica de la Administración Pública Federal de 2009, *Diario Oficial de la Federación* § 5-16-3. Recuperado de http://dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5096849&fecha=30/06/2009.
- Velázquez, E., Madrid, C., & Beltrán, M. J. (2010). Rethinking the Concepts of Virtual Water and Water Footprint in Relation to the Production – Consumption Binomial and the Water – Energy Nexus. *Water Resources Management*, 25(2), 743-761. Recuperado de <http://doi.org/10.1007/s11269-010-9724-7>.

- Yu, Y., Hubacek, K., Feng, K., & Guan, D. (2010). Assessing regional and global water footprints for the UK. *Ecological Economics*, 69(5), 1140–1147. Recuperado de <http://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2009.12.008>.
- Zhao, X., Chen, B., & Yang, Z. F. (2009). National water footprint in an input-output framework-A case study of China 2002. *Ecological Modelling*, 220(2), 245–253. Recuperado de <http://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2008.09.016>.