



**UNIVERSIDAD
DE GUANAJUATO**

**CAMPUS GUANAJUATO
DIVISIÓN DE INGENIERÍAS
MAESTRÍA EN CIENCIAS DEL AGUA**

**CÁLCULO DE LA HUELLA HÍDRICA DE LA PIEL BOVINA
CURTIDA AL CROMO EN EL ESTADO DE GUANAJUATO**

TESIS

Para la obtención de grado de Maestro en Ciencias del Agua

Presenta

I.BQ. Ismael Arroyo Tena

Directoras

Dra. Gemma Cervantes Torre-Marín

Dra. Arodí Bernal Martínez

Guanajuato, Gto., junio 2019

Declaratoria

Por medio de la presente me responsabilizo de la autenticidad y originalidad del trabajo titulado:

Cálculo de la Huella Hídrica de la piel bovina curtida al cromo en el estado de Guanajuato

I.BQ. Ismael Arroyo Tena
Autor de la tesis

Dra. Gemma Cervantes Torre-Marín
Directora de tesis

Dra. Arodí Bernal Martínez
Directora de tesis

Miembros del honorable jurado; del examen profesional que presenta
Ismael Arroyo Tena para obtener el grado de Maestro en Ciencias del Agua.

**Cálculo de la Huella Hídrica de la piel bovina curtida al
cromo en el estado de Guanajuato**

Dr. Germán Cuevas Rodríguez
Presidente

Dra. María Guadalupe de la Rosa Álvarez
Secretaria

Dra. Dolores Elizabeth Turcott Cervantes
Vocal

Índice de Contenido

1. INTRODUCCIÓN	11
1.1 Marco de Referencia	13
1.1.1 El subsector del curtido en Guanajuato.....	13
1.1.2 Situación Hídrica en Guanajuato	15
1.1.3 La Huella Hídrica	16
1.2 Justificación	12
1.3 Hipótesis.....	13
1.4 Objetivos	13
1.4.1 Objetivo General.....	13
1.4.2 Objetivos Específicos.	13
2. METODOLOGÍA.....	14
2.1 Establecimiento de metas y alcances.....	14
2.1.1 HH por tipo de origen	15
2.1.2 HH directa e indirecta	15
2.1.3 HH interna y externa.....	15
2.2 Adaptación metodológica del cálculo de la HH.....	16
2.2.1 Cálculo de la HH de una cabeza de ganado bovino	16
2.2.2 Cálculo de la HH de la piel cruda como insumo.....	17
2.2.3 Cálculo de la HH de los insumos químicos para la industria del curtido.....	18
2.2.4 Cálculo de la HH del proceso industrial del curtido de piel bovina al cromo ..	18
2.2.5 Cálculo de la HH azul del proceso industrial del curtido de piel bovina al cromo	19
2.2.6 Cálculo de la HH verde del proceso industrial del curtido de piel bovina al cromo	20
2.2.7 Cálculo de la HH gris del proceso industrial del curtido de piel bovina al cromo	21
2.2.8 Cálculo de la HH total de una tonelada de piel bovina curtida al cromo.....	23
2.3 Recopilación de datos experimentales.....	23
3. RESULTADOS	24
3.1 Cálculo de la HH.....	24
3.1.1 Cálculo de la HH de una cabeza de ganado bovino	24
3.1.2 Cálculo de la HH de una unidad de piel cruda	27

3.1.3 Cálculo de la HH del proceso industrial del curtido de piel bovina al cromo ..	30
3.1.4 Cálculo de la HH azul del proceso industrial del curtido de piel bovina al cromo	33
3.1.5 Cálculo de la HH gris del proceso industrial del curtido de piel bovina al cromo	36
3.1.6 Cálculo de la HH total de una tonelada de piel bovina curtida al cromo.....	42
4. CONCLUSIONES.....	52
5. REFERENCIAS.....	56
6. ANEXOS	58
7. PRODUCTOS DE LA TESIS.....	63

Índice de Figuras

Figura 1.1 Sub cuenca del Río Turbio.....	8
Figura 2.1 Consideraciones para el cálculo de la HH Gris del proceso industrial de curtido bovino al cromo.....	22
Figura 3.1 Huella Hídrica de una unidad de ganado bovino.....	26
Figura 3.2 Huella Hídrica de una unidad de piel bovina cruda.....	27
Figura 3.3 Límites del sistema estudiado.....	31
Figura 3.4. Diagrama general del proceso industrial de curtido.....	32
Figura 3.5 Ponderación del cálculo de la HH Azul de una tonelada de piel bovina curtida al Cromo.....	35
Figura 3.6 Ponderación del cálculo de la HH Gris del proceso industrial de una tonelada de piel bovina curtida al cromo.....	38
Figura 3.7 Ponderación del cálculo de la HH Gris del proceso industrial de una tonelada de piel bovina curtida al cromo, posterior a la consideración de tratamiento de aguas residuales.....	39
Figura 3.8 HH del proceso industrial de una tonelada de piel bovina curtida al cromo, de acuerdo con la ponderación de los diferentes tipos de empresas en el estado de Guanajuato.....	41
Figura 3.9 HH Interna y Externa de una tonelada de piel bovina curtida al cromo en el estado de Gto.....	46
Figura 3.10 HH de una tonelada de piel bovina curtida al cromo en el estado de Gto., desagregada de acuerdo con su región de origen.....	47
Figura 3.11 HH Directa e Indirecta de una tonelada de piel bovina curtida al cromo en el estado de Gto.....	47
Figura 3.12 HH Verde, Azul y Gris de una tonelada de piel bovina curtida al cromo en el estado de Gto.....	48
Figura 3.13 HH de una tonelada de piel bovina curtida al cromo en el estado de Gto., según la ponderación de los diferentes tipos de empresas.....	48
Figura 3.14 HH Verde total de una tonelada de piel bovina curtida al cromo en el estado de Gto., según la ponderación de los diferentes tipos de empresas.....	49
Figura 3.15 HH Azul total de una tonelada de piel bovina curtida al cromo en el estado de Gto., según la ponderación de los diferentes tipos de empresas.....	50
Figura 3.16 HH Azul total de una tonelada de piel bovina curtida al cromo en el estado de Gto., según la ponderación de los diferentes tipos de empresas.....	50

Índice de Tablas

Tabla 1.1 Componentes de la HH del ganado bovino (m ³ /ton) de acuerdo con su lugar de crianza.....	26
Tabla 3.2 Componentes de la HH promedio de una unidad de ganado bovino al final de su ciclo de vida (m ³ /animal) de acuerdo con la región de crianza.....	27
Tabla 3.3 Componentes de la HH promedio del proceso de obtención de la piel cruda de ganado bovino (m ³ /tonelada) de acuerdo con la región.....	28
Tabla 3.4 Componentes de la HH promedio de la piel cruda de ganado bovino (m ³) de acuerdo con la región.....	30
Tabla 3.5 Porcentaje de HH promedio de los subproductos obtenidos a partir del ganado bovino (piel, carne de canal y vísceras) tomando en cuenta desde la siembra de piensos hasta el final del proceso de sacrificio, de acuerdo con la región.....	31
Tabla 3.6 Clasificación de empresas evaluadas y uso de agua en sus subprocesos (m ³ /ton de piel bovina procesada)	35
Tabla 3.7 Uso de agua en los diferentes tipos de empresa e índice de impacto aplicable en el estado de Guanajuato (2015).....	36
Tabla 3.8 Uso de agua en los diferentes tipos de empresa e índice de impacto aplicable en el estado de Guanajuato (2015).....	38
Tabla 3.9 HH total de una tonelada de piel bovina curtida al cromo en Guanajuato, Méx.....	41
Tabla 3.10 Comparación del presente estudio con bibliografía reportada respecto al uso del agua en la industria del curtido.....	42
Tabla 3.11 HH total de una tonelada de piel bovina curtida al cromo en el estado de Guanajuato para los distintos tipos de empresa y la totalidad del sector.....	46
Tabla 6.2 Análisis mensual de agua residual Planta de Desbaste SAPAL entrada (SAPAL, 2016).....	59
Tabla 6.2 Análisis mensual de agua residual Planta de Desbaste SAPAL salida (SAPAL, 2016).....	60
Tabla 6.3 HH promedio de cultivos relacionados a la alimentación ganadera para países seleccionados (m ³ /ton) (1996-2005). Adaptada de (Mekonnen & Hoekstra, 2010).....	61
Tabla 6.4 Componentes de la HH de una unidad de ganado bovino promedio. Adaptada de (Mekonnen & Hoekstra, 2010).....	63

Abreviaturas

ACV	Análisis del Ciclo de Vida
AV	Agua virtual
CIATEC	Centro de Innovación Avanzada en Tecnologías Competitivas
CICUR	Cámara de la Industria de la Curtiduría
Cr	Cromo
DBO	Demanda Bioquímica de Oxígeno
DQO	Demanda Química de Oxígeno
Gto.	Guanajuato
HH	Huella Hídrica
ISO	International Organization for Standardization
kg	Kilogramo
m ³	Metros cúbicos
SAPAL	Sistema de Agua Potable y Alcantarillado de León
SST	Sólidos Suspendidos Totales
ton	Toneladas
WFN	Water Footprint Network

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, perteneciente a una región geográfica delimitada.

El objetivo del trabajo se centra en disponer de una metodología para el cálculo de la HH de una tonelada de piel bovina curtida al cromo aplicable al estado de Guanajuato, Méx. Por tanto, se desarrolla una metodología de cálculo detallada aplicable para dicho producto industrial procesado, teniendo en cuenta el tipo de empresa (número de empleados y volumen de producción) y las tecnologías disponibles, perteneciente a una región geográfica delimitada, incluyendo aspectos del enfoque del ACV y de la WFN. La metodología descrita se aplicó al proceso de industrialización de la piel bovina curtida al cromo en el estado de Guanajuato con base en datos recopilados en un estudio de campo, calculando el tamaño de las empresas evaluadas, su índice de producción y las HH azul y gris del proceso industrial. También se dispuso de datos reportados en bibliografía y bases de datos para completar el cálculo de la HH de un sistema que fue delimitado desde la obtención de piensos para el ganado hasta una tonelada de piel bovina curtida al cromo al término del proceso de industrialización. Lo anterior resultó en una HH total de 12,025.68 m³ de HH por tonelada de piel curtida, siendo dividida en HH Interna la cual representa 9% del total y HH Externa la cual representa el restante 91%. Al desagregarla en HH directa (HH del proceso industrial) esta representa 7% del total, mientras que la HH indirecta (HH de la cadena de suministro) representa el restante 93%. La HH Verde representa el 85%, mientras que la HH gris representa el 11% y la HH azul tan solo el 4%. Al valorar la participación por tipo de empresa en la HH total se tiene que las empresas grandes representan 58% de la HH, las empresas medianas el 30% y las empresas micro y pequeñas el 12%.

Se observa una buena eficiencia de uso de agua y baja contaminación de efluentes para empresas grandes, mientras que para las empresas chicas se observa una baja eficiencia de uso de agua y una HH gris muy alta en comparación con porcentaje de volumen de producción dentro de la industria del curtido en el estado de Gto. También se observa que la mayor parte de la HH del sistema

corresponde a la HH verde (referente al agua de lluvia), lo anterior debido a los grandes requerimientos hídricos que se presentan a lo largo de la cadena de producción, principalmente los referentes a los alimentos del ganado bovino. Asimismo, se observa que la mayor parte de la HH se genera fuera del estado de Guanajuato (91% de la HH)

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 del 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 y la cadena de suministro.

ABSTRACT

The water footprint (WF) of a product is defined as an indicator of the appropriation of freshwater resources and its anthropogenic effect, whether it is measured directly or indirectly along their production chain. There are two methodologies for the calculation of the WF, the first one is described by the Water Footprint Network (WFN) and the second based on the life cycle assessment (LCA) of a product, established in the international standard NOM-ISO-14046. Since WF is a recent concept, the existing methodologies do not cover certain aspects of calculation for specific cases that could be helpful for a later analysis that serves as a management tool for water resources. 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 present study describes a detailed methodology applicable for one ton of chrome tanned bovine leather in the state of Guanajuato, Mex. Therefore, a detailed calculation methodology applicable to said processed industrial product is developed 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 methodology described was applied to the process of industrialization of a ton of bovine chrome tanned leather in Guanajuato state using data collected in a field study, calculating the size of the companies evaluated, their production index and the blue and gray WF of the industrial process. Data reported in bibliography and databases were also used to complete the calculation of the WF of a system that was delimited from livestock feed to one ton of chrome-tanned bovine leather at the end of the industrialization process. That resulted in a total WF of 12,025.68 m³ per ton of tanned leather, being separated into Internal WF which represents 9% of the total WF and External WF which represents the remaining 91%. When disaggregated in direct WF (WF of the industrial process) it represents 7% of the total, while the indirect WF (WF of the supply chain) represents the remaining 93%. Green WF represents 85%, while gray WF represents 11% and blue WF represents only 4%. When valuing by type of company the corresponding weight into the total Wf it shows that the large companies represent 58% of the WF, the medium sized companies 30% and the micro and small companies 12%.

A good efficiency of water use and low contamination of effluents for large companies is observed, while for small companies it is observed a low efficiency of water use and a very high grey WF comparing with the percentage of production volume within the tanning industry in the state of

Gto. It is also observed that most of the WF of the delimited system corresponds to the green WF (referred to rainwater), due to the large water requirements that occur along the production chain, mainly those referring to the cattle feed. Also, it is observed that most of the HH is generated outside the state of Guanajuato (91% of the total WF)

It is important for companies to move towards cleaner technologies and good practices within the process, since it is essential for a better water efficiency within the industrial sector. By having the calculation of their WF, companies within the tanning sector can rely on quantitative data to compare the impacts caused at a social and environmental level, thus improving decision making and water consumption within the process and the supply chain.

1. INTRODUCCIÓN

El Estado de Guanajuato se localiza en la parte central de la República Mexicana con una superficie que representa el 1.5% del territorio nacional; cubre parcialmente tres cuencas: Lerma-Chapala, Pánuco y Santiago. Por su ubicación en el Estado predominan los climas semicálidos y secos. La precipitación promedio es de 696 mm, concentrándose en los meses de junio a septiembre. La región Lerma-Santiago, comprende cerca del 83% del territorio estatal y contribuye con más del 90% del volumen de agua total, siendo esta región donde las actividades económicas y asentamientos humanos más importantes del estado se concentran (Centro del Tercer Mundo para el Manejo del Agua A.C., 2001).

La subregión Lerma-Guanajuato representa el 43% del territorio de la cuenca Lerma-Chapala, ocupando el primer lugar en superficie dentro de la cuenca. En esta subregión los municipios más importantes dentro del estado de Guanajuato son: Guanajuato, Salamanca, Celaya, Irapuato y León, la cabecera municipal de este último albergando, en 2005, a más de un millón de habitantes (IMTA, SEMARNAT, 2009).

En el Estado de Guanajuato, el curtido de pieles está posicionado como un pilar de la economía estatal. Más del 70% de la piel curtida en México se produce en la ciudad de León Gto., y sus dos ciudades circunvecinas (San Francisco y Purísima del Rincón) (Pacheco Vega, 2004), y actualmente la industria de la curtiduría es la más importante en la ciudad de León, generando el 86% del PIB local (Carrillo González, et al. 2017). La industria del cuero-calzado en México es considerada una de las más importantes a nivel industrial, según datos del INEGI (Instituto Nacional de Estadística y Geografía), este sector participa con el 0.22% del Producto Interno Bruto (PIB) nacional, con 1% del PIB manufacturero (Vidaurre Ramírez & Morgan, 2011).

El curtido al cromo es el método más utilizado en Guanajuato, alrededor del 80% de las industrias curtidoras lo usan. El agua residual de baños de curtido al cromo generalmente no se recupera, estos efluentes presentan alta concentración de cromo (3 y hasta 10 g/l) así como componentes desengrasantes, aminos, cloruros, sulfuros y sodio, resultando de estos en efluentes altamente contaminados (Alvarez, et al. 2004). El agua residual generada en este tipo de industrias es vertida en la mayoría de los casos sin tratamiento previo a la red de aguas municipales de la ciudad. Posteriormente estos efluentes se mezclan junto con los residuos de otras empresas para finalmente unirse al Río Turbio contribuyendo a la contaminación (Comisión Estatal del Agua, 2014).

La principal fuente de abastecimiento del municipio de León es el agua proveniente del

acuífero del Valle de León. La estabilidad de este acuífero se encuentra en riesgo debido a la sobreexplotación, contaminación y mal uso. Además, la extracción de agua en el acuífero es mayor a la recarga proveniente del agua de las lluvias anuales (Instituto Municipal de Planeación León, 2013).

Específicamente la industria de la curtiduría ha ocasionado el deterioro del recurso hídrico. La falta de normatividad y la poca capacitación del personal y la falta de apoyos financieros a las curtiembres del municipio de León, aunado a la carencia de equipamiento adecuado para el tratamiento de aguas residuales entre otros residuos sólidos, ha ocasionado una fuerte contaminación de los arroyos que cruzan la ciudad. Si bien actualmente se han implementado ciertas medidas de regularización, es necesario establecer un sistema de monitoreo y evaluación eficiente, a fin de verificar el seguimiento y efectividad de dichas medidas (Instituto Municipal de Planeación León, 2013).

Una herramienta de reciente creación y que ha comprobado ser útil y efectiva para la evaluación y análisis de los recursos hídricos utilizados a lo largo de las cadenas de suministro es la “Huella Hídrica” (HH), introducida por A. Hoekstra en 2002. La HH considera el uso de los recursos de agua dulce y se conforma de 4 componentes básicos: volumen, color/clasificación del agua, lugar de origen del agua y momento de extracción del agua. Identificar estos datos da la base para el análisis de la huella hídrica, que además debe tomar en cuenta factores locales para dar un contexto real y útil al concepto; es decir, evaluar los impactos en tiempo y espacio de la extracción del agua y su retorno como agua residual o tratada, la afectación al régimen hidrológico, la importancia ecológica de la zona, la productividad del agua, las condiciones de escasez o estrés hídrico imperantes, los usos locales del agua y el acceso de la población al recurso, impactos en la cuenca baja y otros criterios que puedan incidir en el mantenimiento de un balance sustentable y equitativo del agua en cada cuenca hidrológica (AgroDer, 2012). Pretende, a su vez, ser una herramienta de planeación del manejo del recurso hídrico, que al añadirse al resto de indicadores que ya existen, brinda una visión más integral del impacto que tiene la población humana en el ambiente y en los ecosistemas. Como elemento en el diseño de planes, políticas, programas y proyectos en todos los niveles, sustenta la toma de decisiones de una manera más acorde con las necesidades actuales en distintas regiones. (AgroDer, 2012).

A pesar de que la HH se ha posicionado como un concepto de gran aceptación y que ha demostrado ser de gran utilidad para el sector público y privado, a la fecha no se cuenta con estudios de HH referentes a productos industriales procesados dentro de una pequeña región geográfica, ya que los reportes de HH de productos industriales existentes se refieren a estimaciones de nivel global o multinacional, o delimitados a una sola empresa, en su mayoría del sector alimenticio. A la fecha no

se cuenta con estudios de cálculo de huella hídrica a nivel industrial aplicado a un producto procesado en una región delimitada.

El presente trabajo desarrolla una metodología adaptada para el cálculo de la HH aplicable a una tonelada de cuero curtido al cromo en el estado de Guanajuato, Méx. De igual forma presenta los resultados del cálculo y los desglosa para un mejor análisis de la HH del sector del curtido en el estado de Guanajuato.

1.1 Marco de Referencia

1.1.1 El subsector del curtido en Guanajuato

De forma general la curtiduría es un proceso industrial que pretende estabilizar las propiedades de la piel del animal sin que sufra cambios naturales de descomposición o putrefacción. Para ello se utilizan materiales de origen vegetal (curtido vegetal) o sales inorgánicas, especialmente sales de cromo (curtido al cromo). Aproximadamente del 80 al 90% de la producción mundial de cuero curtido utiliza sales de cromo trivalente para su procesamiento industrial (Vašková & Kolomazník, 2016).

El curtido con cromo ofrece beneficios en cuanto a la calidad, durabilidad y costos del cuero curtido, pero por otro lado también genera un impacto ambiental negativo, especialmente en cantidad de residuos sólidos y calidad de aguas residuales de descarga.

El Cromo (Cr) es un elemento metálico presente de forma natural en el ambiente. Compuestos de Cr también se pueden presentar en el ambiente debido a la actividad humana como productos secundarios de procesos industriales como la metalurgia, textiles y el curtido de cuero, contaminando principalmente a través del aire y de las descargas de agua residuales (Reyes-Gutiérrez, et al. 2009).

Los dos estados más comunes de oxidación del cromo son el cromo trivalente (CrIII), principalmente benéfico dado que es un elemento biogénico esencial en el metabolismo humano, y el cromo hexavalente (CrVI), el cual representa un riesgo para la salud humana ya que sus compuestos tienen efectos mutagénicos y son clasificados como carcinógenos (Vašková & Kolomazník, 2016).

La industria del cuero-calzado en México es considerada una de las más importantes a nivel industrial, según datos del INEGI (Instituto Nacional de Estadística y Geografía), este sector participa con el 0.22% del Producto Interno Bruto (PIB) nacional, con 1% del PIB manufacturero (Vidaurre Ramírez & Morgan, 2011). Acorde al Directorio Estadístico Nacional de Unidades Económicas (DENUE) (INEGI, 2015), Guanajuato es el estado en el que se presenta mayor concentración de Unidades económicas pertenecientes al “curtido y acabado de cuero y piel” con un 75.7%, y de estas, más del 90% están asentadas en el municipio de León. Acorde a la Cámara de la Industria de la Curtiduría del

Estado de Guanajuato (CICUR) (Guevara, 2016), León participa con el 60% de la producción nacional del cuero. La producción anual de pieles de bovino para el estado de Guanajuato es de 7.5 millones de unidades procesadas (Instituto de Planeación Estadística y Geográfica Guanajuato, s.f.). El curtido al cromo es el método más utilizado en la industria, abarcando aproximadamente 80% de la producción total en el estado de Guanajuato, el resto se curte con taninos vegetales (Álvarez-Castañón, 2014).

El uso y consumo de agua dentro de estos procesos es variado dependiendo del procedimiento para producir los diferentes productos de piel, generalmente los procesos típicos de curtido utilizan grandes volúmenes de agua, se estima que alrededor de 10.5 a 45 m³ por tonelada de piel curtida (Ilou, *et al.* 2012). El proceso industrial del curtido de piel se realiza generalmente en tres etapas distintas; ribera, curtido y acabado o re curtido, teñido y engrase (RTE). Siendo la etapa de ribera la de mayor consumo de agua, ya que incluye las subetapas húmedas del proceso, como son: remojo, pelambre y descarne. Y la etapa de curtido la que genera mayor cantidad de contaminantes a los efluentes, ya que contiene las subetapas de desencalado, piquelado y curtido, las cuales utilizan diversos productos químicos que provocan altas concentraciones de DQO, sólidos suspendidos, cromo y sulfuros (UNIDO, 2011), por lo que el proceso industrial de curtido representa un problema de impacto ambiental que requiere ser disminuido. El impacto ambiental provocado por las empresas curtidoras en Guanajuato se ha visto magnificado por los largos periodos en los cuales el manejo de los desechos ha sido inadecuado; el establecimiento de sistemas de control de la contaminación que se ha visto obstaculizado por las condiciones sociales y económicas que han prevalecido, y el consumo hídrico que es significativo (Álvarez-Castañón, 2014).

Una etapa importante para la obtención de la piel curtida al cromo es la que se da en los rastros o mataderos, pues de ahí se obtiene el insumo principal que es la piel cruda. Los establecimientos que realizan la matanza de animales de abasto generan en las diferentes etapas del proceso de obtención de piel y carne, un importante volumen de aguas residuales que son vertidas directamente a cuerpos de agua o al drenaje municipal, recibiendo tratamiento posterior un pequeño porcentaje de las aguas vertidas (Signorini, 2008).

Las principales fuentes de residuos líquidos en los mataderos son las aguas de lavado y las corrientes provenientes de los procesos de desangrado y evisceración. Estas aportan gran cantidad de carga orgánica, conteniendo: sangre, estiércol, pelos, plumas, grasas, huesos y otros contaminantes solubles. En general, los efluentes de los rastros tienen altas temperaturas y contienen microorganismos patógenos, además de altas concentraciones de compuestos orgánicos y nitrógeno; siendo la sangre el principal contaminante. Las proteínas y grasas son el principal componente de la carga orgánica presente en las aguas residuales de los rastros y mataderos, encontrándose otras

sustancias como heparina y sales biliares. También contienen hidratos de carbono como glucosa y celulosa y, generalmente, detergentes y desinfectantes (Castillo Borges, *et al.* 2012).

1.1.2 Situación Hídrica en Guanajuato

El estado de Guanajuato, caracterizado por abastecerse históricamente por fuentes subterráneas de agua, atraviesa por problemas de estrés hídrico. Actualmente el estado cuenta con 14,806 pozos activos, de los cuales 84% son para uso agrícola, 13% para uso en abastecimiento público y 3% para uso en la industria autoabastecida. En agua subterránea se extraen 3,824 millones de metros cúbicos anuales y la recarga es de 2,783 millones de metros cúbicos, que implica un déficit de 1,041 millones de metros cúbicos anuales (Comisión Estatal del Agua, 2004).

Guanajuato se sitúa en la región hidrológica más grande del país, la cuenca Lerma-Santiago, que concentra la mayoría de las actividades económicas. Cinco estados pertenecen a la cuenca Lerma-Santiago (Guanajuato, Michoacán, Jalisco, Estado de México y Querétaro), de los cuales, Guanajuato ocupa la mayor extensión de esta con un 43.75%. Dicha cuenca cuenta con 15 millones de habitantes, lo cual representa el 16% de la población nacional. El 97% de la población del estado de Guanajuato se encuentra asentada en esta cuenca y el 78% del territorio del estado pertenece a ella, abarcando para el municipio de León la totalidad de sus habitantes y territorio (Comisión Estatal del Agua, 2016).

A lo largo de su historia la ciudad de León se ha mantenido expuesta a problemáticas relativas al agua, sufriendo periodos de graves sequías, además de una escasez cada vez más acentuada del recurso en el subsuelo aunado a que es un municipio que cuenta con muy pocos cuerpos de agua superficiales (SAPAL, 2009). La mayoría de las descargas de agua de la ciudad de León fluyen a través de la subcuenca del Río Turbio, una de las 19 que integran la cuenca Lerma-Santiago. Se encuentra conformada por los municipios de Abasolo, Cuerámara, Manuel Doblado, León, Pénjamo, Purísima del Rincón, Romita y San Francisco del Rincón (Comisión de Cuenca del Río Turbio, s.f.), de los cuales el municipio de León es el que se encuentra ubicado en la parte alta de cuenca (figura 1.1), por lo que resulta de importancia identificar, estudiar y analizar las descargas que fluyen a través de dicha subcuenca.



FIGURA 1.1 Cuenca Lerma Chapala Subregión Guanajuato,
FUENTE (IMTA, SEMARNAT, 2009)

Es necesario un mejor entendimiento de los impactos relacionados con el agua, como base de una mejora en la gestión del agua en niveles locales, regionales, nacionales y globales (AgroDer, 2012). Sin embargo, es conveniente contar con técnicas de análisis que sean usadas y aprobadas internacionalmente. Una de ellas, de reciente creación y gran aceptación es el Cálculo de la Huella Hídrica (HH).

1.1.3 La Huella Hídrica

La idea de considerar el uso del agua a lo largo de las cadenas de suministro ha cobrado interés después de la introducción del concepto de “Huella Hídrica” por A. Hoekstra en 2002.

La HH es un indicador de uso de agua dulce que es palpable no sólo en el uso de agua directo de un consumidor o productor, sino también en su uso indirecto. Puede ser considerada como un indicador global de apropiación de los recursos de agua dulce, por encima de la medida tradicional y restringida de la extracción de agua. La huella hídrica de un proceso es el volumen de agua utilizada para producir sus diferentes productos, medidos a lo largo de la cadena de suministro. Es un indicador

multidimensional, que muestra los volúmenes de consumo de agua por fuentes y volúmenes de contaminación, y cuyos componentes de huella hídrica total pueden ser especificados geográfica y temporalmente (Hoekstra et al., 2011).

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*).

Dentro del concepto de HH y en base a los lineamientos de la *WFN* (Hoekstra, et al. 2011) es posible diferenciar principalmente tres distintos tipos de análisis para calcular y evaluar la HH de un producto.

El primero se basa en el consumo de agua y contaminación de esta, haciendo hincapié en si los volúmenes de agua utilizados provienen de precipitación o cuerpos de agua. Se divide en:

- HH Verde, se refiere al consumo de recursos de agua verde (agua de lluvia que no se convierte en escorrentía, sino que se incorpora en productos agrícolas).
- HH Azul, se refiere al consumo de los recursos hídricos azules (agua dulce), superficial o subterránea, en toda la cadena de producción de un producto. Consumo se refiere a la pérdida de agua en cuerpos de agua disponibles en la superficie o en acuíferos subterráneas en el área de la cuenca. La pérdida ocurre cuando el agua se evapora, no regresa a la misma cuenca, es dispuesta al mar o se incorpora a un producto.
- HH Gris, se refiere a la contaminación y está definida como el volumen de agua dulce que se requiere para asimilar una carga de contaminantes dadas las concentraciones naturales y estándares ambientales de calidad de agua. La HH gris de un producto es un indicador de contaminación que puede ser asociada a lo largo de la cadena de producción. Se define como el volumen de agua necesario para diluir los contaminantes presentes en los efluentes que permitiría alcanzar los estándares de calidad de agua requeridos (Hoekstra, et al., 2011).

Al evaluar la HH de esta manera se pretende conocer el volumen de agua requerido dependiendo de su origen, así como el volumen de agua susceptible de contaminación, tomando en cuenta la elaboración de un producto.

El siguiente tipo de análisis reconocido para la comprensión de la HH es el que se distingue para un producto dependiendo de sí el volumen de agua pertenece al proceso de elaboración en sí o al de su cadena de suministro (insumos requeridos). Se divide en:

- HH directa, la cual se refiere el volumen de agua utilizada en el proceso directo de fabricación o transformación final de un producto.
- HH indirecta, referida al agua que se requiere a lo largo de la cadena de suministro, es decir, el agua requerida para generar los insumos requeridos para la fabricación de dicho producto.

Por último, una separación de la HH que se realiza para su análisis y comprensión es de acuerdo con el origen geográfico de la misma, se distinguen:

- HH interna, definida como el uso de recursos hídricos de una región geográfica delimitada para producir determinados bienes y servicios.
- HH externa, definida como el volumen de agua usada fuera de la región geográfica de estudio para producir determinados bienes y servicios.

La HH es un concepto que cada día cobra una mayor aceptación y que ha demostrado ser de gran utilidad para el sector público y privado. De los estudios publicados referentes a 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 et al., 2009), el intercambio de agua analizado entre las regiones propias del Reino Unido, evaluando las HH tanto internas como externas de cada una de dichas regiones (Yu et al., 2010), o un estudio de la HH nacional agrícola de Colombia (Arévalo et al., 2011). Existen también estudios de HH de regiones o cuencas como el expuesto por Aldaya et al. (2010), en el que se analizan políticas públicas con base a la HH de los productos agrícolas en la región de la Mancha Occidental en España. 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, et al., 2006). De igual forma se encuentran estudios de HH de empresas específicas como el caso de la cervecería *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)

Específicamente 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 en general es mucho mayor que si solamente es considerada la parte del proceso de manufactura en sí.

Dado que la HH es un concepto reciente, las metodologías existentes no cubren ciertos aspectos de cálculo de HH para casos específicos. La metodología de la WFN se centra en el intercambio de agua virtual entre regiones y naciones, en la HH que generan los productos agrícolas o en la HH de consumo de países y grandes regiones. Por otra parte, el cálculo de HH basado en el enfoque del 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. 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, perteneciente a una región geográfica delimitada. De igual manera no se cuenta con un análisis de la HH de un producto industrial determinado distinguiendo a la vez todos los componentes en los que la HH puede ser analizada (HH verde, HH azul, HH gris, HH directa, HH indirecta, HH interna y HH externa), por lo que al realizar la metodología y el cálculo de la HH de una tonelada de cuero bovino curtido al cromo en el estado de Guanajuato, permitirá contar con una herramienta de cálculo de la HH de un producto industrial en una región determinada que en su análisis aportará beneficios respecto al uso y consumo de agua dentro del sector del curtido.

1.2 Justificación

Debido a la alta concentración de industrias curtidoras ubicadas en el estado de Guanajuato, existe un grave problema de contaminación de agua que, si bien está siendo atacado por entidades gubernamentales y el mismo sector privado, ha sido difícil de erradicar debido a la dificultad de tratar los contaminantes usados en los procesos de curtido, especialmente el cromo. Además, se sabe que los procesos típicos de curtido utilizan grandes volúmenes de agua. Siendo Guanajuato un estado que presenta escasez de agua y sobreexplotación de sus mantos acuíferos, se requiere realizar estudios que conlleven a una mejor comprensión del uso y manejo del agua, especialmente en aquellos sectores que en gran medida la requieren para su funcionamiento como es el caso de la industria del curtido.

A pesar de que la HH se ha posicionado como un concepto gran aceptación y que ha demostrado ser de gran utilidad para el sector público y privado, a la fecha no se cuenta con estudios de HH referentes a productos industriales procesados dentro de una pequeña región geográfica, ya que los reportes de HH de productos industriales existentes se refieren a estimaciones de nivel global o multinacional, o delimitados a una sola empresa, en su mayoría del sector alimenticio. A la fecha no se cuenta con estudios de cálculo de huella hídrica a nivel industrial aplicado a un producto procesado en una región delimitada.

Es necesario un mejor entendimiento de los impactos relacionados con el agua, como base de una mejora en la gestión del agua en niveles locales, regionales, nacionales y globales. Por ello el presente proyecto realiza el cálculo de la Huella Hídrica de una tonelada de piel bovina curtida al cromo, con datos recopilados del sector del curtido en León, Gto., considerando los distintos tipos de empresas asentadas en la zona en una media ponderada, ya que representará una herramienta analítica e instrumento de ayuda para saber cómo la piel curtida al cromo se puede ver relacionada al tema de escasez y contaminación de agua, y en el qué hacer para asegurar que dicha actividad productiva contribuya al uso sustentable del agua. Por lo que el cálculo de la HH de una tonelada de piel bovina curtida al cromo beneficiará a las empresas y entidades gubernamentales relacionadas a dicho proceso para una gestión más sustentable del agua, tanto en la elección de la cadena de suministro, como en el uso de agua en el proceso de curtido y efluentes generados.

Asimismo, se podrá contar con el cálculo de la HH de un producto industrial, sumándose a los cálculos de HH de productos agrícolas existentes.

1.3 Hipótesis

El cálculo de la Huella Hídrica de la piel bovina curtida al cromo en el estado de Guanajuato permitirá analizar el uso e incorporación de agua al proceso y conocer el impacto de la contaminación generada, así se identificarán puntos críticos que al mejorarse permitirán un uso más eficiente del recurso hídrico. Asimismo, podrá usarse como una herramienta de medición de uso de agua que beneficiará al sector del curtido.

1.4 Objetivos

1.4.1 Objetivo General

Obtener la huella hídrica de una tonelada de piel bovina curtida al cromo con base en datos del estado de Guanajuato.

1.4.2 Objetivos Específicos.

- Desarrollar aspectos metodológicos que permitan calcular la HH del proceso de curtido de piel bovina al cromo.
- Calcular la HH del porcentaje del sector agropecuario correspondiente al proceso de curtido.
- Identificar la HH azul y la HH gris del proceso de curtido en base a datos experimentales.
- Permitir generar propuestas que permitan reducir puntos críticos de uso, consumo y contaminación en el proceso con base en la HH calculada.

2. METODOLOGÍA

Para la realización del cálculo de la HH de la piel bovina curtida al cromo se tomaron elementos de dos metodologías aprobadas internacionalmente para tal fin y se añadieron otros elementos que permitieran la adaptación de este cálculo al contexto del caso de estudio descrito en este trabajo. La metodología descrita en el *Water Footprint Assessment Manual: Setting the Global Standard*, el cual provee una guía comprensiva 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). Habiendo conjugado dichas metodologías descritas y validadas bibliográficamente, también se adaptaron necesidades específicas a la presente investigación, haciendo uso de bibliografía y bases de datos que permitieron alcanzar los objetivos y metas planteados. La metodología de cálculo de la HH de una tonelada de piel bovina curtida al cromo 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 acopló ambas para la obtención de un solo cálculo global. También se diferenció la HH interna como la HH generada dentro del estado de Guanajuato para la fabricación de la piel bovina al cromo, y la HH externa como la HH generada al exterior del estado. La HH azul, HH verde y HH gris mantuvieron la conceptualización explicada en el capítulo 1.

Se eligió para el cálculo un enfoque “de abajo hacia arriba”, es decir se estableció primeramente la HH de los insumos requeridos para la fabricación y procesamiento de la piel curtida al cromo y posteriormente se calculó la HH del proceso en sí.

2.1 Establecimiento de metas y alcances

Para el establecimiento de las metas y alcances de la presente investigación se propuso evaluar a partir del producto piel bovina curtida al cromo su HH delimitando el sistema de forma que el análisis comprendiera 1) HH por tipo de origen, 2) HH directa e indirecta y 3) HH interna y externa.

2.1.1 HH por tipo de origen

Comprendió la HH azul, HH verde y HH gris del sistema. Se evaluó delimitando el sistema desde los requerimientos alimenticios del ganado bovino hasta la salida del proceso industrial de una tonelada de piel bovina curtida al cromo, considerando el tratamiento posterior de agua residual en los efluentes en caso de que existiera. De acuerdo con Hoekstra, *et al.*, 2011 el cálculo de la HH gris muestra el volumen de agua requerido para asimilar la carga contaminante de los efluentes. La HH gris se calcula únicamente para el contaminante más crítico del proceso analizado. No se deben sumar los distintos contaminantes presentes. Lo anterior debido a que el contaminante más crítico del proceso será el que requerirá mayor volumen de agua teórico para ser diluido hasta las condiciones de calidad de agua deseadas y por tanto permitirá la dilución del resto de los contaminantes presentes.

2.1.2 HH directa e indirecta

Comprendió la HH directa como el proceso industrial de producción de una tonelada de piel bovina al cromo, considerando el tratamiento posterior de agua en los efluentes en caso de que existiera, y la HH indirecta como el sistema delimitado desde los requerimientos alimenticios del ganado bovino hasta el proceso de obtención de la piel bovina cruda (rastró).

2.1.3 HH interna y externa

Comprendió el sistema delimitado desde los requerimientos alimenticios del ganado bovino hasta la producción completa de una tonelada de piel bovina curtida al cromo. Consideró la HH interna del sistema como el consumo hídrico proveniente del estado de Guanajuato y la HH externa como todo aquel requerimiento hídrico efectuado fuera de dicho estado.

Por lo anterior y para abarcar dicha suposición se acoplaron elementos de las dos metodologías mencionadas. Partiendo de dichas metodologías se añadieron 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 del proceso. 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.

2.2 Adaptación metodológica del cálculo de la HH

El estudio completo de HH del producto requirió del cálculo y evaluación 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 tres etapas para una mejor comprensión y análisis. Debido a la complejidad del cálculo y a falta de referencias directas para la realización del presente estudio se acoplaron aspectos las dos metodologías reconocidas referentes al cálculo de HH. Se diferenció de esta manera la HH de la cadena de suministro, HH del proceso industrial, y HH total que acopla ambas etapas para la obtención de un solo cálculo global. Se describe la metodología empleada en las siguientes etapas:

2.2.1 Cálculo de la HH de una cabeza de ganado bovino

Al resultar la piel cruda el insumo principal para el proceso de curtido de piel bovina al cromo se calculó su HH acoplándola a una ponderación final. Se hizo en referencia a los lineamientos de la *WFN* (Hoekstra et al, 2011) para calcular la HH de un producto ganadero acoplando la metodología explicada. En esta etapa dada la complejidad del cálculo, se utilizó de manera análoga los términos HH y contenido de agua virtual, resaltando, en el caso de que se dispusiera de ello la diferenciación entre HH verde, HH azul y HH gris.

Se propuso evaluar el estudio de la HH dividiéndolo en cuatro grandes regiones, de acuerdo con la investigación de campo realizada en las diferentes industrias de curtido al haber detectado la proveniencia de la piel cruda. Debido a que se consideró probable que la piel cruda generará distintas HH dependiendo del lugar de la crianza del animal en cuestión, se realizó el cálculo de la HH de la piel cruda de manera separada según su lugar de origen.

De esta manera se calculó la HH de una cabeza de ganado bovino en cada una de las regiones establecidas. Dentro del uso del agua en la ganadería fueron diferenciados dos tipos de consumo: 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.

El contenido de agua virtual o huella hídrica de los animales (V_a , m^3/animal), se calculó en función de los contenidos de agua virtual de los productos empleados en su alimentación (V_{alim} , m^3/animal) y de los volúmenes de agua requeridos en el manejo del animal a lo largo de su vida (V_{cons} y V_{serv} , m^3/animal), lo anterior expresado en la ecuación 2.1.

$$V_a = V_{alim} + V_a = V_{alim} + V_{cons} + V_{serv} \quad \text{Ec. 2.1}$$

Al realizar 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 , m^3 /ton) se obtuvo el contenido de agua virtual relativo a la alimentación (ecuación 2.2).

$$V_{alim} = \sum_{j=producto} T_j \times V_j \quad \text{Ec. 2.2}$$

La ecuación anterior se evaluó para cada una de las regiones identificadas, habiendo tenido en cuenta un promedio de la edad de sacrificio del ganado, así como el tipo y la cantidad de alimento consumido por el animal. 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 y fueron obtenidas principalmente de bases de datos reconocidas y de bibliografía reportada (Chapagain & Hoekstra, 2004) (Chapagain & Hoekstra, 2003) (Mekonnen & Hoekstra, 2012) (Steinfeld, *et al.* 2006) (FAO, 2016) (FAO, 2013) (USDA, 2016) (INEGI, 2016).

Para la obtención de la HH de una unidad de ganado bovino fue necesario tomar en cuenta la HH que genera la alimentación del animal. La HH por tonelada de alimento se diferenció dependiendo del cultivo y también del país donde es cultivado, obteniendo dichos datos a partir del reporte de Mekonnen y Hoekstra, (2010) (Anexo 3). Así fue posible determinar la HH de un animal en relación con su alimentación, se muestra el ejemplo desglosado de una cabeza de ganado bovino en el Anexo 4.

2.2.2 Cálculo de la HH de la piel cruda como insumo

Para obtener el contenido de agua virtual de un producto agrícola o ganadero procesado como el caso de la piel, se partió del contenido de agua virtual del cultivo o animal del que procede. Al obtener dos o más productos al procesar un animal fue necesario distribuir 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 la piel cruda se obtuvo al dividir las toneladas de piel obtenida (P_{prod}) entre las toneladas de animal en pie (P) (ecuación 2.3).

$$pf = \frac{P_{prod}}{P} \quad \text{Ec. 2.3}$$

La fracción de valor (vf) se obtuvo de la relación del valor de mercado de la piel cruda (i) entre el valor de mercado de todos los productos obtenidos ($i-n$) a partir del animal (ecuación 2.4).

$$vf = \frac{v_i \times pf_i}{\sum_i^n (v \times pf)} \quad \text{Ec. 2.4}$$

La variable v_i se definió como el valor del mercado de la piel cruda ($US\$/ton$). Las ecuaciones 2.3 y 2.4 se calcularon para cada región identificada, de modo que la HH o contenido de agua virtual de una tonelada de piel cruda para una región específica V_{prod} fue dada por la ecuación 2.5.

$$V_{prod} = \left(V_{proceso} + \frac{V_a}{pf} \right) \cdot vf \quad \text{Ec. 2.5}$$

Siendo $V_{proceso}$ (m^3/ton) el agua necesaria para procesar una tonelada de piel cruda como producto final, en el comúnmente denominado rastro o matadero. Al término del cálculo se aplicará el factor de conversión de equivalencia respecto a la piel curtida acabada, es decir cuantos kg de piel cruda son necesarios para obtener una tonelada de piel curtida, lo cual se calculará con base en el estudio de campo.

2.2.3 Cálculo de la HH de los insumos químicos para la industria del curtido

Con base a la investigación de campo realizada en la que se visitaron diferentes empresas dedicadas al curtido al cromo de piel bovina y a una empresa de fabricación e químicos básicos para la industria del curtido se detectó que los productos químicos aunque representan un porcentaje considerable de los insumos requeridos para el procesamiento industrial de la piel bovina, no representan un porcentaje considerable dentro de la HH total, ya que el requerimiento hídrico para la fabricación de los químicos no es tan elevado en comparación de la HH de la piel cruda y del proceso industrial en sí.

2.2.4 Cálculo de la HH del proceso industrial del curtido de piel bovina al cromo

Para la realización del presente cálculo se delimitó el sistema que se pretende estudiar. Se utilizaron los datos recabados descritos en la etapa 2.3 para generar la HH del proceso de curtido de piel bovina al cromo y se propuso una diferenciación de los distintos tipos de empresas dedicadas al

curtido de piel bovina al cromo, determinando su nivel de impacto sobre la HH general del proceso en el estado de Guanajuato. Dicha diferenciación respondió a que se consideró que, al aumentar el número de empleados en las empresas, el tamaño de producción también aumenta, por lo que los procesos para la obtención de piel curtida variaban de acuerdo con el tipo de empresa, y por ende los patrones de uso y consumo de agua también.

Para el cálculo de la HH del proceso de curtido se separó en tres subetapas para un mejor análisis: ribera, curtido y acabado; contemplando cada una las operaciones típicas descritas para el proceso de curtido de piel bovina al cromo y siguiendo la metodología descrita en el *Water Footprint Assessment Manual* (Hoekstra et al., 2011). La HH de un proceso se dividió en sus componentes azul, verde y gris (Ec. 2.6), por lo que se propuso acoplar dicha metodología en tres subetapas.

$$HH_{\text{proceso}} = HH_{\text{proceso}_{\text{azul}}} + HH_{\text{proceso}_{\text{verde}}} + HH_{\text{proceso}_{\text{gris}}} \quad \text{Ec. 2.6}$$

2.2.5 Cálculo de la HH azul del proceso industrial del curtido de piel bovina al cromo

Para calcular la HH azul de un proceso, se tuvo en cuenta el agua azul extraída para ese proceso. Este volumen se diferenció entre el agua que se evapora y el agua que se incorpora al producto más un volumen de agua asociada a pérdidas y que no vuelven al ciclo hidrológico, restando, en el caso que existiera, la parte del agua que es reutilizada para el mismo u otros procesos o actividades de la empresa. Se resume lo anterior en la ecuación 2.7.

$$HH_{\text{proceso}_{\text{azul}}} = \text{Evap}_{\text{azul}} + \text{Incorp}_{\text{azul}} + \text{Pérdidas}_{\text{azul}} - \text{Reutilizada}_{\text{azul}} \quad \text{Ec. 2.7}$$

Donde $HH_{\text{proceso}_{\text{azul}}}$ se refirió 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 proceso en sus distintas etapas, $\text{Pérdidas}_{\text{azul}}$ se refirió al volumen de agua asociada a pérdidas por ineficiencia del proceso y $\text{Reutilizada}_{\text{azul}}$ al volumen de agua reutilizada; todo ello expresado en m^3/ton .

Para determinar el tipo de empresa de cada una de las que fue evaluadas en trabajo de campo se calculó el puntaje de cada empresa (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 y debió ser menor o igual al tope máximo combinado de acuerdo con la Secretaría de Economía (2009) de cada clasificación (micro, pequeña, mediana y grande) (Ecuación 2.8).

$$P_{emp} = (0.1 * Tt) + (0.9 * Va) \quad \text{Ec. 2.8}$$

Para la determinación del índice de impacto para cada tipo de empresa se aplicó la ecuación 2.9.

$$ii_e = \frac{P_e}{P_T} \quad \text{Ec. 2.9}$$

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.

Debido a la complejidad del cálculo y a la cantidad de datos disponibles, se decidió evaluar las micro y pequeñas empresas como un solo tipo (pequeña), por lo que las consideraciones para los diferentes tipos de empresa son pequeña, mediana y grande. Lo anterior también debido a que se observó que las empresas micro y pequeñas presentaban similitudes dentro de sus procesos, además de que se consideró que la ponderación dentro del cálculo de HH total de las micro y pequeñas empresas no se afectaba considerablemente si eran consideradas ambas como un tipo de empresa.

2.2.6 Cálculo de la HH verde del proceso industrial del curtido de piel bovina al cromo

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; representado por la ecuación 2.10

$$HH_{proceso_{verde}} = Evap_{verde} + Incorp_{verde} \quad \text{Ec. 2.10}$$

Sin embargo, dado que la HH verde como ya se mencionó anteriormente se refiere al consumo de agua de lluvia, en la mayoría de los procesos industriales este componente es igual a cero, siendo el caso para el proceso industrial del curtido, por lo que la ecuación 2.10 se despreció al igualarla a cero.

2.2.7 Cálculo de la HH gris del proceso industrial del curtido de piel bovina al cromo

Para el cálculo de la huella gris de un proceso ($HH_{proceso_{gris}}$) de acuerdo con la metodología establecida por la WFN se calculó únicamente para el contaminante más crítico del proceso analizado, por lo que no fueron sumados los distintos contaminantes presentes. Como se explica en el apartado 2.1.1. En el caso del proceso de curtido de piel bovina al cromo, el contaminante más crítico, como ya se mencionó resultó ser Cromo (Cr). Para ello se dividió la carga contaminante (Q_{Contam}) 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}). Por lo que fue expresada en m^3 mediante la ecuación 2.11.

$$HH_{proceso_{gris}} = \frac{Q_{Contam}}{C_{m\acute{a}x} - C_{nat}} \quad \text{Ec. 2.11}$$

Donde Q_{Contam} se expresó en kg y $C_{m\acute{a}x}$ y C_{nat} se expresaron en kg/m^3 . La carga contaminante 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. Se representó por medio de la ecuación 2.12.

$$Q_{Contam} = [(Vol_{Vertido} \cdot C_{Vertido}) - (Vol_{Extr} \cdot C_{Orig})] \quad \text{Ec. 2.12}$$

En el caso de la HH gris, cuando la empresa o industria realizara 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. Sin embargo, es sabido que el cromo, debido que es un contaminante de difícil degradación, permanece en determinadas concentraciones en el agua a pesar de que esta haya sido previamente tratada, motivo por el cual fue de especial atención para el cálculo de la HH gris de los procesos de curtido.

Debido a la poca disponibilidad de datos experimentales para realizar un perfil de HH gris para cada uno de los tipos de empresas evaluadas, se optó por calcularse con base en un reporte generado por CIATEC (1996) que incluye la caracterización de aguas residuales de una empresa promedio de curtido de piel bovina al cromo perteneciente al estado de Guanajuato. Se realizaron a partir de dicha caracterización, estimaciones basadas en los estudios de campo, en el reporte '*Pollutants in Tannery*

Effluent: International Scenario on Environmental Regulations and Compliance' (UNIDO, 2003), el 'Manual de Buenas Prácticas Ambientales para la Curtiembre en Centroamérica' (USAID, 2006) y el manual '*Introduction to Treatment of Tannery Effluents: What every tanner should know about effluent treatment'* (UNIDO, 2011), con el objetivo de obtener una aproximación de HH gris acorde a los diferentes tipos de empresas evaluadas y a las tecnologías disponibles en cada una de ellas. Tomando en cuenta especialmente uso eficiente de agua, inmunización de pelo, recirculación de baños de pelambre, recirculación de baños de cromo, curtido de alto agotamiento y precipitación y reúso de cromo.

Para la concentración máxima permitida que se tomó en cuenta para el cálculo de la HH gris se estableció de acuerdo con los parámetros establecidos en la NOM-001-SEMARNAT-1996 (SEMARNAT, 2003), que establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales en aguas y bienes nacionales. Por lo anterior se calculó la carga contaminante ($Q_{contamin}$) para cada tipo de empresa y a su vez se ponderó la carga contaminante total del proceso de curtido en Guanajuato por medio de la ecuación 2.13.

$$Q_{Contam} = \sum_A^D Q_{Contam}^e \cdot ii_e \quad \text{Ec. 2.13}$$

De igual forma se acoplaron al cálculo de HH gris datos proporcionados por SAPAL (2016) (Anexos, Tablas 6.1 y 6.2) y CICUR (2016), referentes al tratamiento y gestión de aguas residuales industriales en la ciudad de León, Guanajuato, para determinar el porcentaje de agua tratada y límites de descarga, de modo que la HH gris se evaluó en su totalidad como muestra la Figura 2.1.

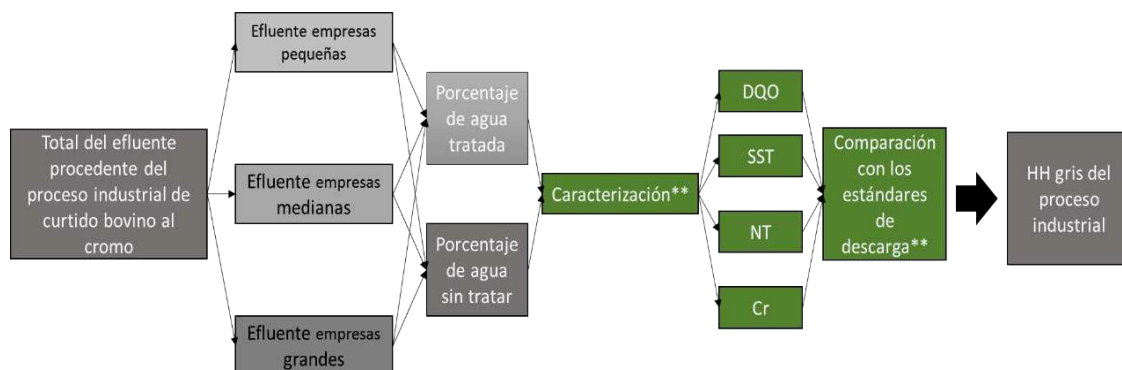


FIGURA 2.1 CONSIDERACIONES PARA EL CÁLCULO DE LA HH GRIS DEL PROCESO INDUSTRIAL DE CURTIDO BOVINO AL CROMO.

2.2.8 Cálculo de la HH total de una tonelada de piel bovina curtida al cromo

Para calcular la HH total para una tonelada de piel bovina curtida al cromo se sumó la HH correspondiente a la piel cruda como insumo más la HH resultante del proceso industrial.

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 revelaron información significativa y que derivó en un entendimiento mucho más amplio de la HH total.

Se destaca que el presente cálculo correspondió a la HH de una tonelada de piel curtida al cromo, con datos recopilados de diversas empresas e instancias relacionadas al sector del curtido en la ciudad de León, Gto., habiendo considerado una media ponderada de acuerdo con los diferentes tipos de empresas y regiones para el proceso industrial y el origen de la piel cruda como insumo principal para el sector del curtido, respectivamente.

2.3 Recopilación de datos experimentales

La recopilación de datos se obtuvo con base a visitas a empresas dedicadas al curtido de piel bovina en el estado de Guanajuato, específicamente en el municipio de León, 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; 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), habiendo completado datos que pudieran suponer un proceso completo para cada tipo de empresa. Por lo anterior, y para poder seguir la metodología propuesta en el apartado 2.2 se recolectaron entre otros datos que permitieron completar adecuadamente el cálculo, la siguiente información por visita: número de empleados, 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, edad promedio del animal al sacrificio, 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). Se visitaron un total de nueve empresas, tres pequeñas, tres medianas y tres grandes.

De igual forma se gestionó información más 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), Sistema de Agua Potable y Alcantarillado de León (SAPAL), Centro de Innovación Avanzada en Tecnologías Competitivas (CIATEC), e instancias gestoras de residuos procedentes de la industria de la curtiduría.

3. RESULTADOS

3.1 Cálculo de la HH

3.1.1 Cálculo de la HH de una cabeza de ganado bovino

De acuerdo con los datos recabados descritos en el apartado 2.3 se propone la distinción de regiones conforme a la tabla 3.1, agregando la HH generada por una unidad de ganado bovino a lo largo de su vida tomando en cuenta la edad de sacrificio.

Por lo anterior, se presenta la aproximación de la HH generada por el ganado bovino promedio en las cuatro regiones diferenciadas para el presente estudio. La ponderación final toma en cuenta datos referentes al ganado bovino de tipo cárnico, así como al tipo de crianza de ganado (extensivo, intensivo o mixto), en cada una de las cuatro diferentes regiones propuestas para el estudio. La tabla 3.1 muestra la HH generada por la crianza del ganado bovino al final de su ciclo de vida expresado en m³/ton integrando la HH referente a la alimentación, servicios de crianza y consumo directo de agua del ganado, se presentan datos reportados para México, Estados Unidos, Canadá, seis países europeos (Francia, Alemania, Italia, Reino Unido, España y Países Bajos) que representan el 70% del total de la producción de ganado cárnico bovino de la Unión Europea (28 países) (Eurostat, 2016) y tres países sudamericanos (Brasil, Argentina y Colombia), los cuales representan el 78% del total de la producción de ganado bovino cárnico de Centro y Sudamérica (21 países evaluados) (FAOSTAT, 2016).

Tabla 3.1 Componentes de la HH del ganado bovino (m³/ton) de acuerdo con su lugar de crianza. Adaptada de (Mekonnen & Hoekstra, 2010)

País	HH	Sistema de producción (m ³ /ton)			Promedio ponderado (m ³ /ton)
		Extensivo	Semi-intensivo	Intensivo	
México	Verde	8349	5835	8132	7410
	Azul	94	158	645	364
	Gris	25	73	584	289
Estados Unidos	Verde	9367	6240	1446	6357
	Azul	246	256	176	246
	Gris	290	377	270	360
Canadá	Verde	8057	5062	3530	5341
	Azul	122	110	106	107
	Gris	586	565	546	568
Francia	Verde	5404	4923	2878	3305
	Azul	97	107	163	133
	Gris	218	225	241	219
Alemania	Verde	5445	4869	2463	3052
	Azul	53	50	61	52
	Gris	499	486	419	411
Italia	Verde	8587	7672	3759	4820
	Azul	217	238	330	275
	Gris	434	448	478	435
Reino Unido	Verde	4566	4197	2612	2945
	Azul	62	67	106	84
	Gris	390	403	436	395
España	Verde	8260	7545	4497	5173
	Azul	385	411	518	446
	Gris	452	489	615	531
Países Bajos	Verde	0	5228	1993	2669
	Azul	0	374	183	216
	Gris	0	337	114	162
Brasil	Verde	10040	8717	3563	8115
	Azul	53	69	52	65
	Gris	7	26	103	35
Argentina	Verde	2920	2556	1137	2278
	Azul	56	74	60	68
	Gris	2	6	24	10
Colombia	Verde	7485	6389	2101	5617
	Azul	59	76	65	73
	Gris	1	4	17	6
Promedio Mundial	Verde	9197	7348	4174	7002
	Azul	192	241	311	256
	Gris	106	199	336	219

De igual manera en la tabla 3.2, se identifican las regiones México, Norteamérica (Estados Unidos y Canadá), Europa y Centro y Sudamérica, promediando los valores reportados y ponderándolos de acuerdo con el porcentaje de participación dentro de la producción de ganado cárnico bovino en la región estudiada, mostrándose en la última columna la HH de un animal al final de su ciclo de vida.

Tabla 3.2 Componentes de la HH promedio de una unidad de ganado bovino al final de su ciclo de vida (m³/animal) de acuerdo con la región de crianza.

Región	HH	Sistema de Producción (m ³ /ton)			Promedio ponderado (m ³ /ton)	HH promedio de un animal al final de su ciclo de vida (m ³ /animal) *
		Extensivo	Semi-intensivo	Intensivo		
México	Verde	8349	5835	8132	7410	1875
	Azul	94	158	645	364	92
	Gris	25	73	584	289	73
	Total	8469	6066	9361	8063	2040
Norteamérica	Verde	9222	6111	1675	6245	1580
	Azul	232	240	168	231	58
	Gris	322	397	300	383	97
	Total	9777	6748	2144	6860	1735
Europa	Verde	5787	8893	4279	5309	1343
	Azul	128	400	318	310	78
	Gris	354	597	456	459	116
	Total	6270	9890	5053	6078	1538
Centro y Sudamérica	Verde	8554	7422	3009	6864	1737
	Azul	54	71	55	66	17
	Gris	5	21	82	28	7
	Total	8613	7513	3146	6959	1761

*Se calcula en proporción para un animal, al final de su ciclo de vida.

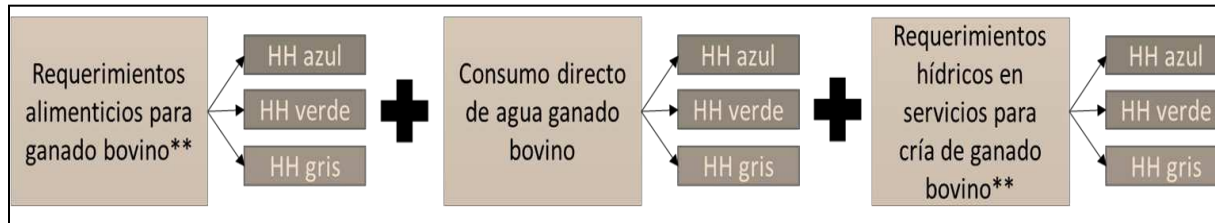


FIGURA 3.1 HUELLA HÍDRICA DE UNA UNIDAD DE GANADO BOVINO*

*Se calcula en proporción para un animal, al final de su ciclo de vida.

**Se calcula para las cuatro regiones establecidas (México, Norteamérica, Sudamérica y Europa).

3.1.2 Cálculo de la HH de una unidad de piel cruda

Para el cálculo de la HH de una unidad de piel cruda se parte de los datos mostrados en la tabla 3.2, es decir, la HH promedio de un animal al final de su ciclo de vida.

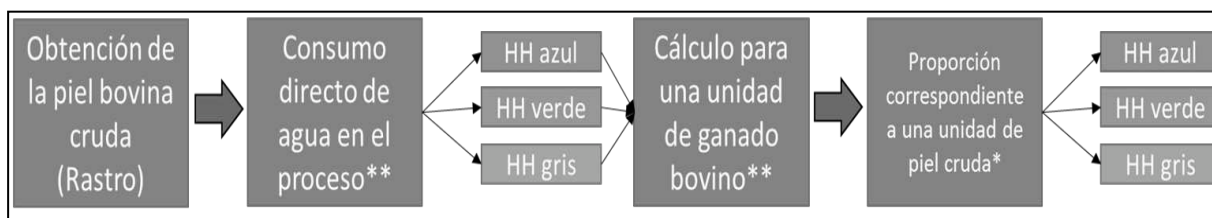


FIGURA 3.2 HUELLA HÍDRICA DE UNA UNIDAD DE PIEL BOVINA CRUDA

*Se calcula en proporción para una unidad de piel cruda durante el proceso de obtención.

**Se calcula para las cuatro regiones establecidas (México, Norteamérica, Sudamérica y Europa).

A partir de ahí se identifican las etapas para llegar a la piel cruda como insumo principal de la industria del curtido, siendo la más significativa en términos de uso de agua la etapa de sacrificio en el matadero o rastro que es donde se separa la piel cruda del resto del animal (Tabla 3.3).

Tabla 3.3 Componentes de la HH promedio del proceso de obtención de la piel cruda de ganado bovino (m³/tonelada) de acuerdo con la región.

Región	HH	HH promedio proceso (m ³ /ton)	HH promedio por animal sacrificado (m ³ /animal) *
México	Azul	5.01	1.27
	Gris	29.83	7.55
	Total	34.84	8.82
Norteamérica	Azul	3.78	0.96
	Gris	20.56	5.20
	Total	24.34	6.16
Europa	Azul	4.69	1.19
	Gris	5.92	1.50
	Total	10.61	2.69
Centro y Sudamérica	Azul	3.73	0.95
	Gris	49.36	12.49
	Total	53.09	13.44

*Calculada únicamente durante el proceso de obtención (rastros, matadero o establecimiento de sacrificio).

Para el cálculo de los términos fracción de producto (*pf*) y fracción de valor (*vf*) se tomaron datos del SNIIM (Sistema Nacional de Información e Integración de Mercados, 2018), el cual contiene información de precios de bovinos en México, así como precios encuestados en rastros, emparadoras y distribuidoras, y precios de ganado en pie, carne de canal, cortes y subproductos. La información es válida para México, sin embargo, debido a la falta de acceso a información y complejidad para obtener los términos *pf* y *vf* para cada región evaluada y dado a que el resultado es muy cercano al valor estimado al del promedio mundial reportado por Mekonnen y Hoekstra (2010) y no representaría cambios significativos en la ponderación final del cálculo de la HH se decide homogenizar los datos obtenidos de *pf* y *vf* para que sean válidos para todas las regiones. Así pues, el valor obtenido para la fracción de producto de la piel cruda es de 0.70 (*pf*) y el valor obtenido para la fracción de valor (*vf*) es de 0.032.

La tabla 3.4, presenta la HH promedio para la piel bovina después de aplicar al cálculo los factores *pf* y *vf*, es decir la parte de la HH que corresponde a la piel cruda desde los insumos para alimentar al ganado hasta la obtención de la piel cruda. Se presenta en términos de m³/ton, m³/unidad y m³/2.32 ton, ya que representa el factor de conversión de piel cruda a piel procesada en peso. Es

decir, 2.32 ton de piel cruda se transformarán después de todo el proceso de curtido en una tonelada de piel bovina curtida al cromo.

Tabla 3.4 Componentes de la HH promedio de la piel cruda de ganado bovino (m³) de acuerdo con la región.

Región	HH	HH promedio de la piel cruda de ganado bovino de acuerdo con la región		
		m ³ /ton	m ³ /unidad	m ³ /2.32 ton
México	Verde	3366.37	113.22	7807.99
	Azul	165.52	5.57	383.92
	Gris	132.24	4.45	306.72
	Total	3664.14	123.23	8498.64
Norteamérica	Verde	2837.11	95.42	6580.42
	Azul	105.06	3.53	243.69
	Gris	174.65	5.87	405.09
	Total	3117.28	104.84	7230.25
Europa	Verde	2411.89	81.12	5594.15
	Azul	140.98	4.74	327
	Gris	208.71	7.02	484.09
	Total	2761.58	92.88	6405.23
Centro y Sudamérica	Verde	3118.32	104.87	7232.67
	Azul	30.10	1.01	69.82
	Gris	14.29	0.48	33.15
	Total	3163.17	106.38	7336.69

Se propone para una mejor apreciación comparar la HH de la piel cruda con los otros subproductos principales obtenidos del proceso de sacrificio (carne de canal y vísceras), por lo que se calcula de igual forma la fracción de producto y la fracción de valor de ambos, los resultados arrojan que de la HH total del ganado bovino (desde la siembra de piensos hasta el sacrificio del animal), el 20.40% corresponde a la piel cruda, el 69.33% a la carne de canal y 10.27% a vísceras. Lo anterior se muestra en la tabla 3.5.

Tabla 3.5 Porcentaje de HH promedio de los subproductos obtenidos a partir del ganado bovino (piel, carne de canal y vísceras) tomando en cuenta desde la siembra de piensos hasta el final del proceso de sacrificio de acuerdo con la región.

Región	HH	Porcentaje de la HH promedio de los subproductos obtenidos (%)		
		Piel Cruda	Carne de Canal	Vísceras
México	Verde	21.05	68.42	10.53
	Azul	20.94	68.58	10.48
	Gris	20.24	69.56	10.20
	Total	21.02	68.47	10.51
Norteamérica	Verde	21.05	68.42	10.53
	Azul	20.92	68.61	10.47
	Gris	20.62	69.03	10.35
	Total	21.02	68.46	10.52
Europa	Verde	21.05	68.42	10.53
	Azul	20.93	68.60	10.48
	Gris	20.95	68.57	10.48
	Total	21.04	68.44	10.52
Centro y Sudamérica	Verde	21.05	68.42	10.53
	Azul	20.60	69.06	10.35
	Gris	13.02	79.65	7.34
	Total	20.99	68.51	10.50
Promedio Total		20.40	69.33	10.27

3.1.3 Cálculo de la HH del proceso industrial del curtido de piel bovina al cromo

Se propone 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 delimita como se muestra en la Figura 3.3, con base en el estudio de campo de forma que comprenda el uso, consumo y contaminación de agua dentro de diferentes tipos de empresas dedicadas al procesado de curtido de piel bovina al cromo asentadas en el estado de Guanajuato, Méx.

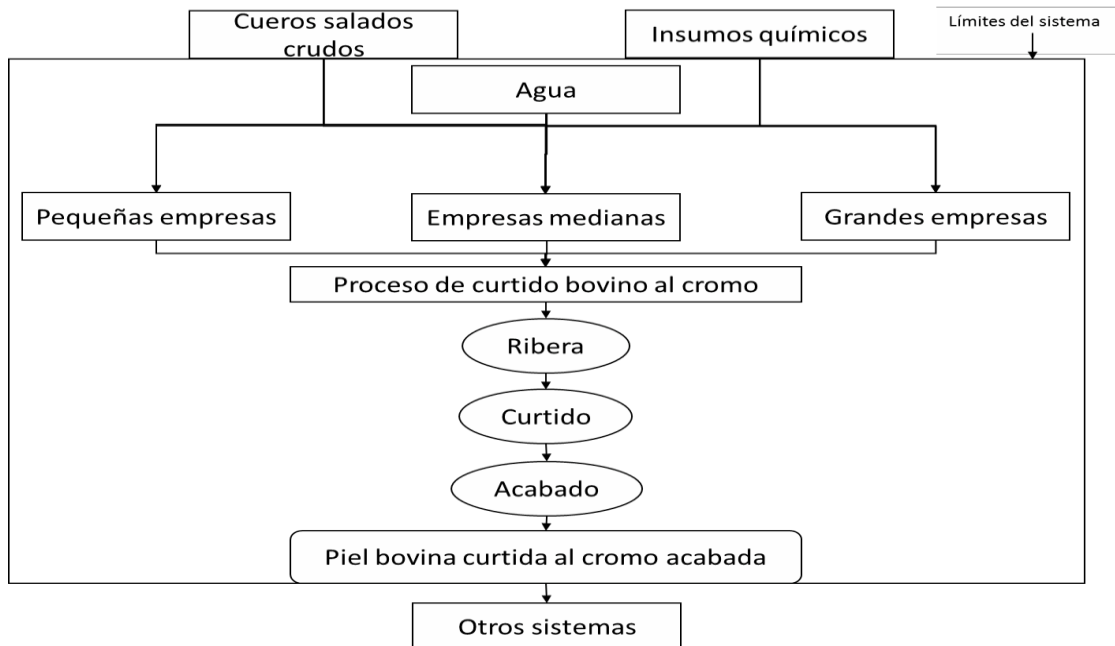


FIGURA 3.3 LÍMITES DEL SISTEMA ESTUDIADO.

Se realizó dicha propuesta considerando que empresas con distintos volúmenes de producción, diferente número de empleados y diferente equipamiento tecnológico generarían HH diferentes. Para la realización del presente cálculo se delimita el sistema desde la recepción de la materia prima (piel cruda), hasta la obtención de una tonelada de piel bovina curtida al cromo, aplicable en la ciudad de León, Gto., tomando como base los datos recabados descritos en la etapa metodológica 3.3 se elabora el diagrama de proceso establecido para el cálculo de la HH del proceso industrial (Fig. 3.4) donde se hace especial énfasis en el uso y consumo de agua así como en la generación de aguas residuales en el proceso.

Asimismo, se diferencian los distintos tipos de empresas dedicadas al curtido de piel bovina al cromo de acuerdo con la clasificación de empresas por parte de la CICUR (Tabla 3.6), determinando su nivel de impacto sobre la HH general del proceso en la ciudad de León.

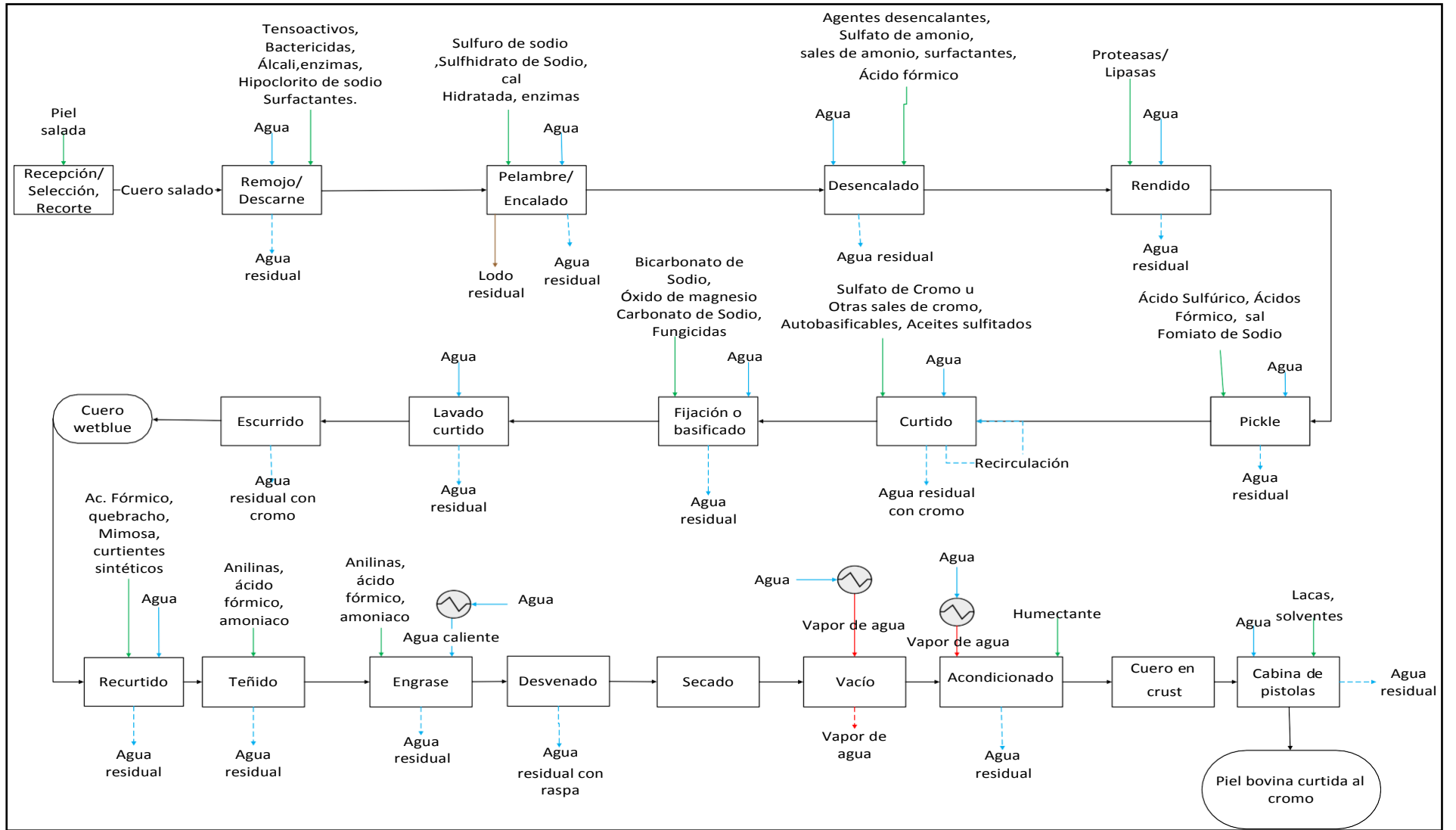


FIGURA 3.4. DIAGRAMA GENERAL DEL PROCESO INDUSTRIAL DE CURTIDO

Para la determinación del índice de impacto para cada tipo de empresa se aplica la ecuación 3.1.

$$ii_e = \frac{P_e}{P_T} \quad \text{Ec. 3.1}$$

Donde ii_e es el índice de impacto para la empresa evaluada, P_e la producción de piel bovina al cromo del tipo de empresa evaluada para el año reportado (*ton*), y P_T la producción total de piel bovina al cromo en la ciudad de León, Gto., para el año reportado.

3.1.4 Cálculo de la HH azul del proceso industrial del curtido de piel bovina al cromo

Debido a que los procesos típicos de curtido no utilizan agua a temperaturas que conlleven la evaporación de esta, el volumen de agua que se pierde por evaporación es muy pequeño y por tanto de la ecuación 3.3 $Evap_{azul}$ es despreciada para efectos del presente cálculo. $Incorp_{azul}$ se obtiene de la sumatoria de los promedios obtenidos de los datos experimentales recabados para las diferentes etapas del proceso teniendo en la ecuación 3.2 que:

$$Incorp_{azul} = Incorp_{azul\ ribera} + Incorp_{azul\ curtido} + Incorp_{azul\ acabado} \quad \text{Ec 3.2}$$

Debido a que experimentalmente y a través de datos reportados es posible conocer el volumen del efluente de salida del proceso, así como el volumen de agua incorporada al producto y al proceso, y el agua reutilizada en el proceso ($Reutilizada_{azul}$); se calcula de la ecuación 2.2 $Pérdidas_{azul}$ por medio de la ecuación 3.3.

$$Pérdidas_{azul} = Incorp_{azul} - Efluente_{azul} - Producto_{azul} - Reutilizada_{azul} \quad \text{Ec 3.3}$$

Donde $Efluente_{azul}$ corresponde al efluente de salida del proceso y $Producto_{azul}$ al agua incorporada al producto al final del proceso industrial, expresadas también en términos de m^3/ton . Una vez calculadas las ecuaciones anteriores en términos de cada tipo de empresa se obtiene la HH azul total para el proceso ($HH_{proceso_{azul}}$), la cual está dada por la ecuación 3.4:

$$HHproceso_{azul} = \sum_A^C HHproceso_{azul} \cdot ii_e \quad \text{Ec. 3.4}$$

La clasificación de las empresas evaluadas, así como el uso de agua dentro de los subprocesos que cada una de ellas lleva a cabo se muestra en la Tabla 3.6. Para los subprocesos que no muestran datos es debido a que la empresa evaluada solamente lleva a cabo uno o dos subprocesos propios del proceso de curtido según sea el caso.

Tabla 3.6 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 3.6 muestra la evaluación de un total de nueve empresas, tres de tipo pequeña, tres medianas y tres grandes. Aunque no en todos los casos se evalúa el proceso completo (ribera, curtido y acabado) es posible integrar procesos completos para cada tipo diferente de empresa como si fuera una misma, por lo que se acoplan los estudios dependiendo al tipo de empresa perteneciente. Por lo anterior la Tabla 3.7 muestra 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 CICUR (2016).

El índice de impacto se refiere también al porcentaje que cada uno de los tipos de empresa tiene en 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 3.7 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

Se calcula 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 establece la HH total del proceso dividiéndola también en los subprocesos principales (ribera, curtido y acabado). Los resultados mostrados en la Figura 3.5 muestran también el peso que tienen las empresas pequeñas, medianas y grandes dentro de la HH azul total del proceso. Para la HH total se obtiene 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.

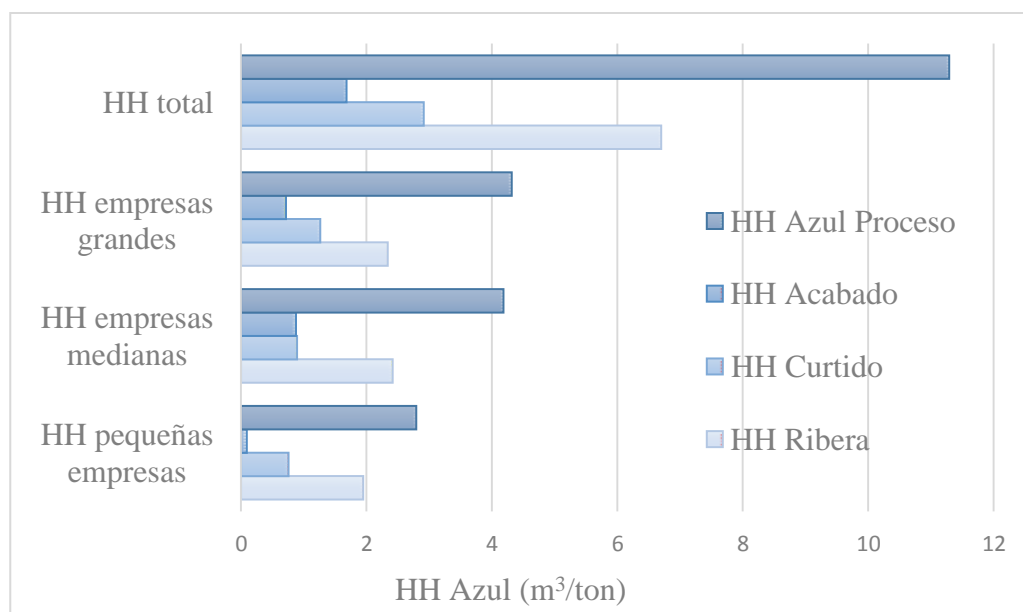


FIGURA 3.5 PONDERACIÓN DEL CÁLCULO DE LA HH AZUL DE UNA TONELADA DE PIEL BOVINA CURTIDA AL CROMO.

3.1.5 Cálculo de la HH gris del proceso industrial del curtido de piel bovina al cromo

Para la ecuación 3.5 $Vol_{Vertido}$ se calcula con base a los datos obtenidos de efluentes de salida para los distintos tipos de empresas evaluadas expresado en términos de m^3 por cada tonelada de cuero curtido al cromo producida. Asimismo, $C_{Vertido}$ se calcula también con base a los datos obtenidos de la concentración de cromo a la salida para los distintos tipos de empresas evaluadas. Vol_{Extr} se refiere al agua extraída para el uso del proceso, pero dado que la concentración del contaminante evaluado (Cr) en el volumen de agua extraído se considera cero, esta parte de la ecuación se desprecia; quedando representada la carga contaminante para cada tipo de empresa a evaluar en la ecuación 3.5

$$Q_{Contam}^e = Vol_{Vertido}^e \cdot C_{Vertido}^e \quad \text{Ec. 3.5}$$

Por lo que Q_{Contam} para el proceso en general queda determinado por la ecuación 3.6

$$Q_{Contam} = \sum_A^D Q_{Contam}^e \cdot ii_e \quad \text{Ec. 3.6}$$

Para la ecuación 3.6 $C_{m\acute{a}x}$ se establece de acuerdo con los parámetros establecidos en la legislación mexicana y C_{nat} se considera cero.

De forma análoga a la subetapa anterior en el índice de impacto, se sugiere evaluar el índice de participación por región al total de piel cruda procesada por la industria de curtido de piel bovina al cromo, para ello se aplica la ecuación 3.7 para cada región.

$$ip_r = \frac{P_r}{P_T} \quad \text{Ec. 3.7}$$

Donde ip_r es el índice de participación para la región evaluada, P_r la cantidad de piel cruda destinada al curtido de piel bovina al cromo por parte de la región evaluada para el año reportado (ton), y P_T la cantidad total de piel cruda destinada a los procesos de curtido de piel bovina al cromo en la ciudad de León Gto., para el año reportado.

Al evaluar las regiones propuestas de acuerdo con su índice de participación y haciendo su sumatoria se obtiene el agua virtual o HH para una tonelada de piel bovina cruda destinada para el curtido al cromo en la ciudad de León Gto. ($HH_{piel\ cruda}$), representada en la ecuación 3.8.

$$HH_{piel\ cruda} = \sum_1^4 V_{prod} \cdot ip_r \quad \text{Ec. 3.8}$$

A partir de la caracterización de aguas residuales analizada y su contrastación con la NOM-001-SEMARNAT-1996, se calcula la HH gris de cada uno de los contaminantes, estableciendo al Cromo (Cr) como el contaminante más crítico del sistema estudiado.

Lo anterior se realiza de igual manera de forma ponderada para los distintos tipos de empresas y para el estudio cuantitativo de HH promedio. En todos los casos el cromo resulta ser el contaminante más crítico al generar una HH gris mayor que a los otros contaminantes analizados. Así, de acuerdo con lo descrito en el apartado 2.2.7 y los lineamientos establecidos en el *Water Footprint Assessment Manual: Setting the Global Standard*, el cromo es el único contaminante que se toma en cuenta para la valoración de la HH gris, que para el proceso de una tonelada de piel bovina curtida al cromo resulta de 2664.44 m³/ton (Tabla 3.8).

Tabla 3.8 Uso de agua en los diferentes tipos de empresa e índice de impacto aplicable en el estado de Guanajuato (2015).

Agente contaminante	Composición promedio del proceso industrial de curtido al cromo (kg/m ³)*	Límite máximo permisible (kg/m ³)**	HH gris pequeñas empresas (m ³ /ton)	HH gris empresas medianas (m ³ /ton)	HH gris grandes empresas (m ³ /ton)	HH gris Total (m ³ /ton)
DBO	5.141	0.15	95.76	143.42	147.91	386.95
Grasas	2.788	0.015	519.31	777.76	802.15	2098.43
Cromo	0.236	0.001	659.38	987.55	1018.52	2664.44
Sólidos Suspendidos	3	0.15	55.88	83.69	86.31	225.8
Totales						

*CIATEC (1996)

** NOM-001-SEMARNAT-1996

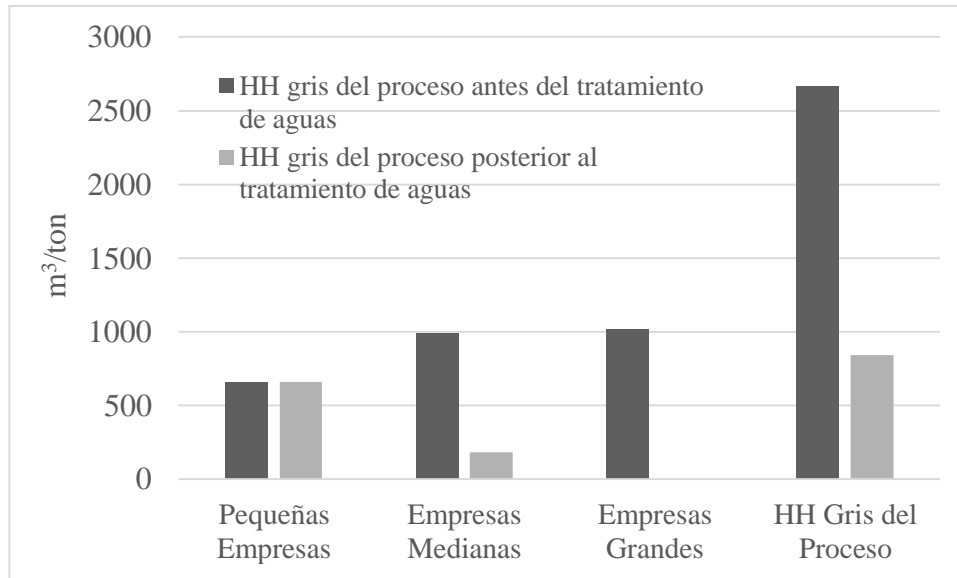


FIGURA 3.6 PONDERACIÓN DEL CÁLCULO DE LA HH GRIS DEL PROCESO INDUSTRIAL DE UNA TONELADA DE PIEL BOVINA CURTIDA AL CROMO.

Al tomar en cuenta el proceso de tratamiento de aguas residuales, así como las tecnologías disponibles los diferentes tipos de empresas disminuye la HH gris correspondiente a las empresas grandes y medianas, quedando un déficit de 15% del total de la HH gris que no es tratada hasta llegar a los límites de descarga establecida por la norma. Para dicha aproximación se analizan los procesos de tratamiento de agua de las empresas evaluadas en caso de que lo haya y la gestión de aguas residuales industriales y municipales de la ciudad de León (SAPAL, 2016) (Figura 3.6).

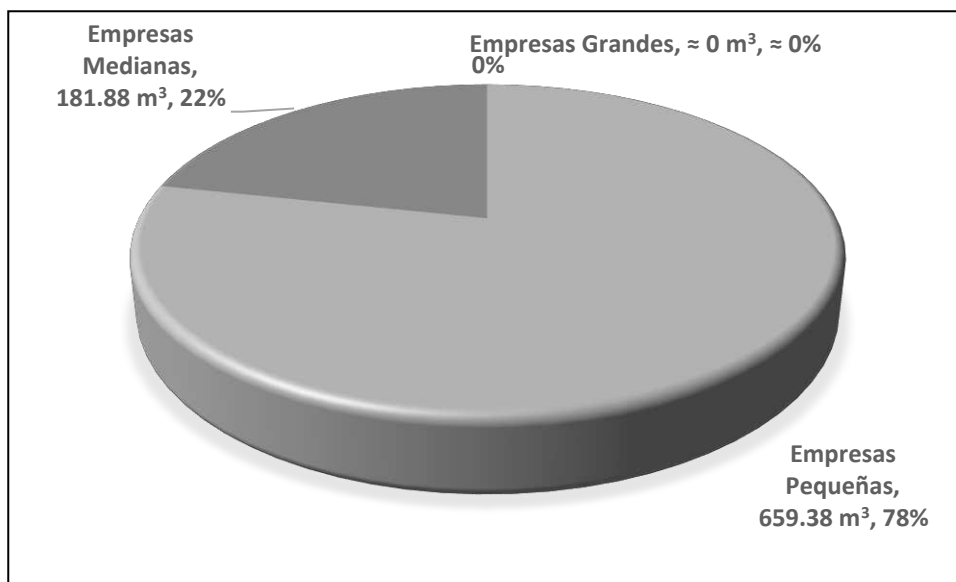


FIGURA 3.7 PONDERACIÓN DEL CÁLCULO DE LA HH GRIS DEL PROCESO INDUSTRIAL DE UNA TONELADA DE PIEL BOVINA CURTIDA AL CROMO, POSTERIOR A LA CONSIDERACIÓN DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES.

Para el cálculo de la HH gris del proceso se toman en cuenta las siguientes consideraciones con base a las visitas realizadas a empresas del sector del curtido y a SAPAL (Ramírez, 2016): 1) Las empresas pequeñas no cuentan con la tecnología, espacio ni regulación para garantizar un tratamiento adecuado de las aguas residuales de su proceso, desechando sus vertidos en la mayoría de los casos a la red municipal de alcantarillado. Por ello se asume que el sector micro y pequeña empresa en el sector del curtido bovino al cromo no realiza tratamiento de aguas residuales posterior al proceso. 2) Las empresas grandes cuentan con la tecnología para llevar a cabo tratamiento de aguas residuales posterior al proceso de curtido. De igual forma se encuentran reguladas tanto por la CICUR como por instancias gubernamentales para garantizar parámetros de aguas de descarga de acuerdo con la normatividad vigente. 3) Desde 2009 existe un módulo de desbaste de agua en la ciudad de León; un sitio para el tratamiento de aguas residuales industriales provenientes de los parques autorizados, con una capacidad de tratamiento de 150 litros por segundo (SAPAL, 2018). 4) En total 95 empresas reciben suministro de agua tratada a través de una red de distribución de 35 kilómetros en el polígono industrial del sur-poniente de la ciudad. 5) Las aguas residuales que se reciben en el módulo de desbaste provenientes de las industrias reciben primero un pretratamiento; enseguida un tratamiento físico-químico y posteriormente un tratamiento biológico, el cual elimina las mayores cargas contaminantes. De ahí y con características similares a las aguas domésticas, el agua industrial tratada pasa posteriormente a la Planta Municipal para continuar con su saneamiento (SAPAL, 2018). 6) Al realizar

el cálculo de la HH gris del proceso de empresas pequeñas medianas y grandes, y contrastarlo con el estudio de campo y los datos de tratamiento de la planta de desbaste SAPAL y la planta de tratamiento de aguas municipales de la ciudad de León, se asume que la totalidad de aguas residuales de las empresas grandes es tratada y llevada debajo los límites contaminantes establecidos por la normatividad. 7) El agua residual restante tratada por el módulo de desbaste se asume pertenece a empresas medianas ya que un amplio porcentaje de ellas se encuentran establecidas dentro del polígono industrial mencionado.

Tabla 3.9 HH total de una tonelada de piel bovina curtida al cromo en Guanajuato, Mex.

Ponderación	HH (m ³ /ton)		
	Azul	Gris	Total
Empresas Pequeñas	2.79	659.38	662.17
Empresas Medianas	4.19	181.88	186.07
Empresas Grandes	4.31	≈ 0	4.31
Total	11.29	841.26	852.55

El resultado de la HH gris se muestra en la Figura 3.6. Para la HH gris considerada posterior al tratamiento de aguas residuales se reduce a 841 m³/ton de piel curtida al cromo, reduciendo en su totalidad la HH gris correspondiente a las empresas grandes (100%), a 181.88 m³/ton la ponderación para empresas medianas (reduce 81.6% su HH gris) y manteniéndose en 659.38 m³/ton para empresas pequeñas. En resumen, la HH gris del proceso para la totalidad del sector es de 2,664.44 m³/ton, y al considerar el tratamiento de aguas residuales se ve reducida a 841.26 m³/ton, lo cual representa una reducción de la HH gris del proceso del 68.43% (Fig. 3.7).

Tabla 3.10 Comparación del presente estudio con bibliografía reportada respecto al uso del agua en la industria del curtido.

Referencia	HH azul (m ³ /ton)				Cr (mg/l)
	Ribera	Curtido	Acabado	Total	
<i>Center of Promotion of Sustainable Technologies, 2003*</i>				15.0 – 40.0	
Dixit et al., 2015	14.5 - 20.0	1.0 - 2.0	2.0 - 3.5	17.5 - 25.5	3.0 – 7.0
Floqi et al., 2007*					4.7 - 49.2
Gutteres et al., 2008*				10.5 – 28.0	
Ilou et al., 2012					34.16 - 811.4
Kongjao et al., 2008*					11.5 - 14.3
Milà et al., 2002				21.7	
Puig et al., 2008	9.88 - 17.15	0.98 - 1.6	2.9 - 4.2	16.2 - 21.4	0.3 - 3
Tamilchelvan and Dhinakaran, 2012*					1.8
UNIDO, 2003	9.5 – 16.0	3.5 – 6.0	3.0 – 6.0	30.0 – 40.0	150
UNIDO, 2011					150 - 200
USAID, 2006	34.8	11.5	17.0	63.3	
Presente estudio	6.7	2.91	1.68	11.29	236

*Citados por Ilou et al. (2012)

El resultado de la HH del proceso industrial de curtido bovino al cromo se muestra en la Tabla 3.9. De un total de HH ponderada entre empresas pequeñas, medianas y grandes de 852 m³/ton para el proceso industrial de elaboración de una tonelada de piel curtida al cromo en el estado de Guanajuato, incluyendo la HH azul y la HH gris, se observa que la mayor parte de la HH es generada por las empresas pequeñas (78%), seguido por un 22% atribuido a empresas medianas y una muy pequeña parte atribuida a empresas grandes (tan solo 4.32 m³) (Fig. 3.8). Lo anterior se debe a la gran diferencia entre la HH azul y la HH gris del proceso (11.29 m³/ton contra 841.26 m³/ton respectivamente), así como el dramático decremento en la HH gris que presentan las grandes empresas al considerar el tratamiento de sus aguas residuales.

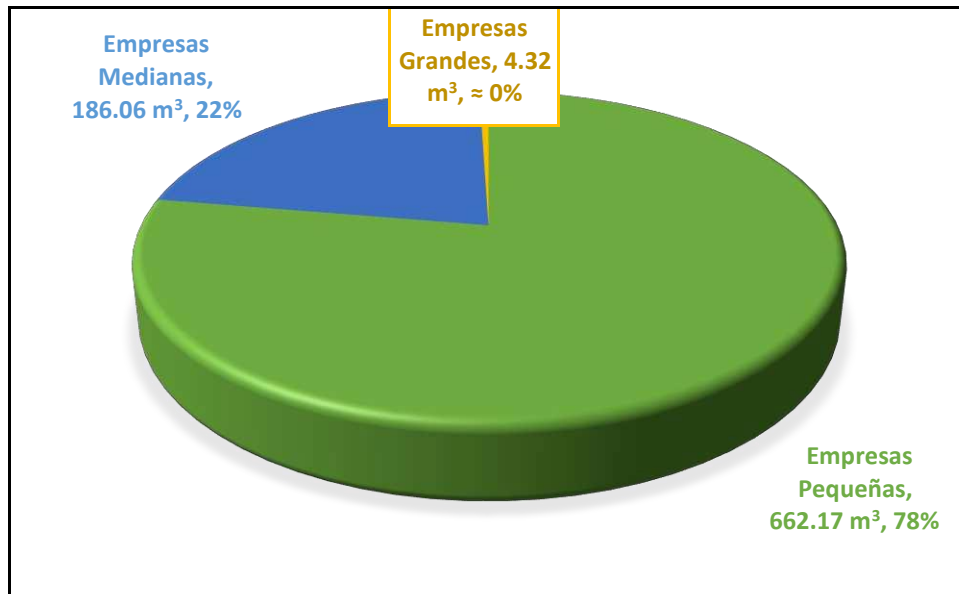


FIGURA 3.8 HH DEL PROCESO INDUSTRIAL DE UNA TONELADA DE PIEL BOVINA CURTIDA AL CROMO, DE ACUERDO CON LA PONDERACIÓN DE LOS DIFERENTES TIPOS DE EMPRESAS EN EL ESTADO DE GUANAJUATO.

3.1.6 Cálculo de la HH total de una tonelada de piel bovina curtida al cromo

Para el cálculo total de la HH de una tonelada de piel bovina curtida al cromo se aplica la ecuación 3.9.

$$HH_{total} = HH_{piel\ cruda} + HH_{proceso} \quad \text{Ec. 3.9}$$

Dado que la metodología descrita pretende diferenciar la HH interna y externa se aplica la ecuación 3.10 para cada tipo de empresa.

$$HH_{piel\ cruda}_A^C = \sum_1^5 \left[\frac{(\% \text{ insumos})(HH_{piel\ cruda})}{100} \cdot (ii_e) \right] \quad \text{Ec. 3.10}$$

Lo anterior se evalúa para los tres tipos de empresas identificadas y para las cuatro distintas regiones identificadas más una nueva correspondiente al estado de Guanajuato que determinará la HH interna para el insumo de la piel cruda.

Según datos del INEGI (2016), en el estado de Guanajuato se sacrificaron para ese año 226,627 cabezas de ganado bovino. Se asume que la totalidad de las pieles obtenidas de los sacrificios de ganado

bovino en el estado fueron curtidas ahí. Se estima que aproximadamente el 5 % de esa cantidad se curte con taninos vegetales, por lo que el resto (215,296 unidades aproximadamente) se curten con sales de cromo. De acuerdo con la CICUR (2016), en el estado de Guanajuato se curten al cromo 9.53 millones de unidades anuales. De acuerdo con el estudio de campo el origen de los insumos (piel cruda) por tipo de empresa se distribuyen de la siguiente manera 1) Empresas grandes: 50% Norteamérica, 40% México, 5% Europa y 5% Centro y Sudamérica. 2) Empresas medianas: 60% Norteamérica, 35% México, y 5% Centro y Sudamérica. 3) Empresas pequeñas: 50% México y 50% Centro y Sudamérica.

De acuerdo con el índice de impacto obtenido para cada tipo de empresa relativo al volumen de producción total en el estado de Guanajuato, las empresas grandes tienen una participación del 62%, las empresas medianas de 28% y las empresas pequeñas de 10%. Lo cual quiere decir que anualmente las empresas grandes curten al cromo alrededor de 5.91 millones de unidades, las empresas medianas 2.67 millones y las micro y pequeñas empresas 953 mil unidades aproximadamente. De los datos anteriores se calcula por lo tanto que las empresas grandes curten alrededor de 2.36 millones de unidades de piel cruda mexicana, las medianas 934 mil unidades y las micro y pequeñas empresas 476 mil unidades.

Con el cálculo anterior se reparten las 215,296 unidades correspondientes al estado de Guanajuato, diferenciando así cinco regiones. Siendo los datos del estado de Guanajuato los correspondientes a la HH interna del sistema. Debido a que no fueron recabados datos concretos del volumen de pieles crudas originarias del estado de Guanajuato que absorbe cada tipo de empresa para sus procesos se asume un porcentaje similar al de la participación de mercado para cada uno, es decir 62% para las empresas grandes, 28% para las empresas medianas y 10% para las empresas pequeñas.

Por lo anterior de las 215,296 unidades de piel cruda originaria del estado de Guanajuato, 133,483 se asumen procesadas por las empresas grandes, 60,282 por las medianas y 21,530 por las pequeñas. De esta forma los porcentajes por región de los insumos procesados se expresan de la siguiente manera 1) Empresas grandes: 50% Norteamérica, 36.35% México (exceptuando Guanajuato), 5% Europa, 5% Centro y Sudamérica y 3.65% Guanajuato. 2) Empresas medianas: 60% Norteamérica, 32.74 % México (exceptuando Guanajuato), 5% Centro y Sudamérica y 2.26% Guanajuato. 3) Empresas pequeñas: 50% Centro y Sudamérica, 47.74% México (exceptuando Guanajuato) y 2.26% Guanajuato.

Considerando los datos mencionados y aplicando a la Ec. 3.10 las cantidades expresadas en la Tabla 3.6 para la HH de un $m^3/2.32$ ton de piel cruda por región se obtiene la HH correspondiente a la piel cruda para cada tipo de empresa considerando el origen de los insumos expresada en la Tabla 3.11. El cálculo establece que la HH interna de 2.32 ton de piel cruda como media ponderada para cada tipo

de empresa, refiriéndose, de acuerdo con los porcentajes importados de piel cruda como insumo de cada tipo de empresa a la HH generada fuera del estado de Guanajuato. También se expresa de acuerdo con el índice de impacto de cada tipo de empresa por su nivel de participación en la producción total de piel curtida al cromo en el estado de Guanajuato.

Tabla 3.11 HH promedio interna y externa de 2.32 ton de piel cruda como insumo para el curtido de piel bovina al cromo en el estado de Gto. para los distintos tipos de empresa y la totalidad del sector

Tipo de Empresa	HH	HH promedio de la piel cruda de ganado bovino de acuerdo con la región (m ³ /2.32 ton)					
		Interna	Externa	Total	Interna · ii _e	Externa · ii _e	Total · ii _e
Pequeñas	Verde	176.46	7,343.87	7,520.33	17.65	734.39	752.03
	Azul	8.68	218.19	226.87	0.87	21.82	22.69
	Gris	6.93	163.00	169.94	0.69	16.30	16.99
	Total	192.07	7,725.60	7,917.67	19.21	772.56	791.77
Medianas	Verde	176.46	10,814.47	10,990.93	49.41	3,028.05	3,077.46
	Azul	8.68	421.61	430.29	2.43	118.05	120.48
	Gris	6.93	588.19	595.12	1.94	164.69	166.63
	Total	192.07	11,825.59	12,017.66	53.78	3,311.16	3,364.94
Grandes	Verde	284.99	10,059.97	10,344.96	176.69	6,237.18	6,413.87
	Azul	14.01	403.09	417.10	8.69	249.91	258.60
	Gris	11.20	542.44	553.64	6.94	336.32	343.26
	Total	310.20	11,006.60	11,316.80	192.32	6,824.09	7,016.42
Total del Sector	Verde	637.91	28,218.31	28,856.22	243.75	9,999.62	10,243.37
	Azul	31.37	1,042.89	1,074.26	11.99	389.78	401.77
	Gris	25.06	1,293.63	1,318.69	9.58	517.31	526.88
	Total	694.34	30,557.79	31,252.13	265.31	10,907.82	11,173.13

Al contar con la HH del insumo principal y del proceso por tipo de empresa ponderada de acuerdo con las tecnologías disponibles y volumen de producción, al aplicar la ecuación 3.9 se obtiene la HH total de una tonelada de piel bovina curtida al cromo aplicable para los diferentes tipos de empresas en el estado de Guanajuato, así como de la totalidad del sector, lo cual se muestra en la Tabla 3.12.

Tabla 3.12 HH total de una tonelada de piel bovina curtida al cromo en el estado de Guanajuato para los distintos tipos de empresa y la totalidad del sector

Tipo de Empresa	HH	HH ponderada de acuerdo con el tipo de empresa		
		HH piel cruda (m ³ /2.32 ton)	HH proceso (m ³ /ton)	Total (m ³ /ton)
Pequeñas	Verde	752.03	0	752.03
	Azul	22.69	2.79	25.48
	Gris	16.99	659.38	676.37
	Total	791.77	662.17	1,453.94
Medianas	Verde	3,077.46	0	3,077.46
	Azul	120.48	4.19	124.67
	Gris	166.63	181.88	348.51
	Total	3,364.94	186.07	3,551.01
Grandes	Verde	6,413.87	0	6,413.87
	Azul	258.60	4.31	262.91
	Gris	343.26	0	343.26
	Total	7,016.42	4.31	7,020.73
Total del Sector	Verde	10,243.37	0	10,243.37
	Azul	401.77	11.29	413.06
	Gris	526.88	841.26	1,368.14
	Total	11,173.13	852.55	12,025.68

Los resultados de la Tabla 3.12 muestran que la HH total para una tonelada de piel bovina curtida al cromo en el estado de Guanajuato, incluyendo las HH verde, azul y gris, es de 12,025 m³.

A continuación, se muestra la desagregación de la HH total en HH interna y externa, HH directa e indirecta, HH verde, azul y gris, y HH por tipos de empresas.

- 1) HH interna y externa: Para el cálculo de la HH interna se considera el uso, contaminación y consumo de agua a lo largo de la cadena de suministro, es decir la sumatoria de las Huellas Hídricas verde, azul y gris generadas dentro del estado de Guanajuato. Para el cálculo de la HH externa se considera el uso, contaminación y consumo de agua a lo largo de la cadena de suministro, es decir la sumatoria de las Huellas Hídricas verde, azul y gris generadas fuera del estado de Guanajuato, ya sea en México como en las otras tres regiones identificadas. Al analizar lo anterior se obtiene la Fig. 3.9.

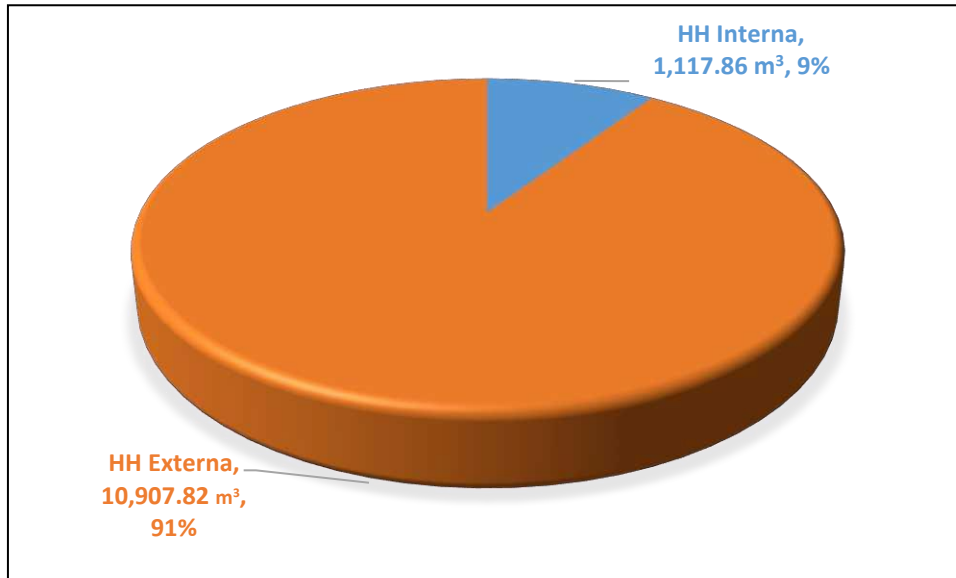


FIGURA 3.9 HH INTERNA Y EXTERNA DE UNA TONELADA DE PIEL BOVINA CURTIDA AL CROMO EN EL ESTADO DE GTO.

2) HH desagregada por región de origen: Se desagrega de la Fig. 3.9 la HH externa para determinar el porcentaje de HH correspondiente a cada región identificada, es decir la HH generada en México fuera del estado de Guanajuato, en Norteamérica, en Europa y en Centro y Sudamérica. La HH originada en el estado de Guanajuato se refiere a la HH interna, por lo que es la misma. Lo anterior se muestra en la Fig. 3.10.

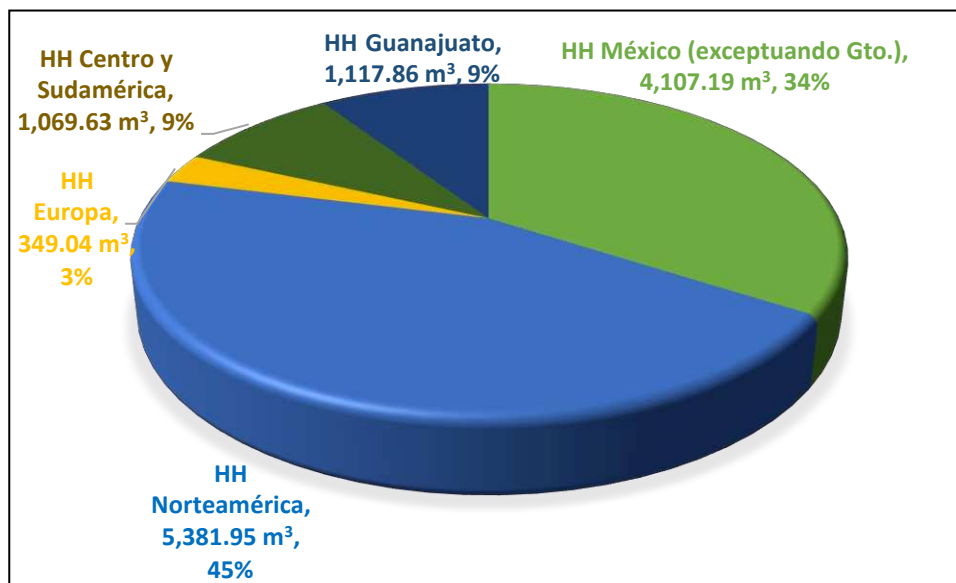


FIGURA 3.10. HH DE UNA TONELADA DE PIEL BOVINA CURTIDA AL CROMO EN EL ESTADO DE GTO., DESAGREGADA DE ACUERDO CON SU REGIÓN DE ORIGEN.

3) HH directa y HH indirecta: Para el cálculo de la HH indirecta se considera el uso, contaminación y consumo de agua a lo largo de la cadena de suministro del insumo principal, es decir la sumatoria de las Huellas Hídricas verde, azul y gris generadas por la piel cruda. Para el cálculo de la HH directa se considera el uso, contaminación y consumo de agua a lo largo del proceso, es decir la sumatoria de las Huellas Hídricas azul y gris generadas durante el proceso industrial de curtido bovino al cromo. Al analizar lo anterior se obtiene la Fig. 3.11.

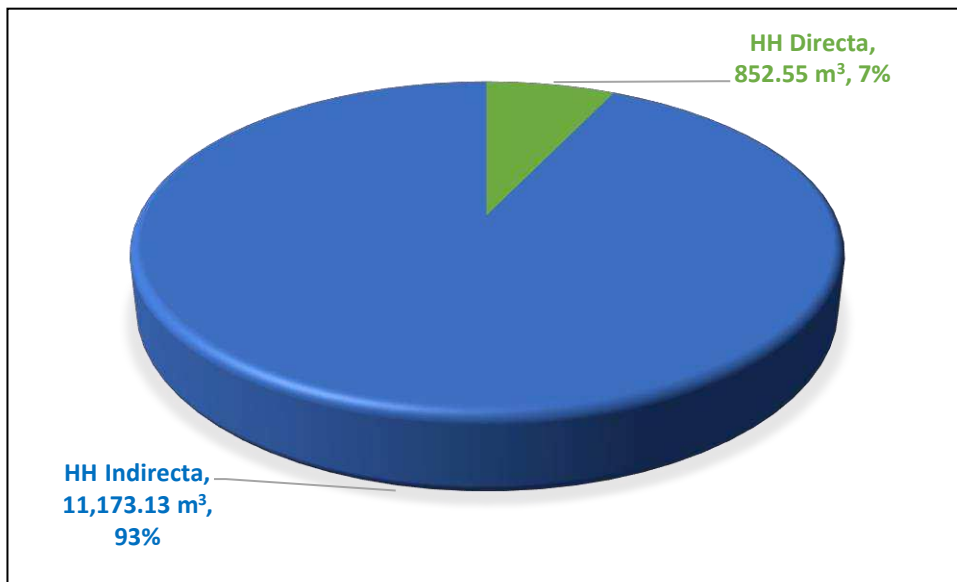


FIGURA 3.11. HH DIRECTA E INDIRECTA DE UNA TONELADA DE PIEL BOVINA CURTIDA AL CROMO EN EL ESTADO DE GTO.

4) HH Verde, Azul y Gris Totales: Se consideran las HH Verde, Azul y Gris a lo largo de la cadena de suministro y el proceso de industrialización para una tonelada de piel bovina curtida al cromo. Al analizar lo anterior se obtiene la Fig. 3.12.

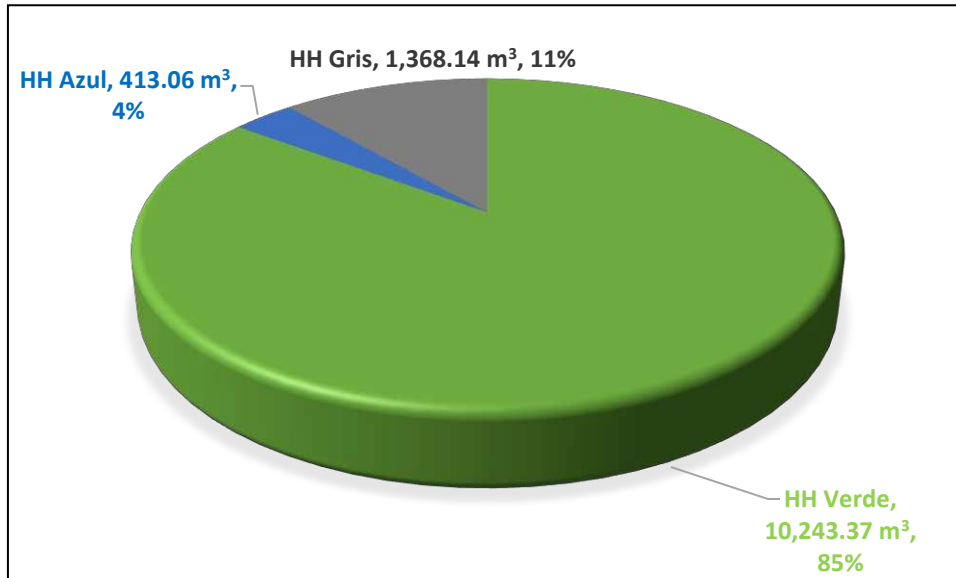


FIGURA 3.12. HH VERDE, AZUL Y GRIS DE UNA TONELADA DE PIEL BOVINA CURTIDA AL CROMO EN EL ESTADO DE GTO.

5) HH por tipo de empresa: Al realizar el análisis por tipo de empresa de la HH total de una tonelada de piel bovina curtida al cromo en el estado de Guanajuato se obtiene la Fig. 3.13.

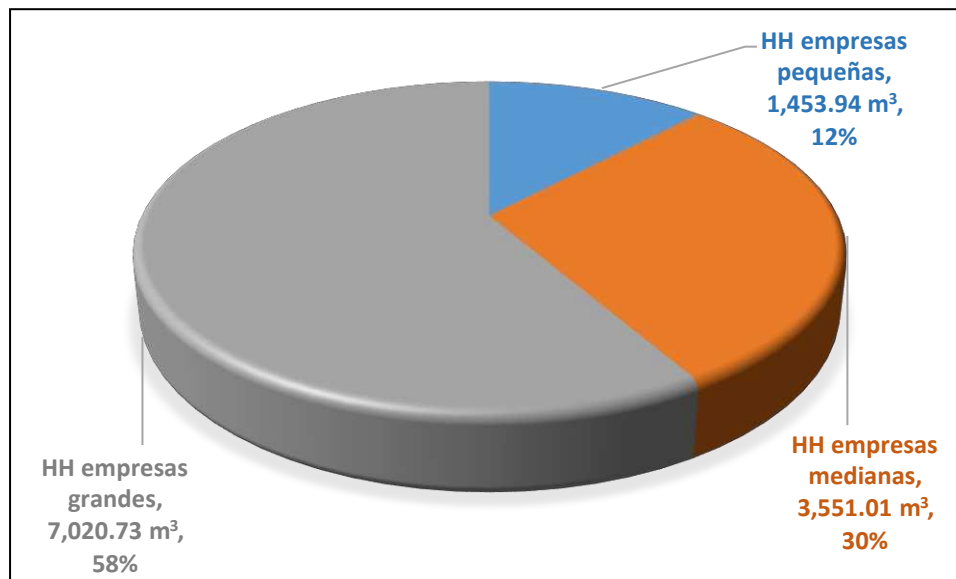


FIGURA 3.13. HH DE UNA TONELADA DE PIEL BOVINA CURTIDA AL CROMO EN EL ESTADO DE GTO., SEGÚN LA PONDERACIÓN DE LOS DIFERENTES TIPOS DE EMPRESAS.

6) HH Verde total por tipo de empresa: Al realizar la partición de la HH Verde total por diferente tipo de empresa de una tonelada de piel bovina curtida al cromo en el estado de Guanajuato se obtiene la Fig. 3.14.

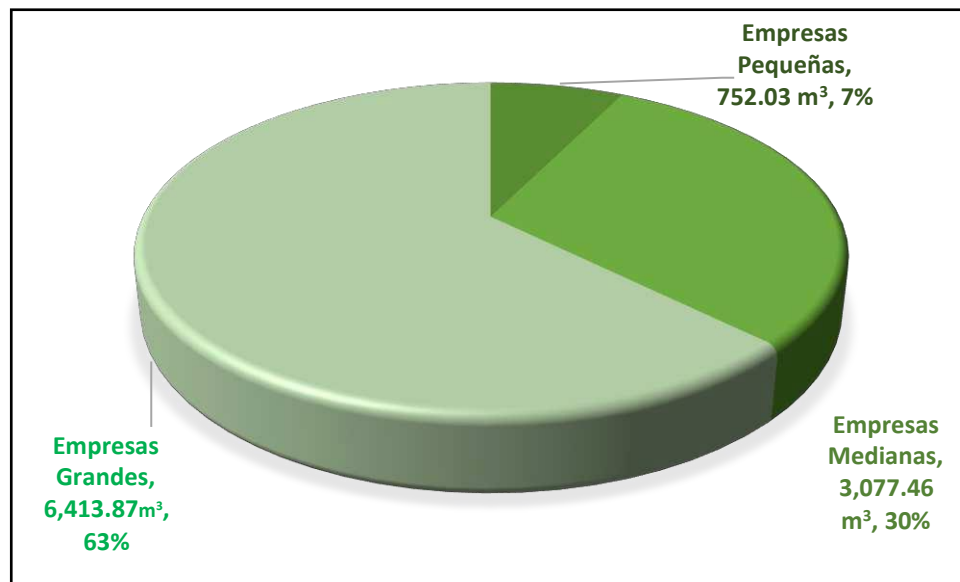


FIGURA 3.14. HH VERDE TOTAL DE UNA TONELADA DE PIEL BOVINA CURTIDA AL CROMO EN EL ESTADO DE GTO., SEGÚN LA PONDERACIÓN DE LOS DIFERENTES TIPOS DE EMPRESAS

7) HH Azul total por tipo de empresa: Al realizar la partición de la HH Azul total por diferente tipo de empresa de una tonelada de piel bovina curtida al cromo en el estado de Guanajuato se obtiene la Fig. 3.15.

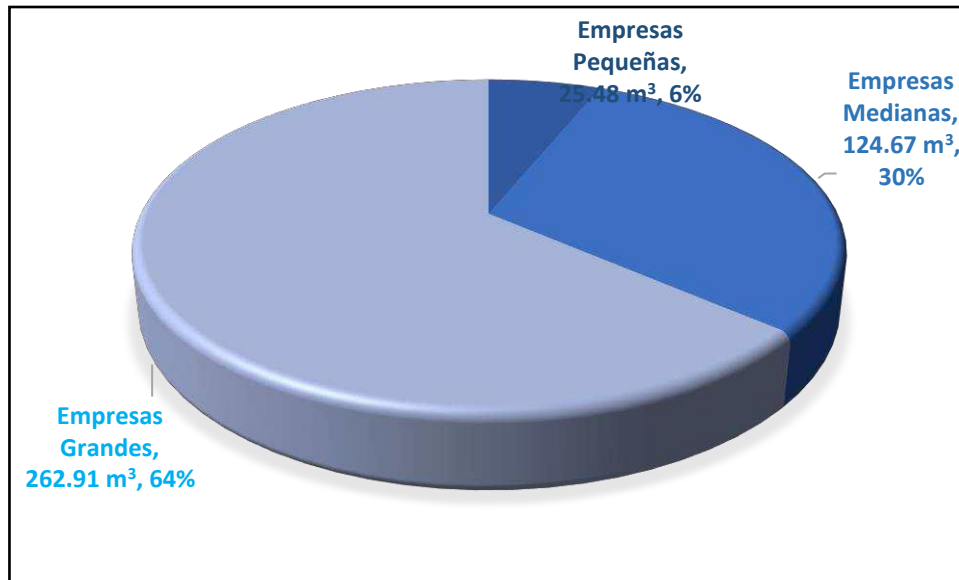


FIGURA 3.15. HH AZUL TOTAL DE UNA TONELADA DE PIEL BOVINA CURTIDA AL CROMO EN EL ESTADO DE GTO., SEGÚN LA PONDERACIÓN DE LOS DIFERENTES TIPOS DE EMPRESAS

8) HH Gris total por tipo de empresa: Al realizar la partición de la HH Gris total por diferente tipo de empresa de una tonelada de piel bovina curtida al cromo en el estado de Guanajuato se obtiene la Fig. 3.16.

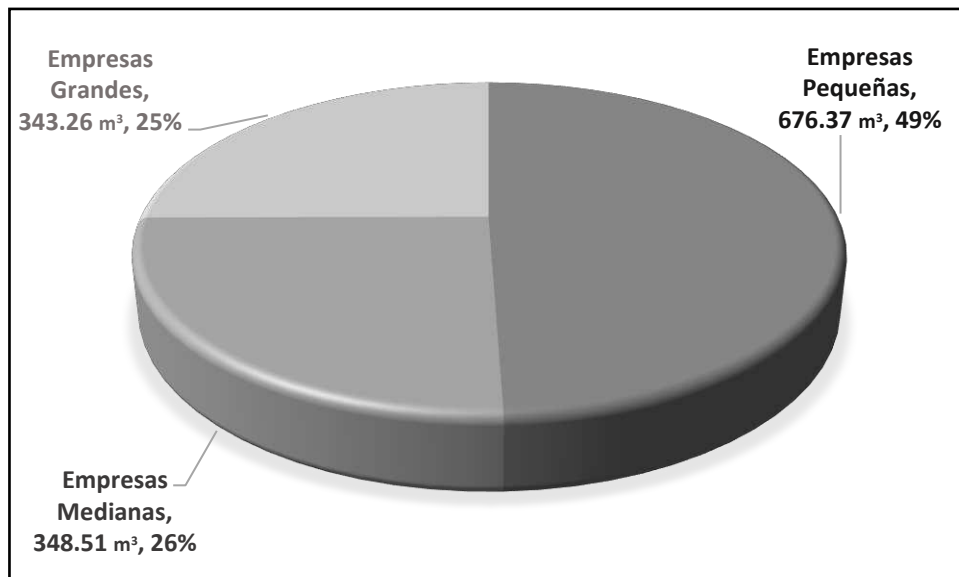


FIGURA 3.16. HH GRIS TOTAL DE UNA TONELADA DE PIEL BOVINA CURTIDA AL CROMO EN EL ESTADO DE GTO., SEGÚN LA PONDERACIÓN DE LOS DIFERENTES TIPOS DE EMPRESAS

De las gráficas anteriores se observa la desagregación en distintas consideraciones respecto de la HH. De la HH total de 12,025 m³ para la obtención de una tonelada de piel bovina curtida al cromo en el estado de Guanajuato, se considera la obtención del insumo principal (piel cruda), incluyendo los requerimientos hídricos del alimento para el ganado, crianza bovina, matanza y procesamiento industrial. De la HH total se observa que la gran mayoría (91%; 10,907.82 m³) corresponde a HH externa, es decir que se genera fuera del estado de Guanajuato, mientras que solo un 9% (11,17.86 m³) de la HH total es generada dentro del estado de Guanajuato (HH interna). Lo anterior nos indica que más del 90% de la HH total está incluida en la cadena de suministro, ya que como se explica en el apartado 3.1.5 la mayor parte de los insumos y sus requerimientos hídricos provienen del exterior de Guanajuato (pienso para ganado, ganado, sacrificio); y menos del 9% corresponde a los requerimientos hídricos propios del proceso (ya que la HH interna contiene también una pequeña porción que considera el alimento, ganado y sacrificio que se realiza dentro del estado de Gto.).

Si se desagrega la HH total (12,025 m³) dependiendo del lugar de origen, se tiene que el 45% (5,381.95 m³) corresponde a HH generada en Norteamérica (Estados Unidos y Canadá), 34% (4,107.19 m³) corresponde a México (exceptuando el estado de Guanajuato), 9% (1,069.63 m³) a Centro y Sudamérica, 3% (349.04 m³) a Europa y el mismo 9% correspondiente a Guanajuato (HH interna). Como se explica en el apartado 3.5.1, la una mayor parte de los insumos importados provienen de Norteamérica, mientras que también un muy alto porcentaje de insumos son generados en México.

Al realizar una partición de la HH total (12,025 m³) entre la HH directa (HH del proceso industrial) y la HH indirecta (HH de los insumos) se tienen porcentajes similares a los de las HH interna y externa. Se tiene que la HH del proceso es del 7% (852.55 m³), mientras que la HH de los insumos representa el 93% (11,173.13 m³), de manera que la gran mayoría de los requerimientos hídricos para este producto industrial se encuentran a lo largo de la cadena de suministro, representando el proceso industrial tan solo un pequeño porcentaje de la totalidad.

4. 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, ya sea para tomar decisiones respecto de puntos críticos de consumo o contaminación de agua, para identificar procesos que requieran una mayor eficiencia en el uso de agua, identificar el origen de la HH y así ponderar cuantitativamente la influencia del uso de los recursos hídricos del sistema en el nivel de explotación de una cuenca o una región determinada influyendo 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.

La metodología de cálculo de HH presentada, se diferencia de las existentes al acoplar tipo de empresa, tecnologías disponibles y región geográfica delimitada. Abarca a mayor detalle un sistema de producción delimitado, por lo que, al acoplarse los elementos mencionados anteriormente 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 conlleva la implementación de acciones específicas para la disminución y mejora de la HH de un determinado producto.

Al realizar la HH de una tonelada de piel bovina curtida al cromo es de resaltar que la HH indirecta o del insumo principal el cual es la piel cruda representa un 93% de la HH total de la piel bovina curtida al cromo. Sin embargo, ese 93% de HH tan solo representa un 20.40% de la HH del ganado, siendo la carne de canal el subproducto que mayor peso tiene en la HH del ganado con un 69.33%. Es de resaltar el gran volumen de HH generada a lo largo de la crianza de una cabeza de ganado hasta su sacrificio.

Comparando los volúmenes de HH azul (413.06 m^3) y HH gris ($1,368.14 \text{ m}^3$) totales se observa que la HH gris es más de tres veces superior a la HH azul. Por lo anterior se concluye que a lo largo de la cadena de producción de la piel curtida al cromo es más crítico el grado de contaminación que el

volumen de agua azul requerido para las distintas etapas de la cadena productiva. La HH verde, referida al agua de lluvia representa el 85% de la HH total, debido a su origen, generalmente no se contabiliza en los cálculos típicos de HH o agua virtual aun cuando cuantitativamente es de gran relevancia. A pesar de tratarse de agua de escorrentía es importante distinguirla dentro del cálculo para integrar un mejor análisis y respuesta ante el interés de reducir la HH. También, al ser agua predominantemente en la agricultura deriva en la generación de la HH gris en caso de que se usen pesticidas o agroquímicos en el proceso. De igual forma al evaluar la HH verde a través del tiempo es posible realizar análisis cualitativos que permitan una reducción de los recursos hídricos azules.

Se observa en la HH azul de la industria del curtido para una tonelada piel curtida al cromo aplicable al estado de Guanajuato, Méx., 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 considerablemente 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 uso de agua, mientras que el subproceso de acabado presenta estándares de baja eficiencia en cuanto a uso de agua.

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.

Respecto de la HH gris el contaminante cromo resultó como el más crítico dentro del proceso, al evaluar su HH gris respecto a la de los otros contaminantes y resultar esta la más elevada de todas (Tabla 3.8), sin embargo, también es de poner atención en la caracterización de grasas, ya que generan una HH gris cercana a la del cromo (2098.43 y 2664.44 m³/ton respectivamente). La HH gris del proceso se ve reducida también significativamente al integrar el volumen de agua tratado, sin embargo, se detectó en el trabajo de campo que el tratamiento de aguas residuales no es una práctica adoptada por todas las empresas incluyendo las grandes, sino que se ha debido al esfuerzo y colaboración entre sector industrial y gobierno para que los efluentes industriales sean tratados en

plantas de tratamiento industrial para gestión específica del sector curtido. Existen aún efluentes pertenecientes al sector que no son tratados correctamente, lo que genera que el volumen de HH gris perteneciente al sector curtido sea mucho mayor comparándolo con el volumen de HH azul (852.55 y 11.29 m³/ton respectivamente). Alternativas encaminadas a una reducción de HH gris es el curtido de alto agotamiento de cromo y precipitación y reúso de cromo para los procesos en los diferentes tipos de empresas, así como una mayor focalización de apoyos y regulación de efluentes de empresas micro y pequeñas.

Al analizar el impacto que tienen las empresas de acuerdo con su clasificación dentro de la HH total tenemos que las empresas grandes del sector representan un mayor porcentaje de la HH total (58%) con 7020.73 m³, mientras que las medianas representan el 30% (3551.01 m³), y las pequeñas solamente el 12% (1453.94 m³). Esto a pesar de que las empresas grandes no contribuyen demasiado a la HH gris del proceso, sin embargo, al abarcar el 62% del volumen total de la producción las empresas grandes participan en gran medida dentro de la HH total debido a que se toma en cuenta la HH de la materia prima requerida para sus procesos. Lo mismo sucede con las HH verde y azul total. Sin embargo, al analizar la HH gris total se observa que su impacto dentro de la misma es de 25% (343.26 m³), siendo las empresas pequeñas las que aportan la mayor parte de esta HH gris con el 49%. Se concluye que la baja de la HH gris por parte de las grandes empresas con respecto a la HH gris y verde y el alta de la HH gris por parte de las pequeñas empresas responde a que las grandes empresas cuentan con tecnologías, regulaciones y apoyos por parte del gobierno estatal y municipal para el tratamiento de agua. Sin embargo, no sucede lo mismo con las pequeñas empresas y parte de las medianas debido a falta de regulación, apoyos y acceso a tecnologías de tratamiento de agua.

Es importante que las empresas pequeñas y medianas cuenten a la vez con apoyo y regulación que les permita reducir su uso y consumo de agua en el proceso, la transición hacia tecnologías más limpias y buenas prácticas dentro del proceso es fundamental para una mejor eficiencia hídrica dentro del proceso industrial. Se encontró que, dentro de estas prácticas, las más efectivas y susceptibles de aplicación en dichos procesos industriales son la recirculación de baños de pelambre en el proceso de ribera y la recirculación directa o indirecta de baños de cromo en el proceso de curtido.

La formulación de respuestas puede incluir políticas, planes, programas y proyectos a largo, mediano y corto plazo con distintos niveles de inversión, que conforman un portafolio para que el sector industrial del curtido reduzca su HH. Se pueden incluir los arreglos institucionales necesarios para llevar a cabo iniciativas de respuesta o reducción de la HH, así como potenciales fuentes de financiamiento.

Al desagregar la HH total en distintos componentes se encuentra que la HH indirecta resulta ser un consumo hídrico “oculto”, ya que se localiza en etapas previas a la de la producción industrial. Al representar un porcentaje tan alto de la HH total es de remarcar la importancia que tienen los insumos en el consumo hídrico del producto.

Al contabilizar la HH del sector curtido, las empresas podrán entregar a los consumidores, comunidad gobierno e inversores, una serie de datos cuantitativos que permite comparar los impactos provocados a nivel social y ambiental, mejorando así la toma de decisiones.

Es recomendable el estudio de HH de otros sectores industriales, agropecuarios y de servicios importantes en la región.

Los elementos que otorga la presente HH nos permiten establecer una formulación de respuesta importante que no solo son traducidas en mejoras en la gestión hídrica de las empresas o el proceso en sí, sino en propuestas que permitan instaurar políticas y regulaciones, de acuerdo con la situación real del proceso industrial del curtido.

5. REFERENCIAS

AgroDer. (2012). Huella hídrica en México en el contexto de Norteamérica. México DF: WWF México y AgroDer.

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 Resour Manage* (24), 941-958. doi:10.1007/s11269-009-9480-8

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 Resour Manage* (24), 941-958. doi:10.1007/s11269-009-9480-8.

Álvarez-Castañón, L. d. (Agosto de 2014). Gestión tecnológica de agua en empresas curtidoras: sistema de monitoreo de variables ambientales. *Revista Gestión de las Personas y Tecnología*(20), 28-40.

Álvarez-Castañón, L. d. (Agosto de 2014). Gestión tecnológica de agua en empresas curtidoras: sistema de monitoreo de variables ambientales. *Revista Gestión de las Personas y Tecnología* (20), 28-40

Alvarez, S. G., Maldonado, M., Gerth, A., & Kusch, P. (2004). Caracterización de Agua Residual de Curtiduría y Estudio del Lirio Acuático en la Recuperación de Cromo. *Información Tecnológica*, 15(3), 75-80. Obtenido de <https://dx.doi.org/10.4067/S0718-07642004000300012>

Carrillo González, G., Azamar Alonso, A., & Cervantes Torre-Marín, G. (26 de Enero de 2017). Innovación tecnológica y curtiduría en el estado de Guanajuato. *Economía Informa*, 402, 66-79. Obtenido de <https://doi.org/10.1016/j.ecin.2017.01.005>

Castillo Borges, E. R., Bolio Rojas, A., Mendez Novelo, R. I., Osorio Rodríguez, J. H., & Pat Canul, R. (2012). Remoción de materia orgánica en aguas residuales de rastro por el proceso de Contactor Biológico Rotacional. *Ingeniería*, 16(2), 83-91.

Centre of Promotion of Sustainable Technologies (CPTS). (2003) *Technical Guide of Cleaner Production for Tanneries*, Program of Danesa Cooperation to the Environment Sector, La Paz. Bolivia.

Centro del Tercer Mundo para el Manejo del Agua A.C. (2001). *La participación de la sociedad civil y los gobiernos locales en el manejo de los recursos hídricos en México: La experiencia del Estado de Guanajuato*.

Chapagain, A. K., & Hoekstra, A. Y. (2003). *Virtual Water Flows Between Nations in Relation to Trade in Livestock and Livestock Products*. Delf: UNESCO-IHE.

Chapagain, A. K., & Hoekstra, A. Y. (2004). *Water Footprints of Nations*. Delf: UNESCO-IHE.

Chapagain, A. K., Hoekstra, A. Y., Savenije, H. H., & 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), 186-203.

CIATEC. (1996). Apéndice Ecológico para la Industria del Cuero. Centro de Investigación y Asesoría Tecnológica en Cuero y Calzado, A.C. León, Gto.: Comité Técnico para la Normalización de Residuos de Cuero.

Comisión de Cuenca del Río Turbio. (s.f.). Comisión Estatal del Agua. Recuperado el 14 de mayo de 2016, de http://agua.guanajuato.gob.mx/cuenca_turbio.php

Comisión Estatal del Agua. (2014). Tecnologías más limpias en la industria de la curtiduría en la ciudad de León, Gto. Gobierno del Estado de Guanajuato.

De Miguel, A., Hoekstra, A.Y. and García-Calvo, E. (2015) Sustainability of the water footprint of the Spanish pork industry, *Ecological Indicators*, 57: 465-474.

Dixit, S., Yadav, A., Dwivedi, P. D., & Das, M. (2015). Toxic hazards of leather industry and technologies to combat threat: a review. *Journal of Cleaner Production*, 87, 39–49. <http://doi.org/10.1016/j.jclepro.2014.10.017>

FAO. (2013). World Statistical Compendium for raw hides and skins, leather and leather footwear 1993-2012. Food and Agriculture Organization of the United Nations.

FAO. (2016). FAOSTAT. Obtenido de FAO STATISTICS: [ww.fao.org/faostat/en/#data/QA](http://www.fao.org/faostat/en/#data/QA)

Floqui, T., Daut V. & Illirian M (2007). Identification and evaluation of water pollution from Albanian tanneries. *Desalination*, volume 213. Issues 1-3 pages 56-64.

Gerbens-Leenes, P. W., & Hoekstra, A. Y. (2009). The Water Footprint of Sweeteners and Bio-Ethanol from Sugar Cane, Sugar Beet and Maize. Delf, the Netherlands: UNESCO-IHE.

Guevara, A. (19 de Febrero de 2016). CICUR. (I. Arroyo, Entrevistador)

Gutterres. M., Aquim, P. , Passos J.B, Severo, L., & Trierweiler, J. (2008). Reduction of Water Demand And Treatment Cost In Tanneries Through Reuse Technique. *The Journal of the American Leather Chemist Association*. V. 1, P. 138-143.

Hoekstra, A. Y., Chapagain, A. K., Aldaya, M. M., & Mekonnen, M. M. (2011). *The Water Footprint Assessment Manual: Setting the Global Standard*. London, England: Earthscan.

IMTA, SEMARNAT. (2009). Estrategia general para el rescate ambiental y sustentabilidad de la cuenca Lerma-Chapala. IMTA, SEMARNAT.

Ilou I., Souabi S. & Digua K. (2012) Quantification of Pollution Discharges from Tannery Wastewater and Pollution Reduction by Pre-Treatment Station. *International Journal of Science and Research*. 2319-7064.

INEGI. (Abril de 2015). Directorio Estadístico Nacional de Unidades Económicas. Obtenido de <https://www.inegi.org.mx/app/mapa/denue/default.aspx>

INEGI. (2016). INEGI. Recuperado el 2016, de INEGI Agricultura Ganadería y Pesca: <https://www.inegi.org.mx/datos/?t=0010000000000000>

Instituto de Planeación Estadística y Geográfica Guanajuato. (s.f.). iplaneg.guanajuato.gob.mx. Recuperado el 10 de mayo de 2016, de <http://iplaneg.guanajuato.gob.mx/informacion-del-sector>

Instituto Municipal de Planeación León. (2013). Diagnóstico Ambiental Municipio de León, Gto. León: H. Ayuntamiento de León.

International Organization for Standardization. (2014). ISO 14046 Environmental management, Water footprint-Principles, requirements and guidelines. ISO.

International Organization for Standardization. (2014). ISO 14046 Environmental management, Waterfootprint-Principles, requirements and guidelines. ISO.

Kongjao, S., S. Damronglerd & M Hunson. (2008). Simultaneous removal of organic and inorganic pollutants in tannery wastewater using electrocoagulation technique. *Korean J. Chem. Eng.*, 25:703-709.

Mekonnen, M. M., & Hoekstra, A. Y. (2012). A Global Assessment of the Water Footprint of Farm Animal Products. *Ecosystems*, 15, 401-4015. doi:10.1007/s10021-011-9517-8

Mexican Business Web. (24 de marzo de 2014). mexicanbusinessweb.mx. Industria curtidora con mayor potencial de crecimiento. (M. B. Web, Ed.) Ciudad de México, México. Obtenido de <http://www.mexicanbusinessweb.mx/negocios-rentables-en-mexico/guanajuato-supera-al-norte-en-atractivo-de-inversion/>

Milà, L., Domènech, X., Rieradevall, J., Puig, R., & Fullana, P. (2002). Catalan Eco-label of Leather LCA Case Studies Use of Life Cycle Assessment in the Procedure for the Establishment of Environmental Criteria in the Catalan Eco-label of Leather, 7(1), 39–46.

Nacameh, 2(1), 1-24. Obtenido de <http://cbs.izt.uam.mx/nacameh/>

Pacheco Vega, R. (2004). Historia de dos ciudades: Un análisis comparativo de los distritos industriales del cuero y calzado en León y Guadalajara. CIATEC. León, Gto.: CIATEC, A.C.

Puig, R., Notarnicola, B., & Raggi, A. (2008). *Industrial Ecology in the Cattle-to-Leather Supply Chain*. Milano, Italy: FrancoAngeli.

Ramírez, M. A. (9 de mayo de 2016). Planta desbaste SAPAL. (I. Arroyo Tena, Entrevistador) León, Guanajuato, México.

Reyes-Gutiérrez, L. R., Romero-Guzmán, E. T., Olmos-Salinas, M. G., & Rodríguez-Castillo, R. (2009). Chemical species of chromatite of an industrial landfill in the León valley, Guanajuato, Mexico.

Revista Mexicana de Ciencias Geológicas, 26(1), 104-116.

SabMiller Plc, WWF-UK. (2010). Water Footprinting-Identifying & Addressing Water Risks in the Value Chain. England.

SAPAL. (2009). El agua en León. Un encuentro con el futuro. Sistema de Agua Potable y Alcantarillado de León. Ciudad de México: Transcontinental.

SAPAL. (2018). Sistema de Agua Potable y Alcantarillado de León. Recuperado el 05 de Diciembre de 2018, de SAPAL Web site: <http://www.sapal.gob.mx/noticia/226>

Secretaría de Economía. (2013). Industria del Cuero. Recuperado el Mayo de 2017, de http://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/3418/SE_cuero_ind_ligera.pdf

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.

SEMARNAT. (23 de Abril de 2003). Norma Oficial Mexicana NOM-001-SEMARNAT-1996.

SEMARNAT. (23 de Abril de 2003). Norma Oficial Mexicana NOM-001-SEMARNAT-1996.

Signorini, M. (Junio de 2008). Rastros municipales y su impacto en la salud pública.

Sistema Nacional de Información e Integración de Mercados. (Abril de 2018). Sistema Nacional de Información e Integración de Mercados (SNIIM) y sus sistemas informativos. Recuperado el Abril de 2018, de <http://www.economia-sniim.gob.mx/2010prueba/Bovinos.asp>

Sotelo, J. A., Olcina, J., Tolón, A., García, J. M., Sotelo, M., Jefferies, I., . . . Hoekstra, A. Y. (2012). Water footprint and life cycle assessment as approaches to assess potential impacts of products on water consumption: Key learning points from pilot studies on tea and margarine. *Journal of Cleaner Production*, 33, 2086-2112.

Steinfeld, H., Gerber, P., Wassenaar, T., Castel, V., Rosales, M., & de Haan, C. (2006). *La larga sombra del ganado problemas ambientales y opciones*. Roma: FAO LEAD.

Tamilchelvan P., Dhinakaran M, (2012) Anaerobic Digestion Treatment of Tannery Waste Water, *International Journal of Engineering Research and Applications*, Vol. 2, Issue 3, May-Jun 2012, pp.932-936.

UNIDO. (2003). *Pollutants in Tannery Effluent*. United Nations Industrial Development Organization, Technical Information on Industrial Processes, Viena.

UNIDO. (2011). *Introduction to treatment of tannery effluents. What every tanner should know about effluent treatment*. Vienna: UNIDET NATIONS INDUSTRIAL DEVELOPMENT ORGANIZATION.

USAID. (2006). *Manual de Buenas Prácticas Ambientales para la Curtiembre en Centroamérica*. United States Agency International Development.

USAID. (2006). Manual de Buenas Prácticas Ambientales para la Curtiembre en Centroamérica. United States Agency International Development.

USDA. (2016). U.S. DEPARTMENT OF AGRICULTURE DATA. Obtenido de <https://www.usda.gov/topics/data>

Vašková, H., & Kolomazník, K. (2016). Spectroscopic measurement of trivalent and hexavalent chromium. 17th International Carpathian Control Conference (ICCC), (págs. 775-778).

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. <http://doi.org/10.1007/s11269-010-9724-7>.

Vidaurre Ramírez, J. F., & Morgan, B. J. (Enero de 2011). La sustentabilidad en la industria de la curtiduría y su relación con el entorno urbano. El caso de León, Guanajuato, México. *Investigación y Ciencia*(51), 25-32.

Yang, Y., Klaus, H., Kuishuang, F., & Dabo, G. (2010). Assessing regional and global water footprints for the UK. *Ecological Economics*(69), 1140-1147.

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), 245-253.

6. ANEXOS

Anexo 1 Análisis mensual de agua residual Planta de Desbaste SAPAL entrada (SAPAL, 2016)

REG	TIPO	PROCEDENCIA	PUNTO DE MUESTREO	FECHA DE MUESTREO	TEMP °C	PH unidades de pH	CONDUCTIVIDAD Us/cm	SST (mg/L)	GRA (mg/L)	NTK (m g/L) TOTAL	NTK (mg/L) AMONICAL	DQO (mg/L)	DBO (mg/L)	SULFUROS (mg/L)	CROMO (mg/L)
1283	PTD	PLANTA DE DESBASTE	ENTRADA	2016-03-01	13	9.74	24600	3160	772.59	595.4	243.4	7427.793	3850.00	518.8	37.7800
1314	PTD	PLANTA DE DESBASTE	ENTRADA	2016-03-02	14	9.68	23200	3200	821.87	610.5	261.2	9683.353	3383.23	322.9	36.7400
1347	PTD	PLANTA DE DESBASTE	ENTRADA	2016-03-03	15	9.46	16290	950	267.78	704.1	298.4	9538.908	3860.00	*	20.8600
1370	PTD	PLANTA DE DESBASTE	ENTRADA	2016-03-04	17	9.68	18900	4967	742.00	719.0	316.4	10322.243	4263.47	*	58.8700
1387	PTD	PLANTA DE DESBASTE	ENTRADA	2016-03-05	*	*	*	5300	1144.22	644.1	250.5	9072.240	> 6600.00	333.5	69.8100
1392	PTD	PLANTA DE DESBASTE	ENTRADA	2016-03-07	17	9.78	18300	3567	682.49	703.3	258.9	8661.128	4320.00	320.4	29.1400
1399	PTD	PLANTA DE DESBASTE	ENTRADA	2016-03-06	*	*	*	6633	1302.11	627.8	306.8	10558.333	4400.00	296.6	107.8000
1428	PTD	PLANTA DE DESBASTE	ENTRADA	2016-03-08	22	9.38	22500	7000	1350.54	719.4	246.9	14358.333	4750.00	209.9	104.4000
1460	PTD	PLANTA DE DESBASTE	ENTRADA	2016-03-09	13	11.43	20500	5700	1313.18	634.5	238.5	12461.136	4660.00	296.2	56.5500
1483	PTD	PLANTA DE DESBASTE	ENTRADA	2016-03-10	8	9.47	16060	3300	654.33	436.0	205.7	7075.000	3395.21	*	35.5400
1508	PTD	PLANTA DE DESBASTE	ENTRADA	2016-03-11	17	9.46	21300	10133	464.56	866.3	302.6	8522.239	> 6600.00	227.4	118.6000
1532	PTD	PLANTA DE DESBASTE	ENTRADA	2016-03-12	*	*	*	3833	928.78	618.8	283.9	7055.570	2940.00	246.2	60.4200
1541	PTD	PLANTA DE DESBASTE	ENTRADA	2016-03-13	*	*	*	4600	1039.47	730.5	295.9	9294.463	4383.23	201.5	70.4000
1571	PTD	PLANTA DE DESBASTE	ENTRADA	2016-03-14	20	9.55	21110	8800	1954.69	839.1	329.6	13141.667	> 6600.00	478.3	151.9000
1584	PTD	PLANTA DE DESBASTE	ENTRADA	2016-03-15	16	9.77	18130	8600	1371.39	796.9	268.2	12483.333	4700.00	349.9	100.5000
1616	PTD	PLANTA DE DESBASTE	ENTRADA	2016-03-16	14	10.02	19100	6233	514.46	724.7	258.6	20483.333	5110.00	620.9	65.4900
1641	PTD	PLANTA DE DESBASTE	ENTRADA	2016-03-17	13	9.35	20400	6133	168.55	651.4	294.7	12658.333	3930.00	153.8	91.8600
1668	PTD	PLANTA DE DESBASTE	ENTRADA	2016-03-18	14	9.63	17270	6833	376.93	587.0	288.7	9508.333	3980.00	626.9	59.5700
1692	PTD	PLANTA DE DESBASTE	ENTRADA	2016-03-19	*	*	*	5267	68.69	839.8	312.7	10750.000	5170.00	338.3	66.6500
1697	PTD	PLANTA DE DESBASTE	ENTRADA	2016-03-20	*	*	*	7300	741.88	803.7	346.4	12950.000	5830.00	239.1	126.4000
1702	PTD	PLANTA DE DESBASTE	ENTRADA	2016-03-21	*	*	*	9200	1187.07	1019.3	358.5	14783.333	> 6600.00	424.5	90.7600
1721	PTD	PLANTA DE DESBASTE	ENTRADA	2016-03-22	*	*	*	4233	1260.98	563.9	270.6	9250.000	3772.46	*	43.1700
1750	PTD	PLANTA DE DESBASTE	ENTRADA	2016-03-23	*	*	*	4800	1365.82	835.3	318.8	7511.126	5440.00	54.1	74.8100
1773	PTD	PLANTA DE DESBASTE	ENTRADA	2016-03-24	*	*	*	4133	1417.12	645.9	384.9	9775.000	3590.00	267.8	108.9000
1778	PTD	PLANTA DE DESBASTE	ENTRADA	2016-03-25	*	*	*	1740	514.89	555.4	370.5	6872.236	2870.00	208.8	62.4300
1783	PTD	PLANTA DE DESBASTE	ENTRADA	2016-03-26	*	*	*	14967	2555.80	1198.3	407.5	29816.667	> 6600.00	325.4	289.1000
1788	PTD	PLANTA DE DESBASTE	ENTRADA	2016-03-27	*	*	*	7733	2555.80	895.9	421.0	18758.333	> 6600.00	*	97.2000
1801	PTD	PLANTA DE DESBASTE	ENTRADA	2016-03-28	24	8.84	28477	7333	2164.39	787.0	390.9	12116.667	5180.00	193.0	106.0000
1831	PTD	PLANTA DE DESBASTE	ENTRADA	2016-03-29	19	9.27	25000	3867	1371.80	580.4	217.7	8850.000	4610.00	*	54.9500
1854	PTD	PLANTA DE DESBASTE	ENTRADA	2016-03-30	19	9.45	21000	5300	846.13	577.4	216.5	11733.333	6268.66	433.1	43.4700
1888	PTD	PLANTA DE DESBASTE	ENTRADA	2016-03-31	22	9.43	18600	11967	1306.84	1107.7	421.0	15875.000	5350.00	306.4	104.2000

Anexo 2 Análisis mensual de agua residual Planta de Desbaste SAPAL salida (SAPAL, 2016)

REG	TIPO	PROCEDENCIA	PUNTO DE MUESTREO	FECHA DE MUESTREO	TEMP °C	PH unidades de pH	CONDUCTIVIDAD Us/cm	SST (mg/L)	GRA (mg/L)	NTK (mg/L) TOTAL	NTK(mg/L) AMONIACAL	DQO (mg/L)	DBO (mg/L)	SULFUROS (mg/L)	CROMO (mg/L)
1284	PTD	PLANTA DE DESBASTE	SALIDA	2016-03-01	20	8.13	12450	250	< 9.23	320.3	300.4	933.333	290.00	*	0.8275
1315	PTD	PLANTA DE DESBASTE	SALIDA	2016-03-02	20	8.19	13920	200	< 9.23	345.8	315.2	693.333	280.36	10.2	0.9422
1348	PTD	PLANTA DE DESBASTE	SALIDA	2016-03-03	18	7.89	14850	170	12.46	337.1	296.0	1037.500	332.00	13.8	0.7812
1371	PTD	PLANTA DE DESBASTE	SALIDA	2016-03-04	17	8.13	15200	80	11.59	353.5	318.8	738.000	1070.46	18.1	0.5106
1388	PTD	PLANTA DE DESBASTE	SALIDA	2016-03-05	*	*	*	175	13.71	366.7	333.2	875.833	676.16	29.4	0.8098
1393	PTD	PLANTA DE DESBASTE	SALIDA	2016-03-07	19	8.11	14510	300	12.62	348.6	312.8	1611.667	272.86	16.6	1.1530
1400	PTD	PLANTA DE DESBASTE	SALIDA	2016-03-06	*	*	*	220	10.08	389.4	352.3	830.833	293.00	18.2	0.9205
1429	PTD	PLANTA DE DESBASTE	SALIDA	2016-03-08	24	7.99	14520	440	17.63	360.9	320.0	833.333	135.57	5.1	1.8940
1461	PTD	PLANTA DE DESBASTE	SALIDA	2016-03-09	16	8.42	15620	670	28.47	371.4	316.4	1150.000	566.00	26.8	2.7910
1484	PTD	PLANTA DE DESBASTE	SALIDA	2016-03-10	11	8.48	15600	1150	66.34	406.0	298.3	1425.833	720.72	*	5.3910
1509	PTD	PLANTA DE DESBASTE	SALIDA	2016-03-11	17	8.28	14080	155	12.96	297.3	256.2	691.000	170.00	*	0.6126
1533	PTD	PLANTA DE DESBASTE	SALIDA	2016-03-12	*	*	*	760	44.51	342.6	276.7	2075.000	289.36	11.6	4.7680
1542	PTD	PLANTA DE DESBASTE	SALIDA	2016-03-13	*	*	*	340	19.68	310.9	274.3	781.667	387.00	6.1	2.2740
1572	PTD	PLANTA DE DESBASTE	SALIDA	2016-03-14	25	8.00	13520	196	10.04	300.3	292.3	492.667	439.28	6.4	0.9446
1585	PTD	PLANTA DE DESBASTE	SALIDA	2016-03-15	20	8.32	11450	140	< 9.23	315.8	262.2	736.667	82.00	8.0	0.6826
1617	PTD	PLANTA DE DESBASTE	SALIDA	2016-03-16	21	8.04	14790	460	16.74	353.3	304.3	1074.167	182.91	5.6	2.1300
1642	PTD	PLANTA DE DESBASTE	SALIDA	2016-03-17	19	7.99	15570	360	< 9.23	374.2	306.7	853.333	216.00	8.9	1.4970
1669	PTD	PLANTA DE DESBASTE	SALIDA	2016-03-18	19	8.22	15370	320	13.71	359.7	294.7	1020.000	356.00	12.0	1.2640
1693	PTD	PLANTA DE DESBASTE	SALIDA	2016-03-19	*	*	*	220	32.01	356.7	327.2	1312.500	368.82	*	0.9157
1698	PTD	PLANTA DE DESBASTE	SALIDA	2016-03-20	*	*	*	540	20.67	399.6	352.4	1441.667	472.26	15.6	1.2670
1703	PTD	PLANTA DE DESBASTE	SALIDA	2016-03-21	*	*	*	150	12.07	395.0	336.8	1250.833	349.33	13.4	0.5730
1722	PTD	PLANTA DE DESBASTE	SALIDA	2016-03-22	*	*	*	225	< 9.23	381.5	335.6	1058.333	276.00	20.3	0.7841
1751	PTD	PLANTA DE DESBASTE	SALIDA	2016-03-23	*	*	*	153	< 9.23	373.9	346.4	1036.667	282.00	*	0.7021
1774	PTD	PLANTA DE DESBASTE	SALIDA	2016-03-24	*	*	*	235	10.35	380.3	324.8	1272.500	395.80	16.0	0.9850
1779	PTD	PLANTA DE DESBASTE	SALIDA	2016-03-25	*	*	*	270	< 9.23	383.3	347.6	1443.333	199.40	108.9	0.4718
1784	PTD	PLANTA DE DESBASTE	SALIDA	2016-03-26	*	*	*	38	< 9.23	374.3	328.4	833.333	57.76	26.8	0.3109
1789	PTD	PLANTA DE DESBASTE	SALIDA	2016-03-27	*	*	*	62	< 9.23	337.5	312.7	1079.167	39.59	18.2	0.3512
1802	PTD	PLANTA DE DESBASTE	SALIDA	2016-03-28	24	8.29	11100	116	< 9.23	309.7	312.7	817.239	21.60	2.5	0.2662
1832	PTD	PLANTA DE DESBASTE	SALIDA	2016-03-29	24	8.14	13780	92	< 9.23	356.4	318.8	795.000	225.00	4.7	0.3465
1855	PTD	PLANTA DE DESBASTE	SALIDA	2016-03-30	23	8.16	16700	160	9.24	374.4	306.7	1608.333	514.24	15.6	0.5901
1889	PTD	PLANTA DE DESBASTE	SALIDA	2016-03-31	24	8.10	15900	93	< 9.23	326.6	285.1	1893.333	431.78	15.4	1.0510

Anexo 3 HH promedio de cultivos relacionados a la alimentación ganadera para países seleccionados (m³/ton)
(1996-2005). Adaptada de (Mekonnen & Hoekstra, 2010).

Alimento	Componente de la HH	México	Estados Unidos	Brasil	Alemania	Promedio Mundial
Trigo	Verde	1021	1842	1850	608	1277
	Azul	318	88	9		342
	Gris	203	227	129	178	207
Cebada	Verde	941	908	1411	499	1213
	Azul	376	204	7		79
	Gris	120	145	139	194	131
Maíz	Verde	1490	523	1619	440	947
	Azul	62	63	1	20	81
	Gris	308	176	124	118	194
Sorgo	Verde	2953	2990	3344	2509	4306
	Azul	59	61	164	84	57
	Gris	302	309	141	128	115
Yuca	Verde	529	471	433	394	550
	Azul			1		
	Gris	22	22	17	29	13
Remolacha azucarera	Verde	49	67	39	60	82
	Azul	26	37	59	3	26
	Gris	14	20	12	21	25
Soja	Verde	1629	1562	2186	1533	2037
	Azul	98	92	1	23	70
	Gris	10	10	15	11	37
Canola	Verde	2567	2743	2771	1155	1703
	Azul	4	3	2	1	231
	Gris	341	360	98	259	336
Ajonjolí	Verde	1352	1296	1813	1272	1690
	Azul	81	76	1	19	58
	Gris	8	8	12	9	31
Semilla de algodón	Verde	425	388	648	245	471
	Azul	195	169	52	178	270
	Gris	48	68	81	53	91
Cultivos forrajeros	Verde	117	244	158	131	207
	Azul	33	44	148		27
	Gris	11	35	7	30	20
Pastura	Verde	174	372	307	131	315
	Azul					
	Gris					

Anexo 4 Componentes de la HH de una unidad de ganado bovino promedio. Adaptada de (Mekonnen & Hoekstra, 2010).

Alimento	Alimento consumido (kg/kg de carcasa bovina)	Ponderación promedio de la HH del alimento (l/kg alimento)			HH del animal (l/kg de carcasa bovina)			
		Verde	Azul	Gris	Verde	Azul	Gris	Total
Maíz	1.0102	695	111	181	702	112	182	996
Trigo	0.2441	1322	77	140	323	18.8	34.0	375
Cebada	0.2657	1143	59	126	304	15.6	33.4	353
Preparado de soja	0.1858	1451	72	19	270	13.4	3.6	286
Sorgo	0.1028	1228	130	92	126	13.4	9.5	149
Avena	0.0603	1457	212	125	87.8	12.8	7.6	108
Arroz	0.0754	997	250	165	75.1	19.6	12.4	107
Yuca	0.1451	498	0	12	72.3	0.0	1.8	74.1
Oleaginosas	0.0275	2158	37	50	59.4	1.0	1.4	61.7
Colza	0.0479	977	132	151	46.8	6.3	7.2	60.4
Centeno	0.0233	1573	38	109	36.7	0.9	2.5	40.1
Mijo	0.0107	2718	130	172	29.0	1.4	1.8	32.2
Cereales no especificados	0.0308	874	66	41	26.9	2.0	1.3	30.2
Preparado de semilla de girasol	0.0249	968	63	98	24.1	1.6	2.4	28.1
Legumbres no especificadas	0.0132	1133	307	618	15.0	4.1	8.2	27.2
Melaza	0.0597	311	110	29	18.6	6.6	1.7	26.9
Maní	0.0171	1265	121	106	21.7	2.1	1.8	25.6
Soja	0.0140	1744	41	24	24.5	0.6	0.3	25.4
Patatas	0.0796	254	10	48	20.2	0.8	3.8	24.9
Preparado de semilla de algodón	0.0280	481	259	86	13.5	7.3	2.4	23.1
Semilla de algodón	0.0181	618	353	124	11.2	6.4	2.2	19.8
Guisantes	0.0126	1149	21	336	14.4	0.3	4.2	18.9
Semillas de girasol	0.0054	2744	144	234	14.8	0.8	1.3	16.9
Caña de azúcar	0.0698	171	35	16	11.9	2.5	1.1	15.5
Plátano	0.0091	1392	27	3	12.7	0.2	0.0	13.0
Frijol seco	0.0029	3270	48	575	9.4	0.1	1.6	11.1
Colza	0.0049	1877	3	305	9.3	0.0	1.5	10.8
Vegetales frescos no especificados	0.0369	152	49	69	5.6	1.8	2.5	10.0
Preparado de copra	0.0046	1567	2	10	7.2	0.0	0.0	7.2
Patatas dulces	0.0170	285	7	57	4.8	0.1	1.0	5.9
Ñame	0.0166	326	0	1	5.4	0.0	0.0	5.5
Preparado de palma	0.0075	659	0	27	4.9	0.0	0.2	5.2
Dátiles	0.0009	2397	2074	97	2.1	1.8	0.1	4.0
Preparado de ajonjolí	0.0015	2111	53	53	3.1	0.1	0.1	3.3
Betabel	0.0165	154	16	30	2.5	0.3	0.5	3.3
Semillas oleaginosas no especificadas	0.0024	802	94	35	2.0	0.2	0.1	2.3

Alimento	Alimento consumido (kg/kg de carcasa bovina)	Ponderación promedio de la HH del alimento (l/kg alimento)			HH del animal (l/kg de carcasa bovina)			
		Verde	Azul	Gris	Verde	Azul	Gris	Total
Otros cultivos para forraje	0.0122	325	66	40	3.9	0.8	0.5	5.2
Residuos de cultivos	21.943	0	0	0	0.0	0.0	0.0	0.0
Cultivos forrajeros	2.4632	168	29	21	415	71.8	50.7	537
Pastos	31.525	303	0	0	9556	0.0	0.0	9556
Agua para la mezcla de alimentos						1.5		1.5
HH relativa a la alimentación					12391	314	388	13107
Agua de consumo directo del animal						110		110
Agua para servicios de crianza						29		29
HH total de una cabeza de ganado bovino (l/kg de carcasa bovina)					12391	453	388	13246
HH total de una cabeza de ganado bovino de 253 kg asumiendo una carcasa bovina de 143 kg (litros)					1769000	64600	55300	1889000

7. PRODUCTOS DE LA TESIS



DOI:10.24850/j-tyca-2018-06-03

Artículo

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

70

Tecnología y ciencias del agua, 9(5), 70-90, DOI:10.24850/j-tyca-2018-06-03

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 a 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 de 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 procesado 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).

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

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 diferenció 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

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

$$HH_{proceso\ gris} = \frac{Q_{Contam}}{C_{máx} - C_{nat}} \quad (4.1)$$

Para la ecuación (4.1) $C_{máx}$ 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 $C_{máx}$ 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).

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

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

$$Q_{Contam} = \sum_i^0 Q_{Contam}^e \cdot ii_e \quad (4.4)$$

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))

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

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 mostró 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

84

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%.

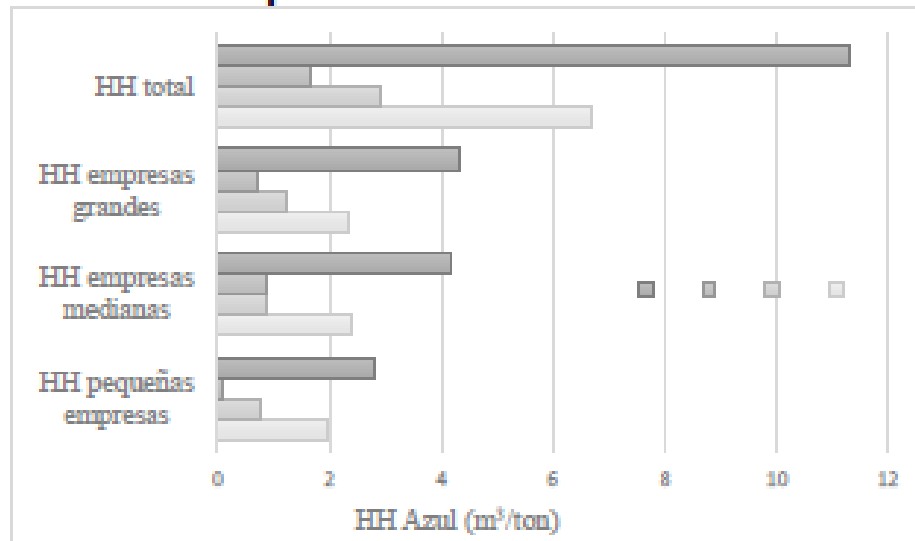
Tabla 2. Uso de agua en los diferentes tipos de empresa e índice de impacto aplicable en el estado de Guanajuato (2015).

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 m^3 del total de la HH azul del proceso, las empresas medianas con 4.19 m^3 y las empresas grandes con 4.31 m^3 .

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 $8.5 \text{ m}^3/\text{ton}$ de cuero fresco con tecnología avanzada hasta $29 \text{ m}^3/\text{ton}$ con tecnología convencional. Para el subproceso de curtido reporta de $3.5 \text{ m}^3/\text{ton}$ a $14 \text{ m}^3/\text{ton}$ y para el proceso de acabado reporta de $0 \text{ m}^3/\text{ton}$ a $2 \text{ m}^3/\text{ton}$ 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>.