

VARIACIÓN DE LA HUELLA HÍDRICA EN PROCESOS INDUSTRIALES SEGÚN EL ALCANCE ESTABLECIDO PARA SU CÁLCULO. EL CASO DE UNA EMBOTELLADORA, UNA CURTIEMBRE Y UNA CERVECERA DE LA PROVINCIA DE SALTA, ARGENTINA

VARIATION OF THE WATER FOOTPRINT IN INDUSTRIAL PROCESSES ACCORDING TO THE SCOPE ESTABLISHED FOR ITS CALCULATION. THE CASE OF BOTTLED WATER, LEATHER TANNING, AND BEER PRODUCTION IN THE PROVINCE OF SALTA, ARGENTINA

MAINARDI-REMIS, Juan Martín¹, **GUTIÉRREZ-CACCIABUE**, Dolores²

Mainardi-Remis, J. M., Gutiérrez-Cacciabue, D. (2024). Variación de la huella hídrica en procesos industriales según el alcance establecido para su cálculo. El caso de una embotelladora, una curtiembre y una cervecera de la Provincia de Salta, Argentina. *Revista INNOVA, Revista argentina de Ciencia y Tecnología*, 14.

¹ Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de Salta (UNSa), Instituto de Ingeniería Civil y Medio Ambiente de Salta (ICMASA), Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET), Argentina / tinchomainardi@gmail.com/ ORCID: <https://orcid.org/0009-0000-7334-9527>

² Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de Salta (UNSa), Instituto de Ingeniería Civil y Medio Ambiente de Salta (ICMASA), Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET), Argentina / dolo83@gmail.com

RESUMEN

La huella hídrica (HH) se utiliza para evaluar el uso del agua. Sin embargo, su cálculo depende del alcance otorgado. Los objetivos de este trabajo fueron: calcular la HH_{total} de tres procesos industriales, evaluar la influencia de cada componente (azul, gris e indirecto) sobre la HH_{total} y analizar cómo varía esta ante cambios en el alcance. Se cuantificó la HH_{total} para tres procesos: agua embotellada, cuero y cerveza. La HH_{total} se obtuvo como la suma de un aporte directo (agua dulce y agua para dilución de contaminantes) y otro indirecto (equipos, energía, materias primas). Seguidamente, se realizó un análisis de sensibilidad para evaluar la HH_{total} al excluir del cálculo: la materia prima, la electricidad, y ambas. La $HH_{indirecta}$ fue la que más influyó sobre la total. La $HH_{indirecta}$ de la curtiembre y cervecera se redujo un 95%, al excluir la HH de la materia prima, sin afectar la del agua embotellada. Excluir la electricidad impactó solamente en la HH del agua embotellada. Al eliminar ambas, la $HH_{directa}$ fue la que más pesó. La definición del alcance para cada proceso impacta en la HH_{total} y consecuentemente en la toma de decisiones respecto a un uso sustentable del agua de cada industria.

PALABRAS CLAVE

huella hídrica / procesos industriales / uso del agua / alcance

ABSTRACT

The water footprint (WF) is used to assess water use. However, its calculation depends on the scope established. The aims of this study were: to calculate the WF_{total} of three industrial processes, to assess the influence of each component (blue, grey, and indirect) on the WF_{total} , and to analyze how the WF varies with changes in the scope. WF_{total} was quantified for three processes: bottled water, leather, and beer. WF_{total} was obtained as the sum of a direct (freshwater and water for pollutant dilution) and an indirect contribution (equipment, energy, and raw materials). A sensitivity analysis was conducted to assess the WF when excluding from its calculation: raw materials, electricity, and both. $WF_{indirect}$ was the one which weighted the most on the total. Excluding the WF from raw materials reduced the $WF_{indirect}$ of the leather and beer industries by 95%, without affecting the bottled water process. Excluding electricity only impacted the WF of bottled water. When both were excluded, the WF_{direct} became the

most significant. The definition of the scope for each process affects the WF and, consequently, the decision-making regarding sustainable water use by each industry.

KEY WORDS

water footprint / industrial processes / water use / scope

Contexto

El presente trabajo de investigación se desarrolló en el marco de un Proyecto de Investigación del Consejo de Investigación de la Universidad Nacional de Salta (CIUNSa), Tipo B N°2793 (2022-2023): *"La huella hídrica como herramienta de toma de decisiones para un uso sustentable del agua en procesos industriales y actividades agropecuarias"* y en el marco de un doctorado realizado por uno de los autores del presente trabajo financiado con una beca del Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET).

Introducción

El aumento de la demanda de productos por parte de la población impulsó el incremento en el consumo de recursos naturales, generando preocupación debido a su impacto negativo sobre el ambiente y la sociedad (FAO, 2021). Este problema se agudiza, ya que sectores clave como la industria, el comercio y la construcción dependen profundamente de estos recursos para su funcionamiento y expansión. En muchos casos, prevalece la creencia de que el crecimiento económico es el único camino para mejorar la calidad de vida de las personas, lo que lleva a un modelo de producción y consumo que no prioriza la eficiencia en el uso de recursos ni en la gestión adecuada de residuos (Rueda y Zapata, 2018).

El propósito principal de las industrias es alcanzar la rentabilidad económica, ignorando en la mayoría de los casos el impacto ocasionado sobre el ambiente y la sociedad. A su vez esto pone en riesgo la sostenibilidad de los recursos involucrados en los procesos (Hoekstra, 2015). En este contexto, la industria se enfrenta a un reto doble: contribuir al desarrollo económico sin comprometer la disponibilidad y calidad de los recursos naturales. El Objetivo de Desarrollo Sostenible 9 (ODS 9) subraya la necesidad de una industrialización inclusiva y sostenible, orientada a lograr economías competitivas y dinámicas que generen empleo y promuevan el uso eficiente de los recursos (UN, 2015). Esto sugiere que la industrialización no tiene por qué estar reñida con el cuidado ambiental, dado que la tecnología y los procesos eficientes pueden desvincular el crecimiento industrial del impacto ambiental negativo (Yong, 2021).

Uno de los mayores desafíos que enfrenta la industria es la gestión del agua, un recurso esencial tanto para el proceso productivo como para las etapas previas y posteriores en la fabricación de productos. La escasez, disponibilidad y

contaminación de este recurso son temas críticos, y si no se manejan adecuadamente, más de la mitad de la población mundial podría enfrentar problemas de acceso en los próximos años (UN, 2018). En el ámbito industrial, el agua no solo es un insumo fundamental en la producción, sino que su manejo inadecuado puede comprometer tanto el ambiente como la viabilidad económica de las empresas (Ramírez y Antero, 2014). El agua es fundamental para una correcta funcionalidad de las industrias. Sin agua, la mayoría de las actividades se paralizarían, puesto que no sería posible fabricar una amplia variedad de productos. El rubro alimenticio es uno de los mayores consumidores de agua. Posiciona al sector industrial respecto a su consumo por encima del sector agrícola en varios países del mundo (Ölmez y Kretzschmar, 2009). Se estima que la producción de alimentos y bebidas representa cerca del 30% del uso indirecto de agua en el sector industrial (Blackhurst et al., 2010). Los procesos de calefacción y refrigeración suelen ser las operaciones que involucran mayor consumo de energía en este tipo de industrias (Compton et al., 2018; Ladha-Sabur et al., 2019). De la misma manera, la variedad de productos que se elaboran en este rubro contribuye a las diferencias en los procesos de fabricación, y consecuentemente en el consumo de agua y energía y en la cantidad de efluentes descargados.

En este sentido, la huella hídrica (*HH*) es un concepto introducido por Arjen Hoekstra en 2002, cuyo objetivo es cuantificar el volumen de agua utilizado a lo largo de toda la cadena de suministro de un producto, incluyendo el agua consumida directa e indirectamente, así como aquella que se contamina o devuelve al medio en diferentes condiciones. Este indicador tiene un enfoque integral, ya que no solo considera el agua incorporada al producto (agua virtual), sino también la que se evapora, se contamina o se transfiere a otros ecosistemas. Su carácter multidimensional le permite tener en cuenta factores clave como el origen del agua, la fuente de abastecimiento y el destino final del recurso tras su uso (Chapagain y Hoekstra, 2004).

La relevancia del cálculo de este indicador radica en su capacidad para ofrecer una visión completa del uso del agua en los procesos industriales, lo que permite una gestión más eficiente y sostenible del recurso. La *HH* no solo busca cuantificar el agua utilizada, sino también abordar problemas como la escasez y la contaminación, y contribuir a la formulación de estrategias para su gestión adecuada (Hoekstra, 2003). En este sentido, la *HH* se mide en unidades de volumen de agua dulce consumida o contaminada por unidad de producto o servicio, o por unidad de tiempo, aplicándose tanto a productos y procesos como a regiones, organizaciones o personas.

La *HH* está conformada por tres componentes: verde, azul y gris. Los dos primeros hacen referencia a la cantidad de agua, mientras que el último hace referencia a la calidad (Gráfico 1). Cada una de estas tres huellas aporta información independiente debiendo analizarse individualmente (Hoekstra et al., 2011).

Gráfico 1

Componentes de la huella hídrica



Fuente: Modificado de Hoekstra et al. (2011).

La *HH* azul (Gráfico 1) representa el consumo de agua dulce que procede de una corriente de agua, ya sea superficial o subterránea (río, lago, acuífero). Es un indicador del agua que se consume, se incorpora a un producto, se evapora o que incluso se devuelve a otro medio que no es el original. La *HH* verde representa el agua de lluvia que se consume con anterioridad a que se integre en corrientes de agua, incorporándose a un producto o evaporándose. La *HH* verde termina por ser una de las más elevadas en el cómputo global. Es especialmente importante para productos agrícolas y forestales, donde existe la evapotranspiración total del agua de lluvia (de campos y plantaciones) más el agua incorporada a los cultivos o madera recolectados. Históricamente el enfoque ingenieril se centró en el aporte azul, dejando un poco de lado el verde como un factor de producción importante (Rockström, 2001; Falkenmark, 2003).

La *HH* gris (Gráfico 1) se define como el volumen teórico de agua dulce que se requiere para diluir una carga contaminante presente en un efluente antes de su disposición final en el ambiente, hasta valores de concentraciones que cumplan con los límites establecidos por la legislación del lugar (Hoekstra et al., 2011). El concepto de *HH* gris se introdujo para expresar la contaminación del agua en términos de un volumen contaminado, para que se pudiera comparar con el consumo de agua, que también se expresa como volumen (Chapagain et al., 2006; Hoekstra y Chapagain, 2008). Los cálculos de la *HH* gris se realizan a partir de legislaciones ambientales de cada lugar para el cuerpo de agua receptor, considerando la concentración máxima permitida del contaminante, la concentración natural del contaminante en el cuerpo receptor, y la concentración del contaminante en el efluente analizado.

En el contexto de los procesos industriales, la huella hídrica total (HH_{total}) se calcula como la suma de las contribuciones directas e indirectas al uso del agua. La *HH* directa incluye el agua utilizada en todas las etapas del proceso productivo, mientras que la *HH* indirecta abarca el agua empleada en la fabricación de los bienes y servicios necesarios para la producción, como materias primas, energía y equipos. Tanto el componente directo como el indirecto, engloban dentro de su evaluación los tres tipos de huellas mencionados anteriormente (azul, verde y gris, Gráfico 1).

El Manual de Evaluación de la *HH* desarrollado por Hoekstra et al. (2011), establece cuatro etapas para su cálculo: (1) establecimiento de objetivos y alcance, (2) contabilización de la *HH*; (3) análisis de sostenibilidad y (4) formulación de respuestas. En la etapa (1), se debe dejar claro lo que se incluye y lo que se excluye del cálculo. Se debe indicar si se calcularán todos los colores (azul, verde y gris), o solamente algunos de ellos. Otro factor a definir es si se cuantificará el componente directo, indirecto o ambos. La recomendación general es incluir ambos. Respecto a esto, es necesario establecer el nivel de detalle en relación con el aporte indirecto. Hasta el momento, no se desarrollaron directrices al respecto, pero la norma general es incluir el aporte de todos los procesos dentro de un sistema de producción que contribuyan considerablemente a la HH_{total} . En la etapa (2) se incluye la recolección de datos, la elaboración del diagrama bloques y/o de flujo del proceso bajo análisis, el balance hídrico, y finalmente la cuantificación de las *HH* azul, verde y gris. Para el cálculo de la *HH* azul en procesos industriales, generalmente se conoce cuánta agua como tal se añade para que forme parte del producto, pero no se mide directamente cuánta agua se evapora durante el almacenamiento, transporte, procesamiento y vertido. Lo ideal sería contar con bases de datos que contuvieran información sobre el uso consuntivo del agua para varios tipos de procesos de fabricación, pero esto no es común. En este

sentido, las mejores fuentes son los propios productores. La *HH* azul se puede determinar para cada etapa de un proceso, como la diferencia entre el volumen de agua dulce que ingresa a la etapa y el volumen de agua dulce que sale de la etapa. El Análisis de sostenibilidad (etapa 3) consiste en realizar una comparación entre la *HH* obtenida y lo que la Tierra puede soportar de manera sostenible en materia de disponibilidad y calidad del recurso. Por último, el propósito de la etapa (4) es proponer estrategias para reducir la *HH*. Por ejemplo, tanto la *HH* azul como la verde de las industrias y hogares se puede reducir reciclando el agua. En fábricas o sistemas de refrigeración, el agua evaporada se puede capturar y reciclar o devolver a la masa de agua de la que fue extraída (Hoekstra et al., 2011).

Por lo expuesto anteriormente se puede evidenciar que una adecuada delimitación del alcance del análisis de la *HH* es crucial, ya que la exclusión o inclusión de ciertos aspectos puede llevar a subestimar o sobreestimar el uso de agua, lo que afectaría la toma de decisiones desde una mirada estratégica y basada en los resultados del cálculo.

Objetivos

Los objetivos de este trabajo fueron: cuantificar la HH_{total} de tres procesos industriales, determinar la influencia de cada componente sobre la HH_{total} y finalmente realizar un análisis de sensibilidad para identificar cómo varía la HH_{total} ante cambios en el alcance otorgado al cálculo.

Metodología

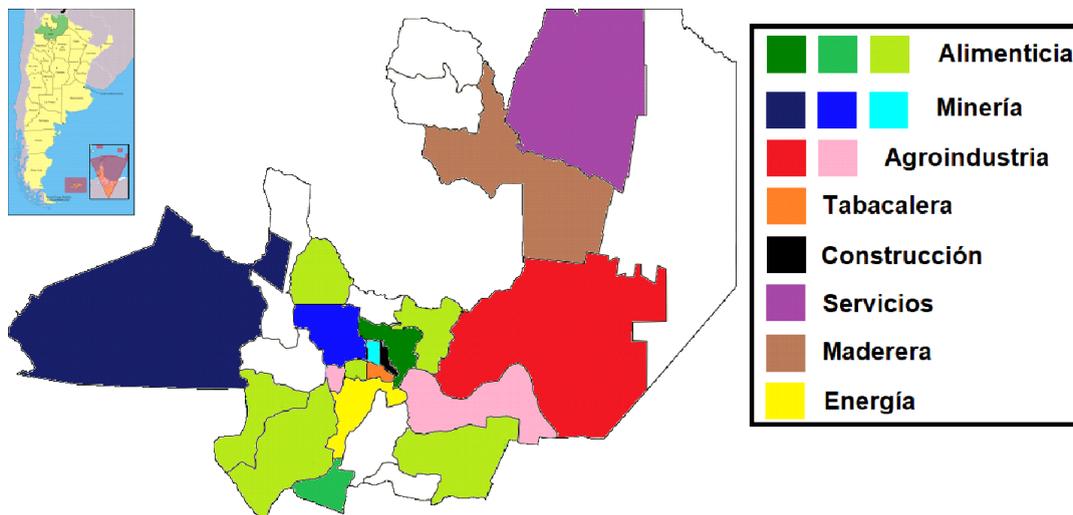
Selección de los procesos industriales

En un trabajo previo se realizó un relevamiento de distintos procesos industriales de la provincia de Salta. Se llevó a cabo un análisis respecto a la cantidad y tamaño de industrias por departamento de la provincia, divididas según el tipo de producto que elaboran (Mainardi-Remis et al., 2018). Se identificaron también los procesos con mayor impacto sobre el ambiente y la población, mediante la definición y cálculo de índices representativos para cada tipo de industria. De esta manera, se pudieron distinguir 20 tipos de industrias divididas según el tipo de producto que elaboran: agroindustria, alimenticia, automotriz, construcción, curtiembre, energía, equipos industriales, frigorífico, gráficas, logística, maderera,

marroquinería, metalúrgica, minería, petroquímica, química, servicios, tabacalera, textil y de tratamiento. La mayor cantidad de industrias fueron las alimenticias, con gran relevancia en la mayoría de departamentos de la provincia (Gráfico 2).

Gráfico 2

Industrias predominantes en los departamentos con actividad industrial de la provincia de Salta (Argentina). Escalas según cantidad de industrias alimenticias: verde oscuro (de 26 a 39), verde intermedio (de 16 a 25) y verde claro (de 1 a 15); mineras: azul oscuro (de 4 a 5), azul intermedio (de 2 a 3) y celeste (1); agroindustrias: rojo oscuro (de 7 a 9) y rosado (de 4 a 6)



Fuente: elaboración propia

A partir de esta información, se seleccionaron los procesos industriales de la provincia de Salta que representaban un alto impacto en el uso del agua y el ambiente mediante la aplicación de una metodología multicriterio para la toma de decisiones (Mainardi-Remis, 2023). A partir de allí, se seleccionaron tres procesos industriales para un posterior cálculo de la *HH*: producción de agua embotellada, fabricación de cuero natural (curtiembre) y elaboración de cerveza. Estos tres procesos difieren entre sí principalmente en las transformaciones físicas y químicas, en el tipo de materia prima, en los efluentes generados y en los insumos y servicios involucrados.

En trabajos anteriores (Mainardi-Remis et al., 2021; Hubaide-Restom et al., 2022), se llevó a cabo un estudio minucioso de los tres procesos industriales antes mencionados. Para el caso del agua embotellada, la producción anual de la planta rondaba en los $3,15 \times 10^6$ l de agua embotellada/a (15000 l de agua embotellada/d), la cual era envasada en recipientes retornables de plástico de 20 l. Según la información de la industria, necesitaba 1,5 l de agua dulce para producir 1 l de agua embotellada, considerando fugas y agua contenida en el producto (Mainardi-Remis et al., 2021).

La curtiembre analizada, producía 200 t/mes de cuero curtido. Según la información de la industria, utilizaba cerca de 29 l de agua dulce para producir 1 kg de cuero curtido. El cuero producido principalmente se exportaba a China y una menor cantidad se destinaba a consumo interno de marroquinerías (Hubaide-Restom et al., 2022).

Con respecto a la cervecera, la misma contaba con un sector de producción conformado por el área de recepción de la materia prima, de cocina (elaboración del mosto), el área de fermentación y de envasado. También tenía otros sectores como el de logística, mantenimiento y oficinas. La producción de cerveza rubia rondaba cerca de los $2,80 \times 10^7$ l/a. La misma se envasaba y comercializan en recipientes de vidrio de un litro. Esta empresa también fabricaba otras variedades de cerveza, como negra y roja, pero en menor cantidad que la rubia.

Se analizó de manera detallada cada uno de los procesos, identificando las etapas involucradas, materias primas e insumos utilizados, además del uso de energía y equipamiento necesario. También se realizó el balance hídrico por etapa y se determinaron los efluentes generados.

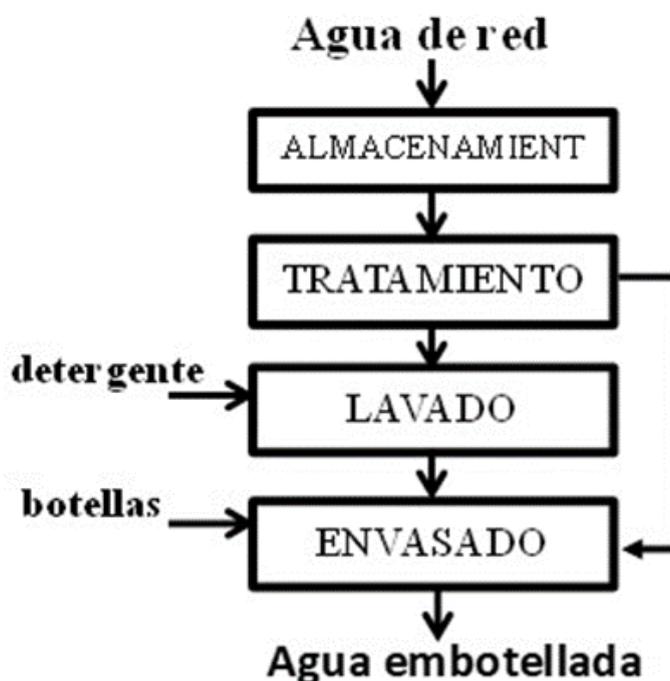
Proceso de obtención de agua embotellada

Este proceso consta de cuatro etapas principales (Gráfico 3). Inicialmente, el agua de red, que constituye la materia prima principal, se almacena en dos tanques de alimentación de acero inoxidable. A continuación el agua se somete a un tratamiento que consiste en tres subetapas: filtración, desinfección y ablandamiento. El agua almacenada atraviesa un filtro de arena, una columna de carbón activado y una columna de ablandamiento. El filtro de arena se utiliza para eliminar las impurezas más grandes, mientras que la columna de carbón activado sirve para eliminar el cloro, los sabores y olores extraños. La columna de ablandamiento se utiliza para disminuir la dureza del agua al eliminar iones como Ca^{2+} , Mg^{2+} y Fe^{2+} . Es importante aclarar que una fracción del agua filtrada es

destinada a la limpieza de los envases de plástico retornables en la etapa de lavado.

Gráfico 3

Diagrama de bloques del proceso de obtención de agua embotellada



Fuente: Elaboración propia

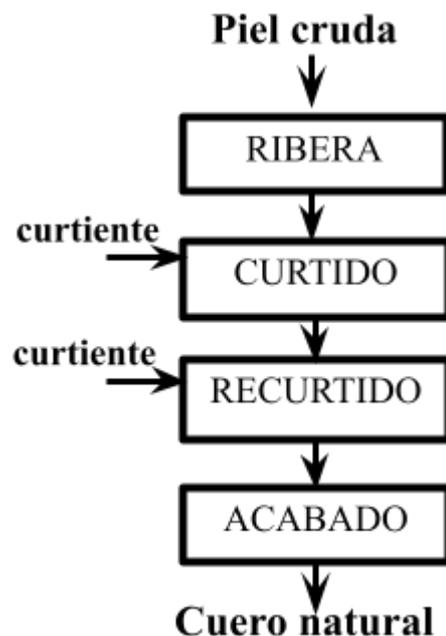
Los envases de plástico limpios y vacíos se colocan en una cinta transportadora que pasa por debajo de un pico llenador, en donde se vierte de manera automática el agua tratada anteriormente. Una vez llenos, los envases se tapan y etiquetan (en caso de ser necesario) para su posterior reparto. Una vez finalizado el proceso, todos los equipos y tuberías se limpian con aire comprimido y con soluciones sanitizantes especiales.

Proceso de producción de cuero natural

Este proceso se divide en cuatro etapas principales (Gráfico 4). La primera es la ribera, que incluye un conjunto de operaciones mecánicas cuyo objetivo es quitarle a la piel todos los componentes no deseados para la posterior elaboración del cuero. En esta etapa, las pieles (piel cruda) se lavan con agua, se dejan escurrir y luego se recubren con granos de sal para deshidratarlas y dificultar así la proliferación de bacterias que descomponen las proteínas del cuero causando la descomposición. En esta etapa también se realiza el remojo de la piel, con el propósito de rehidratarla y eliminar la suciedad superficial. Esta operación se lleva a cabo en tanques de madera horizontales denominados fulones, que poseen un movimiento giratorio para mejorar la interacción. Esta subetapa se caracteriza por un elevado consumo de agua. Finalmente, en la ribera, se eliminan los pelos y carnes remanentes de forma manual con el uso de una cuchilla.

Gráfico 4

Diagrama de bloques del proceso de obtención de cuero natural



Fuente: Elaboración propia

Durante el curtido (Gráfico 4) se llevan a cabo operaciones fisicoquímicas para lograr la estabilización de la proteína de la piel mediante su tratamiento con un agente curtiente. Inicialmente, la piel proveniente de la ribera se somete a la acción química con una solución de ácido sulfúrico que disminuye el pH hasta el valor de 5. Esto favorece el proceso de curtido cuando se utilizan curtientes vegetales. En esta etapa también se realizan operaciones de dividido y rebajado, para ajustar el tamaño y espesor del cuero a valores deseados, utilizando una máquina cortadora. Luego, el cuero se trata con una solución de un agente curtiente vegetal (tanino) que se combina irreversiblemente con el colágeno de la piel, logrando la estabilidad de esta proteína. De esta manera, lo que se busca en esta etapa es que el cuero no se degrade, resista la acción de los microorganismos en medio húmedo, y sea estable en contacto con agua caliente. Esta operación, que puede durar hasta 24 h, también se lleva a cabo dentro de los fulones (Hubaide-Restom et al., 2022).

Durante el recurtido (Gráfico 4), el cuero se deja en reposo en los fulones durante 24-48 h, logrando que continúe la interacción del tanino con el colágeno y se libere el ácido sulfúrico que quedó retenido en la piel curtida. En esta etapa, se utiliza el mismo agente curtiente de la etapa anterior. Mediante el curtido y el recurtido se logra que el cuero adquiera características deseadas, como ser maleabilidad, resistencia, elasticidad, entre otras. Por último, el acabado es la etapa final donde se llevan a cabo las operaciones de acondicionamiento del cuero para dejarlo listo para la venta, tales como recorte, teñido, engrase, ablandado, entre otras. Se caracteriza por ser una etapa en seco que no utiliza agua. Cabe aclarar que las operaciones de lavado, descarnado y acabado suelen llevarse a cabo con trabajo manual, por lo que no hay involucradas máquinas o equipos importantes como la máquina cortadora y los fulones.

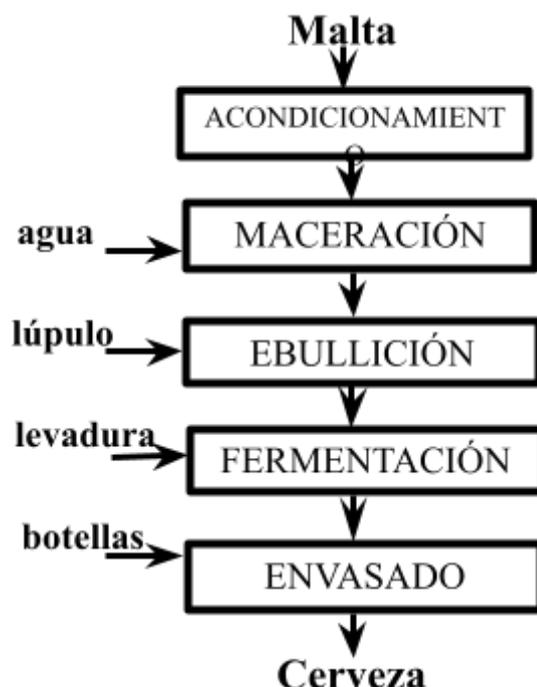
Proceso de producción de cerveza

Para una mejor descripción, se realizó el diagrama de bloques del proceso, dividiéndolo en 5 grandes etapas (Gráfico 5). Las materias primas principales para la producción de cerveza son la cebada malteada, el agua potable, la levadura y el lúpulo. También se utilizan otros suministros como ser tapas, etiquetas, botellas de vidrio y aditivos de color y sabor. En la etapa de acondicionamiento (Gráfico 5) se consideraron las operaciones de transporte, limpieza y molienda de la materia

prima principal (cebada malteada o malta). La clasificación y limpieza de granos se realiza con la ayuda de una zaranda vibratoria y la reducción de tamaños de los granos mediante un molino, dejándolos en las condiciones adecuadas para la maceración.

Gráfico 5

Diagrama de bloques del proceso de obtención de cerveza



Fuente: Elaboración propia

En la etapa de maceración (Gráfico 5) la malta previamente molida se mezcla con agua en un equipo denominado macerador. Luego, la mezcla se calienta y pasa por un filtro, el cual permite recuperar la parte líquida (mosto filtrado) y al mismo tiempo obtener bagazo de malta como subproducto. Mediante la maceración se busca liberar los azúcares fermentables de la malta para su posterior fermentación.

El propósito de la ebullición del mosto (Gráfico 5) es concentrarlo mediante la evaporación de agua y conferirle el sabor característico a la cerveza mediante la adición de lúpulo. La acción del calor también permite la esterilización del mosto y

la coagulación de proteínas para evitar su posterior coagulación provocando turbidez en el producto final. Durante esta etapa también se produce el desarrollo de color debido a las reacciones de Maillard que se llevan a cabo debido a la presencia de azúcares. Después del calentamiento del mosto, se utiliza un decantador para separar el material sólido que haya quedado (restos de lúpulo y malta) del mosto clarificado. Este último luego se enfría hasta la temperatura apropiada de fermentación.

El mosto frío ingresa a los fermentadores, en donde es aireado y se le agrega la levadura. La fermentación es una de las operaciones principales del proceso ya que las levaduras transforman los azúcares del mosto en dióxido de carbono y alcohol etílico. Durante la fermentación, la concentración de azúcares del mosto disminuye progresivamente debido a la acción de la levadura. Luego de la fermentación, la cerveza se enfría y pasa a un tanque de reposo para su maduración. Finalmente, la cerveza reposada se filtra y pasa por las máquinas llenadoras y tapadoras en la etapa de envasado (Gráfico 5).

Cálculo de la huella hídrica

Luego de haber analizado cada proceso en detalle, se procedió a determinar la HH_{total} (l de agua/l o kg de producto) para cada proceso bajo estudio, como la suma de un aporte directo ($HH_{directa}$) y otro indirecto ($HH_{indirecta}$) siguiendo la metodología de Hoekstra et al. (2011). En este sentido, se abordaron las dos primeras etapas del Manual de Evaluación de la huella hídrica (Hoekstra et al., 2011). En el aporte directo se tuvieron en cuenta los componentes azul y gris (HH_{azul} y HH_{gris}), mientras que en el indirecto no se distinguieron colores, sino que se calculó el aporte como un solo valor (Ec. 1). No se consideró el aporte directo de la HH verde debido a la ausencia de actividades que requieran el uso de agua de lluvia.

$$HH_{total} = HH_{azul} + HH_{gris} + HH_{indirecta} \quad (1)$$

La HH_{azul} se determinó para cada proceso, como la suma del volumen de agua perdido en cada una de las etapas (NS ; Ec. 2).

Para ello, se tuvo en cuenta el volumen de agua al ingreso (V_{ent}) y a la salida (V_{sal}) de cada etapa.

$$HH_{azul} = \sum_{i=1}^{NS} (V_{ent-i} - V_{sal-i}) \quad (2)$$

La Ec. 2 se aplicó de la misma manera para cada uno de los tres procesos analizados (producción de agua embotellada, de cuero natural y de cerveza).

La HH_{gris} se calculó como la suma de los componentes grises de cada una de las operaciones del proceso en cuestión. Se calculó considerando las etapas que involucraban la presencia de un efluente (V_{efl-i}) con carga contaminante relevante (Ec. 3).

$$HH_{gris} = \sum_{i=1}^{NS} \frac{V_{efl-i} \times C_{efl-i}}{C_{max-i} - C_{nat-i}} \quad (3)$$

C_{efl} (en mg/l) representa la concentración del contaminante seleccionado en los efluentes de cada operación. La concentración máxima permisible del contaminante en el cuerpo de agua receptor es C_{max} (en mg/l), y C_{nat} (en mg/l) es la concentración natural del contaminante que debería haber en un cuerpo de agua sin impacto ambiental ($C_{nat} = 0$ mg/l en todos los casos).

Las operaciones que se consideraron como más relevantes para el cálculo de la HH_{gris} fueron el lavado de filtros y el lavado de bidones en el proceso de elaboración de agua embotellada, la etapa de fermentación en la producción de cerveza, y la ribera en la producción de cuero. Los principales parámetros elegidos para la evaluación de la HH_{gris} fueron la demanda química de oxígeno (DQO) para la cervecera y la demanda bioquímica de oxígeno (DBO) para la curtiembre y la embotelladora de agua. La legislación municipal establece como valores máximos de concentración de los contaminantes en el efluente vertido a un cuerpo de agua receptor, 200 y 500 mg/l para DBO y DQO respectivamente, si el efluente es vertido a la colectora cloacal, y 50 y 125 mg/l para DBO y DQO respectivamente, si el efluente es vertido en un cuerpo de agua superficial (arroyo, lago, río) (Ley 7017, 2000). Para este estudio en particular, se consideró que las operaciones restantes no generaban efluentes con alto impacto que deban diluirse antes de su eliminación, por lo que su contribución a la HH_{gris} fue nula.

En la $HH_{indirecta}$ se consideraron tres componentes principales (Ec. 4).

$$HH_{indirecta} = HH_{Equipos} + HH_{Energía} + HH_{Materias primas} \quad (4)$$

De esta manera, se tuvieron en cuenta: la HH de la fabricación de los equipos y maquinarias utilizadas ($HH_{Equipos}$), la HH del uso de energía eléctrica y combustibles ($HH_{Energía}$), y la HH de las principales materias primas e insumos ($HH_{Materias primas}$). Las HH de todos los aportes indirectos fueron calculadas considerando su HH de bibliografía y la cantidad utilizada en cada proceso analizado. Estos tres

componentes se sumaron para contabilizar la $HH_{indirecta}$ de cada proceso, sin distinción de colores (Ec. 4).

Variación del alcance en el cálculo de la huella hídrica

Una vez que se obtuvieron las HH_{total} para cada uno de los 3 procesos, se procedió a realizar un análisis de sensibilidad. El propósito de esto fue evaluar cómo cambiaban los valores de la HH_{total} y sus respectivos componentes de cada proceso ante cambios en el alcance otorgado al cálculo. Se determinó el aporte (en %) de cada componente de la HH (azul, gris e indirecta) sobre la total. Para ello se definieron tres escenarios o alcances, y se los comparó a cada uno de ellos con el cálculo estándar de la HH para cada proceso bajo estudio, haciendo un total de 4 escenarios (Tabla 1): alcance a, cálculo estándar; alcance b, cálculo estándar sin considerar el aporte indirecto de la materia prima principal de cada proceso; alcance c, cálculo estándar sin considerar el aporte indirecto del consumo de energía eléctrica; y alcance d, cálculo estándar sin considerar el aporte indirecto de la materia prima principal ni de la electricidad (Tabla 1).

Tabla 1

Aspectos considerados y no considerados en cada alcance (escenario) establecido respecto a la $HH_{indirecta}$ para el cálculo de la HH_{total} de los tres procesos analizados

Alcance	$HH_{indirecta}$				
	Materias primas e insumos		Energía		Equipos y maquinarias
	Principal	Otras	Electricidad	Combustibles	Fabricación
a	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí
b	No	Sí	Sí	Sí	Sí
c	Sí	Sí	No	Sí	Sí
d	No	Sí	No	Sí	Sí

Fuente: Elaboración propia

El alcance (a) (Tabla 1) corresponde al cálculo estándar realizado según lo explicado en el apartado anterior. Para cada proceso, se escogió como materia prima principal, la más utilizada en la fabricación de cada producto (agua de red para el agua embotellada, cuero natural para la curtiembre y cebada malteada para la cerveza).

Resultados y discusión

El cálculo de la HH si bien parece tarea sencilla, no lo es ya que cada uno de los procesos que se estudian tienen características diferentes (distintos insumos, materias primas, equipos utilizados, efluentes generados), que desafiarán al investigador responsable del cálculo del indicador a prestar atención a la hora de recopilar datos y realizar su evaluación.

Analizando en detalle cada caso de estudio y teniendo en cuenta el cálculo estándar de la HH , se observó que para producir 1 l de agua embotellada se necesitan 9 l de agua, para 1 kg de cuero 17000 litros de agua y para producir 1 l de cerveza se requieren 350 l de agua. El componente indirecto fue el que más aportó a la HH_{total} en los tres procesos analizados. Representó un 78% sobre la HH_{total} para el proceso de elaboración de agua embotellada, un 100% en la curtiembre y un 93% para la producción de cerveza. Mientras que en la embotelladora este aporte fue mayor debido al uso de agua de red como materia prima (la cual tiene una HH indirecta involucrada en su obtención) y al uso de energía eléctrica, en los otros dos procesos, la relevancia del aporte indirecto fue exclusivamente debido al uso de las materias primas principales (cuero natural y cebada malteada).

Existen estudios sobre el cálculo de la HH en otros procesos como por ejemplo en la producción de vinos, en donde se reportó que aproximadamente el 99% de la HH total correspondía al aporte indirecto, con una contribución predominante de la HH verde, que representaba entre el 83% y el 98%. Esta elevada proporción se debe principalmente al uso del agua de lluvia en el cultivo de las uvas, lo que resalta la importancia del agua verde en este tipo de producción agrícola (Ene et al., 2013; Bonamente et al., 2015). Este patrón de dominancia de la HH_{verde} no es exclusivo de la industria vitivinícola; también se ha registrado en otros sectores agrícolas e industriales. En otro trabajo, centrado en las industrias de producción

de azúcar y bioetanol, se encontró que el mayor aporte a la HH total provenía tanto de la HH verde como de la HH azul, asociadas al consumo de agua en las etapas de cultivo de la caña de azúcar. En estas industrias, el agua de lluvia y el agua de fuentes superficiales o subterráneas juegan un papel clave en el proceso productivo desde la fase agrícola (Fito et al., 2023).

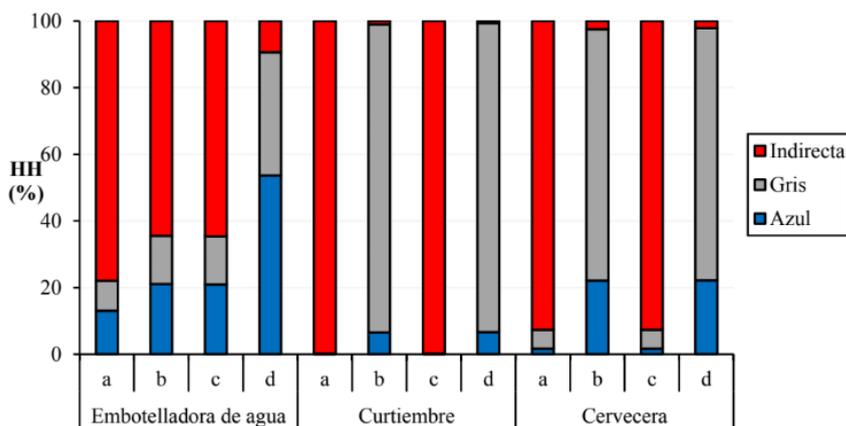
En este sentido, muchos estudios sobre la HH en diversas industrias que utilizan materias primas de origen agrícola identificaron que un componente importante de la HH proviene del uso indirecto de agua en la producción de sus materias primas. Si bien esto subraya la relevancia del componente verde en la cadena de suministro, donde el cultivo de insumos básicos para la producción tiene un impacto considerable en la HH total de los productos finales, también esta situación indica que, si para el cálculo de la HH total se establece un alcance muy amplio considerando muchos aportes indirectos, posiblemente se estarían ignorando aspectos importantes que podrían mejorar la gestión del recurso dentro del proceso productivo. Estos aspectos están relacionados con el consumo de agua (HH azul) y la contaminación (HH_{gris}). Como se observó en el alcance estándar, si se considerara el aporte de materias primas de origen agrícola, posiblemente el análisis del uso de agua en el sector industrial quedaría sesgado hacia el sector agrícola.

Al proponer los diferentes alcances/escenarios en el cálculo, los resultados variaron notablemente en algunos de ellos (Gráfico 6). Excluyendo del cálculo la HH de la materia prima principal (alcances b y d, Gráfico 6), la $HH_{indirecta}$ de la curtiembre y de la cervecera disminuyeron más de un 95%. Esto era de esperarse ya que el componente indirecto debido al uso de la materia prima principal, fue un factor crítico en estos dos procesos.

Gráfico 6

Relevancia de cada aporte sobre la HH total de los tres procesos analizados teniendo en cuenta todos los alcances definidos (Tabla 1)

Gráfico 6. Relevancia de cada aporte sobre la HH total de los tres procesos analizados teniendo en cuenta todos los alcances definidos (Tabla 1)



Alcance a: considerando la HH indirecta de materia prima principal, electricidad, combustibles y fabricación de equipos
Alcance b: sin considerar la HH indirecta de la materia prima principal
Alcance c: sin considerar la HH indirecta de la electricidad
Alcance d: sin considerar la HH indirecta de la materia prima principal ni la electricidad

Fuente: Elaboración propia

En este sentido, para la curtiembre y la cervecera, el aporte gris pasó a ser el predominante (93 y 75% respectivamente, Gráfico 6) sobre la HH total. Esto se debió a los efluentes con elevada carga orgánica que se generan en estos dos procesos y podrían terminar en el ambiente generando problemas en los cuerpos receptores y las comunidades aledañas que pudieran hacer uso del recurso.

Para el proceso de elaboración de cerveza, la fermentación fue la etapa crítica al analizar la HH_{gris} , debido a la gran cantidad de efluentes con elevada carga orgánica que se genera a causa de la presencia de restos de levadura. En este sentido, en un estudio sobre la gestión de aguas residuales en la industria cervecera, se midieron diversos parámetros fisicoquímicos y se encontró que varias cerveceras vertían sus efluentes sin cumplir con la normativa ambiental vigente. Estos efluentes presentaban niveles elevados de demanda química de oxígeno (DQO), demanda bioquímica de oxígeno (DBO) y concentraciones altas de nitrógeno, superando los límites establecidos por las normativas nacionales (Ogemdi y Gold, 2018). Esta situación representaba un riesgo significativo para la salud de las comunidades rurales cercanas, que dependían de los cuerpos de agua receptores para su consumo doméstico, exponiéndose a la contaminación de fuentes esenciales de agua. El estudio también subraya una problemática común en la mayoría de los países en desarrollo, donde la regulación y aplicación

de normativas ambientales es a menudo deficiente. Esto provoca que muchas industrias viertan aguas residuales sin un tratamiento adecuado, lo que aumenta los riesgos de contaminación y genera graves consecuencias tanto para el medio ambiente como para las comunidades locales (Ogemdi y Gold, 2018). La falta de cumplimiento y supervisión en estos contextos resalta la necesidad de mejorar la infraestructura y la implementación de políticas de gestión hídrica más estrictas.

Para mitigar el impacto ambiental de las aguas residuales provenientes de la industria cervecera, diversos estudios han desarrollado e implementado tecnologías y prácticas de tratamiento enfocadas en reducir o eliminar los residuos orgánicos presentes en los efluentes. Entre estas soluciones, se incluyen procesos como la digestión anaeróbica, que permite la degradación de la materia orgánica y la reducción de la DQO y DBO, el uso de sistemas biológicos avanzados como los biorreactores de membrana, y tecnologías de oxidación avanzada para la eliminación de contaminantes persistentes (Hassen y Asmare, 2019; Werkneh et al., 2019; Papadopoulos et al., 2020).

Además, algunos trabajos han propuesto estrategias integrales que no solo se limitan al tratamiento de los efluentes, sino que también promueven la reutilización de agua dentro del ciclo productivo y la implementación de buenas prácticas de manejo. Estas medidas, cuando se aplican de manera efectiva, no solo reducen la contaminación, sino que también mejoran la eficiencia en el uso del recurso hídrico, lo que es crucial en un contexto global de escasez creciente de agua.

Con respecto a la curtiembre, la ribera fue la etapa con mayor *HH* gris. En la industria de las curtiembres, se estima que aproximadamente el 60% del peso de la piel bruta se elimina como residuo o subproducto durante el proceso. De este porcentaje, cerca del 15% del peso total de la piel termina siendo descargado en las aguas residuales, principalmente en forma de grasas, pelo degradado y fibras (Romero-Dondiz et al., 2015). Esta situación genera una elevada concentración de contaminantes en el agua residual, lo que requiere un volumen considerable de agua para diluir estos desechos y cumplir con las normativas de calidad ambiental.

En un estudio, se realizó un análisis exhaustivo de los efluentes de curtiembres, tomando muestras de las principales etapas del proceso (Islam et al., 2014). Los investigadores analizaron diversos parámetros fisicoquímicos de los efluentes, tales como pH, alcalinidad, acidez, DBO, DQO, sólidos totales, cloruros y sulfuros. Los resultados mostraron que todos estos parámetros superaban los límites permitidos para el vertido de aguas residuales en curtiembres, lo que representaba un riesgo ambiental significativo. El estudio reveló que

aproximadamente el 70% de las cargas contaminantes de DBO y DQO se originaban en las etapas de ribera y curtido, siendo estas las fases más críticas del proceso en términos de generación de contaminantes (Islam et al., 2014). Estos resultados subrayan la importancia de implementar sistemas de tratamiento de aguas residuales específicos para estas etapas, con el fin de reducir la carga contaminante antes de que los efluentes sean descargados en cuerpos de agua.

Además de las grasas, pelo y fibras, los efluentes de curtiembres contienen una variedad de compuestos químicos utilizados durante el proceso de curtido, como sales, cromo y agentes sulfurosos. El cromo, en particular, es un contaminante altamente tóxico que puede persistir en el ambiente, acumulándose en el suelo y los cuerpos de agua, y afectando gravemente los ecosistemas y la salud humana. Debido a esto, muchas investigaciones también han propuesto tecnologías de tratamiento que permitan recuperar el cromo y otros químicos presentes en los efluentes de curtiembres, minimizando así su impacto ambiental.

En respuesta a la problemática de la alta carga contaminante en las aguas residuales de las curtiembres, se han desarrollado diversas tecnologías de tratamiento, como sistemas de flotación, sedimentación y biotratamiento, diseñadas para reducir significativamente los niveles de DBO, DQO y cromo en los efluentes. Estas soluciones son esenciales para mejorar la sostenibilidad de la industria del cuero natural, tanto desde el punto de vista ambiental como social, especialmente en regiones donde los cuerpos de agua cercanos son utilizados por comunidades locales para consumo humano o agrícola.

Teniendo en cuenta lo anterior, la *HH* gris constituye el aporte directo más importante en la *HH* total para estas industrias cuando no se tiene en cuenta el aporte de la materia prima principal (alcances b y d; Gráfico 6). Esto ocurre porque el volumen teórico que se necesitaría para diluir los efluentes generados en el proceso debido a la elevada carga contaminante que poseen es muy grande.

Con respecto a la elaboración de agua embotellada, en los tres primeros alcances evaluados (a, b y c; Gráfico 6), el aporte indirecto fue el que más influyó (64-78%) sobre la *HH* total. El consumo de electricidad jugó un papel importante en la *HH* indirecta del alcance b (64%), principalmente debido a las máquinas de lavado y llenado y al uso de bombas. Esto pudo deberse no solamente al tipo de proceso, sino también a las condiciones del equipamiento y las tecnologías antiguas que usan más energía en sus operaciones (Wakeel et al., 2016). Esta situación remarca también que para ciertos procesos, la *HH* puede disminuirse no solo centrándose en el consumo directo de agua, sino también en los consumos virtuales que muchas veces se pasan por alto (Hoekstra et al., 2011). El componente azul

mostró el mayor valor de todos en el alcance d (Gráfico 6) debido al consumo de agua durante el llenado de botellas en la etapa de envasado.

Con todo esto se observa que la HH es diferente para cada proceso y depende de qué variables se quieran analizar y lo que se pueda abordar para mejorar la gestión del recurso en los procesos industriales.

Conclusiones

Los resultados obtenidos en el cálculo de la huella hídrica (HH) de diversos procesos industriales revelan la complejidad inherente de este indicador, debido a las múltiples variables que influyen en cada caso de estudio, como insumos, materias primas y tipos de efluentes generados. Un análisis detallado muestra que el aporte indirecto (principalmente el agua utilizada en la producción de materias primas y la energía) tiene un papel predominante en la HH_{total} de los tres procesos analizados: agua embotellada (78%), cuero (100%) y cerveza (93%).

En particular, la mayor parte del agua utilizada en estos procesos proviene de las materias primas agrícolas, como la cebada malteada en la cerveza y el cuero natural en la curtiembre. Sin embargo, si se excluye el componente indirecto de la materia prima, la huella hídrica gris (relacionada con la contaminación por efluentes) se convierte en el principal aporte, como se observó en los procesos de curtido de cuero (93%) y la producción de cerveza (75%), donde las elevadas cargas de materia orgánica y química en los efluentes generan un impacto ambiental significativo.

Esto subraya la necesidad de adoptar tecnologías de tratamiento de aguas residuales y mejorar la eficiencia del uso de agua en los procesos industriales, especialmente en sectores donde la contaminación de cuerpos de agua puede afectar la salud de las comunidades locales. Además, mediante este análisis se destaca la importancia de considerar la HH indirecta en el diseño de estrategias de sostenibilidad, no solo para reducir el consumo de agua, sino también para optimizar el uso de recursos a lo largo de toda la cadena de producción.

Si bien la cuantificación de la HH_{total} es una herramienta útil, el alcance otorgado a cada análisis, definirá la relevancia de cada componente y la posibilidad de la aplicación de mejoras para cada situación en particular.

Bibliografía

Blackhurst M, Hendrickson C, Sels J (2010), Direct and Indirect Water Withdrawals for U.S. Industrial Sectors, *Environmental Science & Technology*, Vol. 44 n°6, pp 2126-2130.

Bonamente E, Scrucca F, Rinaldi S, Merico MC, Asdrubali F, Lamastra L (2016), Environmental impact of an Italian wine bottle: Carbon and water footprint assessment, *Science of The Total Environment*, Vol. 560-561, pp 274-283.

Chapagain AK, Hoekstra AY (2004), Water footprint of nations, Value of Water Research Report Series Vol. 16, Delft, The Netherlands: UNESCO-IHE.

Chapagain AK, Hoekstra AY, Savenije HH (2006), Water saving through international trade of agricultural products, *Hydrology and Earth System Sciences*, Vol. 10 n°3, pp 455-468.

Compton M, Willis S, Rezaie B, Humes K (2018), Food processing industry energy and water consumption in the Pacific northwest. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, Vol. 47, pp 371-383.

Ene SA, Teodosiu C, Robu B, Volf I (2012), Water footprint assessment in the winemaking industry: A case study for a Romanian medium size production plant, *Journal of Cleaner Production*, Vol. 43, pp 122-135.

Falkenmark M (2003), Freshwater as shared between society and ecosystems: from divided approaches to integrated challenges, *Philosophical Transaction of the Royal Society of London B*, Vol. 358, pp 2037-2049.

FAO, Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (2021), La degradación de los recursos naturales. Los seres humanos y el medio ambiente, Online: <http://www.fao.org/3/w1309s/w1309s10.htm>, Último acceso: 03-2023.

Fito J, Ahmed I, Nkambule TTI, Kefeni KK (2023), Evaluation of water footprint in sugar industries and bioethanol distilleries in two different water basins toward water sustainability, *International Journal of Environmental Science and Technology*, Vol. 20 n°3, pp 2427-2440.

Hassen EB, Asmare AM (2019), Predictive performance modeling of Habesha brewery wastewater treatment plant using artificial neural networks, *Chemical International*, Vol. 5 n°1, pp 87-96.

Hoekstra AY (2003), Virtual water trade: Proceedings of the International Expert Meeting on Virtual Water Trade, Delft, *Value of Water Research Report Series No.12*, The Netherlands: UNESCO-IHE.

Hoekstra AY (2015), The water footprint of industry, *Assessing and Measuring Environmental Impact and Sustainability*, Capítulo 7, pp 221-254.

Hoekstra AY, Chapagain AK (2008), *Globalization of Water: Sharing the Planet's Freshwater Resources*, Reino Unido: Blackwell Publishing, Oxford.

Hoekstra AY, Chapagain AK, Aldaya MM, Mekonnen MM (2011), *The Water Footprint Assessment Manual, Setting the Global Standard*, Earthscan. London, Washington DC, 199 p.

Hubaide-Restom SD, Mainardi-Remis JM, Rajal VB, Gutiérrez-Cacciabue D (2022). Cuantificación del agua en la elaboración de cuero mediante la huella hídrica. *RADI-Revista Argentina de Ingeniería*. Consejo Federal de Decanos de Ingeniería del NOA. vol.19. p89 - 94. ISSN: 23140925.

Islam BI, Musa AE, Ibrahim EH, Sharafa SA, Elfaki BM (2014), Evaluation and characterization of tannery wastewater, *Journal of Forest Products & Industries*, Vol. 3 n°3, pp 141-150.

Ladha-Sabur A, Bakalis S, Fryer PJ, Lopez-Quiroga E (2019), Mapping energy consumption in food manufacturing, *Trends in Food Science & Technology*, Vol. 86, pp 270-280.

Ley 7017 (2000), Consejo Deliberante de la Ciudad de Salta, Ordenanza municipal n° 10438 C.D., Online: <http://200.68.105.23/cdsalta-digesto.gov.ar/ordenanzas/O-2000-10438.htm>, Último acceso: 04-2023.

Mainardi-Remis JM, Gutiérrez-Cacciabue D, Rajal VB (2019), Las industrias de la Provincia de Salta y su impacto sobre la población y el recurso hídrico. *Memorias del XI Congreso Argentino de Ingeniería Industrial*. Buenos Aires, Argentina. ISBN: 9789874998057.

Mainardi-Remis JM, Gutiérrez-Cacciabue D, Romero DS, Rajal VB (2021). Setting boundaries within a bottled water plant aid to better visualize the water use: An approach through the water footprint indicator. *Journal of Water Process Engineering*. Vol. 43, 102199. <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2021.102199>.

Mainardi-Remis JM (julio 2023), *Evaluación de la huella hídrica: uso eficiente y gestión sustentable del agua en procesos industriales*, Tesis Doctoral, Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de Salta (UNSa), Salta, Argentina.

Ogemdi IK, Gold EE (2018), Physico-chemical parameters of industrial effluents from a brewery industry in Imo state, Nigeria, *Advanced Journal of Chemistry*, Vol. 1, pp 66-78.

Ölmez H, Kretzschmar U (2009), Potential alternative disinfection methods for organic fresh-cut industry for minimizing water consumption and environmental impact, *Food Science and Technology*, Vol. 42, pp 686-693.

Papadopoulos KP, Economou CN, Dailianis S, Charalampous N, Stefanidou N, Moustaka-Gouni M, Vayenas DV (2020), Brewery wastewater treatment using cyanobacterial-bacterial settleable aggregates, *Algal Research*, Vol. 49, 101957.

Ramírez Hernández V, Antero Arango J (2014), Evolución de las teorías de explotación de recursos naturales: hacia la creación de una nueva ética mundial. *Revista.luna.azúl* Vol. 39, pp 291-313.

Rockström J (2001), Green water security for the food makers of tomorrow: Windows of opportunity in drought-prone savannahs, *Water Science and Technology*, vol. 43 n°4, pp. 71-78.

Romero-Dondiz EM, Almazán JE, Rajal VB, Castro-Vidaurre EF (2015), Removal of vegetable tannins to recover water in the leather industry by ultrafiltration polymeric membranes, *Chemical Engineering Research and Design*, Vol. 93, pp 727-735.

Rueda Sánchez MP, Zapata Rotundo GJ (2018), Teoría de dependencia de recursos: premisas y aplicaciones. *Ciencia y Sociedad*, Vol. 43 n°1, pp. 75-92.

UN, Naciones Unidas, Objetivos de Desarrollo Sustentable (2015), Construir infraestructuras resilientes, promover la industrialización sustentable y fomentar la innovación, Online: <https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/infrastructure/>.

UN, Naciones Unidas, World Water Assessment Programme (2018), The United Nations World Water Development Report 2018, United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization, New York, United States, Online: www.unwater.org/publications/world-water-development-report-2018/, Último acceso: 03-2023.

Wakeel M, Chen B, Hayat T, Alsaedi A, Ahmad B (2016), Energy consumption for water use cycles in different countries: A review, *Applied Energy*, Vol. 178, pp 868-885.

Werkneh AA, Beyene HD, Osunkunle AA (2019), Recent advances in brewery wastewater treatment; approaches for water reuse and energy recovery: A review, *Environmental Sustainability*, Vol. 2 n°2, pp 199-209.

Yong L (2021), ¿Por qué el desarrollo industrial es más importante que nunca?, Online:

[https://ods9.org/news/448/por-que-el-desarrollo-industrial-es-mas-importante-qu
e-nunca](https://ods9.org/news/448/por-que-el-desarrollo-industrial-es-mas-importante-qu
e-nunca), Último acceso: 03-2023.

Fecha de recepción: 15/10/2024

Fecha de aceptación: 14/11/2024