



15 al 17 de octubre 2024

Cámara Mercantil de productos del país

## **Análisis de los consumos de agua y huella hídrica de la producción de hidrógeno verde**

### **Axel Rios\***

Biotecnología de procesos para el ambiente (BIOPROA), Facultad de Ingeniería, UdelaR, Uruguay.



Ingeniero químico, estudiante de maestría en el área de la valorización de residuos agroindustriales.

Las áreas de actuación corresponden a la remoción y recuperación de fósforo de aguas residuales, así como también al análisis de huella de agua.

### **Elena Castello**

Biotecnología de procesos para el ambiente (BIOPROA), Facultad de Ingeniería, UdelaR, Uruguay.

### **Mariana Corengia**

Instituto de Ingeniería Química, Facultad de Ingeniería, Udelar

### **Nicolás Goycochea**

Biotecnología de procesos para el ambiente (BIOPROA), Facultad de Ingeniería, UdelaR, Uruguay.

### **TEMA: Gestión de Recursos Hídricos (TEMA 4)**

Dirección del autor principal (\*): Montevideo – Montevideo– Uruguay - Tel.:091 283 770 – e-mail: axelr@fing.edu.uy

## **INTRODUCCIÓN**

En la actualidad existe interés en descarbonizar la matriz energética, reemplazando fuentes de energía de origen fósil con fuentes de energía renovables para mitigar las emisiones de gases de efecto invernadero a la atmósfera. Esto se evidencia en el aumento de la fracción de la electricidad generada con fuentes renovables, siendo esta del 20% en 1993 y 30% en 2023 (Ritchie & Rosado, 2024). La producción de H<sub>2</sub> por electrólisis utilizando fuentes de energía renovable (eólica y/o solar) permite tanto almacenar como transportar esa energía a regiones donde la producción de energía utilizando fuentes renovables se ve limitada.

Es en este contexto que resulta relevante identificar y cuantificar los impactos ambientales en las zonas donde se realizaría la producción de H<sub>2</sub>. En particular, resulta de interés enfocarse en los aspectos vinculados al uso del agua, que adquiere un estado cada vez más relevante en los análisis de ciclo de vida (Shi et al., 2020). En el proceso de producción de hidrógeno el agua es utilizada como reactivo, pero también es utilizada en diferentes servicios industriales.

Para ello se utilizan comúnmente dos metodologías, una denominada huella hídrica desarrollada por Hoekstra et al. (2011), y promovida por la Water Footprint Network y otra denominada huella de agua descrita en la norma ISO 14046:2015.

## **OBJETIVOS**

El objetivo principal del trabajo es realizar el estudio, con fines académicos, del inventario de huella de agua y calculo mediante la metodología de huella hídrica, considerando únicamente consumos directos para una propuesta teórica de planta industrial enfocado en evaluar el consumo de agua resultante de la operación de la planta.

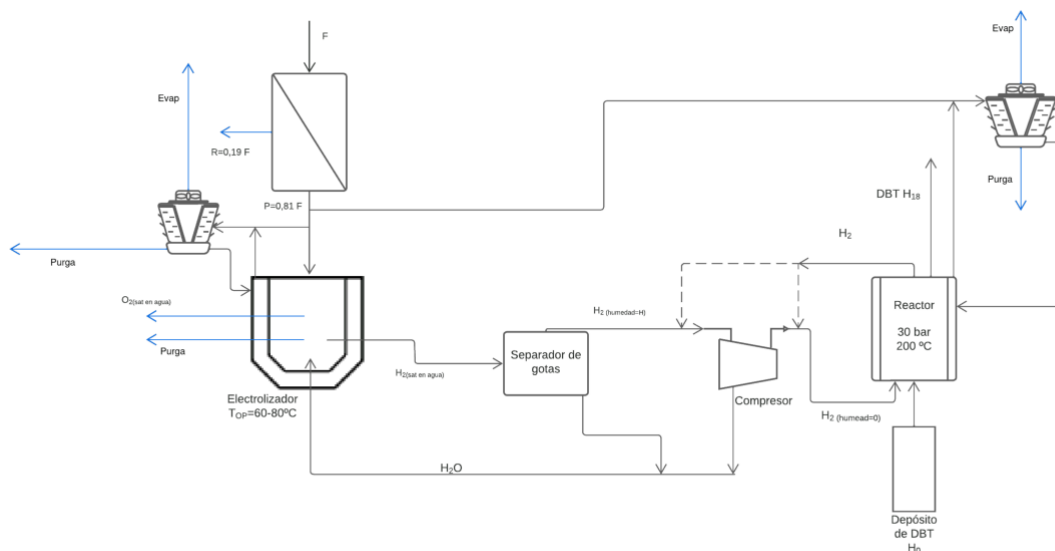
Los consumos indirectos e impactos ambientales no serán abordados en el presente trabajo debido a la complejidad adicional que conllevan y el motivo exploratorio del presente estudio enfocado en el consumo del recurso. Por lo cual, se establece un análisis de inventario, el cual busca responder cual es la etapa

15 al 17 de octubre 2024

Cámara Mercantil de productos del país  
crítica en el proceso en lo que respecta al consumo de agua y como se comparan los valores obtenidos en el presente trabajo con referencias bibliográficas y el impacto que presenta la etapa de hidrogenación.

## MATERIALES Y MÉTODOS

Para la realización de este trabajo se utilizó el proceso de producción de hidrógeno verde propuesto por el proyecto ANII FSE\_S\_2022\_1\_172980 “Diseño de Procesos para la Producción, Almacenamiento y Transporte de Hidrógeno Verde mediante Líquidos Orgánicos en Uruguay”. El sistema evaluado incluye dos equipos principales, un electrolizador y un reactor de hidrogenación. En el segundo, el hidrógeno producido es incorporado a un portador orgánico para facilitar su posterior transporte y comercialización. En este análisis el portador elegido es dibenziltolueno (DBT). Para el proceso se considera utilizar un electrolizador de baja temperatura, fijando la temperatura del proceso entre 60 y 80°C, mientras que la presión puede variar entre 1 bar y 50 bar (absolutos). Por otro lado, el proceso incorpora torres de enfriamiento para asegurar el adecuado funcionamiento de los equipos, una resina de osmosis inversa para asegurar la calidad del agua, un separador de humedad y un compresor. A partir de esta descripción del proceso se plantea el diagrama de flujo descrito en la **Figura 1**.



**Figura 1:** Diagrama de flujo propuesto, en azul las salidas de agua del sistema.

La huella hídrica es un concepto introducido por Hoekstra, en 2003, sirve como indicador del uso de los recursos de agua dulce disponibles, tanto de forma directa como indirecta. Se subdivide en tres componentes: la huella azul, la huella verde y la huella gris. La primera refiere al consumo de agua proveniente de reservorios de agua, ya sean superficiales o subterráneos, la huella verde refiere al consumo de agua proveniente de captaciones pluviales, con la excepción de aquel volumen que sin intervención humana acabaría en reservorios, mientras que la última es un indicador de la potencial contaminación medido como la cantidad de agua requerida si se buscara diluir el contaminante hasta la concentración máxima permitida. La elaboración de la huella hídrica introducido por Hoekstra requiere cuatro etapas: establecer metas y alcance; cuantificación de la huella hídrica; evaluación de la sustentabilidad de la huella hídrica; formulación de respuestas.

En lo que respecta a la norma ISO 14046:2014, en ella se define el concepto de huella de agua, que es una herramienta para tratar los posibles impactos ambientales vinculados con el agua de un proceso, producto u organización. El análisis completo de la huella de agua implica cuatro etapas: definición del objetivo y



15 al 17 de octubre 2024

### Cámara Mercantil de productos del país

alcance; análisis de inventario de la huella de agua; evaluación del impacto; evaluación de los resultados. En este trabajo se aborda el proceso hasta el análisis de inventario que coincide con las dos primeras etapas de la elaboración de la huella hídrica.

El análisis de inventario se basa en la cuantificación y evaluación de los datos que componen las corrientes del proceso, en este caso además del consumo estequiométrico de agua, en el electrolizador existen dos corrientes de salida de agua: una debida a la purga del sistema para evitar la concentración de sólidos en el electrolizador y otra debido a que los gases producidos se encuentran saturados en vapor de agua (ver Figura 1). Además, dado que las ineficiencias en el proceso de electrólisis se traducen en la generación de calor en el sistema, el electrolizador debe refrigerarse para mantener la temperatura de operación al igual que el reactor de hidrogenación debido a que es una reacción exotérmica.

En lo que refiere al alcance del trabajo, es necesario especificar algunas hipótesis utilizadas. El análisis se realiza desde la generación de hidrogeno hasta su almacenamiento en el portador orgánico, no se incluye el transporte de este ni la generación de energía eléctrica y solo se consideran consumos directos. La unidad funcional es el kg de H<sub>2</sub> producido. Muchos de los datos utilizados en el presente trabajo fueron obtenidos de un diseño de planta en desarrollo, por lo que no deben tomarse como valores finales. Finalmente, este estudio es de carácter exploratorio respecto al análisis de inventario de huella de agua directo. Dado que no se realiza evaluación de impactos no se obtendrán perfiles de impactos. Se está considerando como único producto el hidrogeno generado, dado que el oxigeno producido es venteadado a la atmosfera.

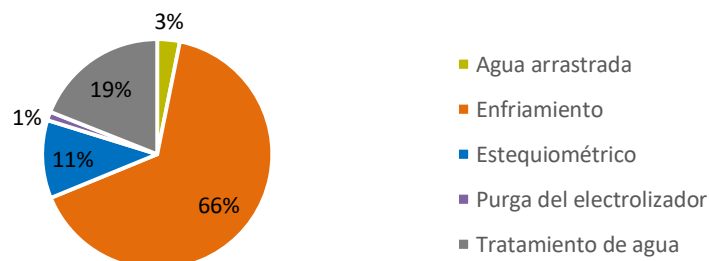
## RESULTADOS

### Extracción de agua

El primer paso en la elaboración del análisis de inventario es determinar las extracciones de agua a realizar, en este caso se considerará que toda el agua es tomada desde un mismo reservorio y no se realizan captaciones pluviales, a su vez se subdivide dicha extracción (demanda de agua) en agua para proceso y agua para servicios. Los servicios comprenden el enfriamiento del electrolizador y del reactor, los cuales se determina que tienen una demanda de agua aproximadamente constante con las condiciones operativas. Se determina que la demanda de agua del proceso para servicios corresponda a 64,4 kg H<sub>2</sub>O/kg H<sub>2</sub>.

Por otro lado, además de los servicios es necesario considerar la demanda de agua directamente vinculada con el electrolizador considerando consumo estequiométrico, flujo de purgas y agua perdida por oxigeno saturado venteadado, además de considerar el agua que debe ingresar al equipo de osmosis inversa. Se determina que la demanda de agua para servicios representa una parte muy significativa de la demanda de agua global del proceso, representando desde el 79% (1 bar, 80°C) hasta el 84% (50 bar, 60°C) de la demanda total.

En adelante se trabajará considerando que el electrolizador funciona a 1 bar y 70°C, y que el agua que se utilizara para el proceso es extraída del Río Negro. Para estas condiciones se tiene entonces que la demanda total de agua corresponde a 81,9 kg H<sub>2</sub>O / kg H<sub>2</sub>, donde el consumo estequiométrico de agua solo representa el 11% de la demanda total, mientras que el enfriamiento representa, con diferencia, la mayor demanda de agua (ver **Figura 2**).



**Figura 2:** Análisis de inventario, demanda de agua desglosada para la condición de electrolizador 1 bar y 70°C.



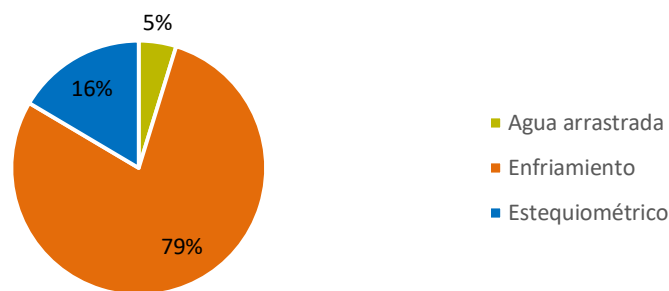
15 al 17 de octubre 2024

Cámara Mercantil de productos del país

### Consumo de agua

El consumo de agua de la planta refiere a la extracción total de agua que no es devuelta al reservorio, ya sea por consumo evaporativo, incorporación al producto u otro motivo. Se determina considerando los flujos de consumo del proceso. En este caso se asume que las corrientes de rechazo de la osmosis y las purgas del sistema son devueltas al río, por lo que estas corrientes no representan flujos de consumo. Teniendo esto en cuenta se determina que, bajo estos supuestos, el consumo de agua (lo cual corresponde a huella azul bajo la metodología de huella hídrica) corresponde a 54,6 kg H<sub>2</sub>O / kg H<sub>2</sub>. En caso de que las condiciones de la corriente de rechazo de la osmosis, así como las de las purgas sean demasiado severas, estas corrientes tendrían que ser enviadas a colector industrial en lugar de al río, generando un flujo de consumo de agua, aumentando el consumo total en 50%.

El consumo de agua desglosado se presenta en la **figura 3** y su desglose en la **tabla 1**.



**Figura 3:** Análisis de inventario, consumo de agua desglosado para la condición de electrolizador 1 bar y 70°C.

**Tabla 1**

	Consumo (L H <sub>2</sub> O / kg H <sub>2</sub> )	Consumo (L H <sub>2</sub> O / MJ)
<b>Pérdida por arrastre</b>	2,6	0,02
<b>Evaporación en torres de enfriamiento</b>	43,0	0,36
<b>Consumo estequiométrico</b>	9,0	0,08
<b>Total</b>	54,6	0,46

### Huella hídrica

Por otro lado, como fue mencionado anteriormente la huella hídrica se compone de tres partes, la huella azul, la huella verde y la huella gris.

La huella verde se asume como nula dado que toda el agua del proceso es tomada del Río Negro. La huella azul, por su parte, corresponde al consumo total de agua del proceso, al cual le corresponde al valor de 54,6 kg H<sub>2</sub>O / kg H<sub>2</sub> presentado previamente.

La huella gris se determina como la mayor de las contribuciones de cada contaminante de acuerdo con la ecuación 1, donde L se determina como el caudal extraído (81,9 kg Agua/kg H<sub>2</sub>) multiplicado por la concentración natural (Cnat), esto determina que la huella gris total tenga un valor de 21,7 kg agua/kg H<sub>2</sub>.



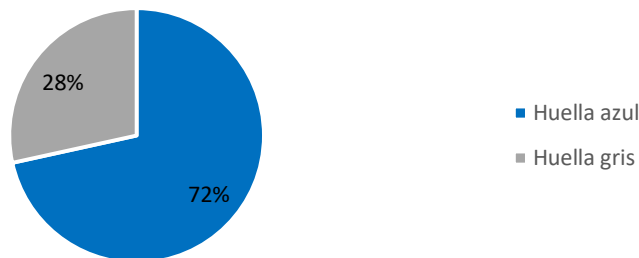
15 al 17 de octubre 2024

Cámara Mercantil de productos del país

$$Huella\ gris = \frac{L}{C_{max} - C_{nat}}$$

*Ecuación 1*

La concentración natural para los contaminantes presentes en el Río Negro se calcula como el promedio de datos históricos extraídos de DINAMA (2011). La concentración máxima se determina de acuerdo a la legislación uruguaya (Decreto N° 253/979). Los resultados de la huella hídrica obtenida se presentan en la **figura 4**.



**Figura 4:** Huella hídrica desglosado para la condición de electrolizador 1 bar y 70°C.

## CONCLUSIONES

El presente trabajo evidencia que, cuando se analizan los consumos de agua, es necesario incorporar una mirada sistémica al proceso de producción de H<sub>2</sub> verde, siendo necesario mirar más allá del consumo estequiométrico de agua. Los servicios industriales demuestran ser los responsables de la mayor parte del consumo de agua de la planta, por lo que se vuelven un factor crítico al analizar la demanda de agua de la planta.

En lo que respecta a trabajos futuros y profundizaciones en el área de estudio, resulta de particular interés expandir el alcance del estudio para incorporar consumos indirectos de materias primas como la energía eléctrica. Finalmente, es de interés agregar cuantificadores de impacto como escasez, eutrofización, entre otros.

## REFERENCIAS

1. Decreto N° 253/979. APROBACION DE NORMATIVA PARA PREVENIR LA CONTAMINACION AMBIENTAL, A TRAVES DEL CONTROL DE LAS AGUAS. Poder Legislativo, Montevideo, Uruguay, 1979.
2. DINAMA. (2011). Monitoreo y evaluacion de la calidad del agua. Plan para la definición de una linea de base del Río Negro.
3. Hoekstra, A. Y. (ed) (2003) 'Virtual water trade: Proceedings of the International Expert Meeting on Virtual Water Trade', 12–13 December 2002, Value of Water Research Report Series No 12, UNESCO-IHE, Delft, Netherlands.



15 al 17 de octubre 2024

Cámara Mercantil de productos del país

4. Hoekstra, A.Y.; Chapagain, A.K.; Aldaya, M.M.; Mekonnen, M.M. The Water Footprint Assessment Manual; Earthscan: London, UK, 2011
5. Organización Internacional de Normalización. (2014). ISO 14046:2014 Gestión ambiental — Huella de agua — Principios, requisitos y directrices
6. Ritchie, H. & Rosado, P. (2024) - "Electricity Mix" Publicado online en OurWorld In Data.org. Recuperado de: <https://ourworldindata.org/electricity-mix>
7. Shi, X., Liao, X. and Li, Y. (2020) Quantification of fresh water consumption and scarcity footprints of hydrogen from water electrolysis: A methodology framework, Renewable Energy, 154, pp. 786–796. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2020.03.026>