

Huella Hídrica de la Universidad Nacional de Costa Rica

M.Sc Rocío Hartley Ballesteros¹

Diego Armando Barquero Sánchez²

Resumen:

El acelerado crecimiento de la población mundial, junto con la expansión capitalista han provocado un desgaste prematuro del recurso hídrico, con altos niveles de contaminación y escasez que condicionan la accesibilidad al agua potable por parte de la humanidad, que no respeta el ciclo hidrológico del planeta. El informe de la UNESCO (2023), explica que tres cuartas partes de la superficie terrestre está conformada por agua, pero sólo el 0.005% de ésta es potable accesible. Esta situación priva el uso de metodologías de análisis que proporcionen un abordaje más holístico y epistémico de la problemática hídrica, como parte integral de la crisis ambiental. La economía ecológica (EE) aporta esa metodología que se requiere para tal complejidad, al incorporar el estudio del metabolismo social (MS). El MS es como gestionan las sociedades los recursos de energía y materiales que obtienen del ambiente.

Esta herramienta teórica-metodológica de análisis (Fisher-Kowalski, 1997) integra el cálculo de la huella hídrica (HH). El caso de estudio aplica estas herramientas metodológicas, al cálculo de la HH azul (HH_A) de la Universidad Nacional de Costa Rica (UNA). Los resultados obtenidos muestran que la UNA debe enfocarse en la energía eléctrica, además es necesario continuar con la medición de este indicador para poder examinar el cumplimiento o no de los objetivos propuestos en la institución. Esto denota la importancia de realizar una mejor gestión institucional en el ahorro energético, así como las estrategias necesarias para promover una universidad sustentable que minimice su incidencia en el impacto ambiental.

Palabras clave: Agua virtual, indicador biofísico, imputación multivariable, metabolismo social.

Abstract:

The accelerated growth of the world's population, together with capitalist expansion, has caused premature wear and tear of water resources, with high levels of pollution and scarcity that condition the accessibility of drinking water by humanity, which does not respect the hydrological cycle of the planet. The UNESCO report (2023) explains that three quarters of the earth's surface is made up of water, but only 0.005% of this is accessible for drinking. This situation deprives the use of analysis methodologies that provide a more

¹ Economista ecológica, coordinadora de la Cátedra de Sustentabilidad de la Escuela de Economía de la Universidad Nacional, Costa Rica. rocio.hartley.ballesteros@una.ac.cr, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5981-2853>

² Estudiante de la Escuela de Economía, Universidad Nacional de Costa Rica. diego.barquero.sanchez@est.una.ac.cr, realizó un trabajo experimental para obtener la información y los datos necesarios para la cuantificación de la huella hídrica.

holistic and epistemic approach to the water problem, as an integral part of the environmental crisis. Ecological economics (EE) provides the methodology that is required for such complexity, by incorporating the study of social metabolism (SM). The MS is how societies manage the energy and material resources they obtain from the environment.

This theoretical-methodological analysis tool (Fisher-Kowalski, 1997) integrates the calculation of the water footprint (HH). The case study applies these methodological tools to the calculation of the blue HH (HH_A) of the National University of Costa Rica (UNA). The results obtained show that the UNA should focus on electrical energy, and it is also necessary to continue measuring this indicator to examine whether or not the objectives proposed in the institution are met. This denotes the importance of carrying out better institutional management in energy savings, as well as the necessary strategies to promote a sustainable university that minimizes its impact on the environmental impact.

Keywords: Virtual water, biophysical indicator, multivariable imputation, social metabolism

Resumo:

O crescimento acelerado da população mundial, aliado à expansão capitalista, tem provocado um desgaste prematuro dos recursos hídricos, com elevados níveis de poluição e escassez que condicionam a acessibilidade à água potável por parte da humanidade, que não respeita o ciclo hidrológico do planeta. O relatório da UNESCO (2023) explica que três quartos da superfície terrestre são constituídos por água, mas apenas 0,005% desta é acessível para beber. Esta situação priva a utilização de metodologias de análise que proporcionem uma abordagem mais holística e epistémica do problema da água, como parte integrante da crise ambiental. A economia ecológica (EE) fornece a metodologia necessária para tal complexidade, ao incorporar o estudo do metabolismo social (MS). O MS é a forma como as sociedades gerem os recursos energéticos e materiais que obtêm do ambiente.

Esta ferramenta de análise teórico-metodológica (Fisher-Kowalski, 1997) integra o cálculo da pegada hídrica (PH). O estudo de caso aplica estas ferramentas metodológicas ao cálculo do HH azul (HH_A) da Universidade Nacional da Costa Rica (UNA). Os resultados obtidos mostram que a UNA deve focar na energia elétrica, sendo necessário também continuar medindo este indicador para verificar se os objetivos propostos na instituição são ou não alcançados. Isto denota a importância de realizar uma melhor gestão institucional na poupança de energia, bem como as estratégias necessárias para promover uma universidade sustentável que minimize o seu impacto no impacto ambiental.

Palavras-chave: Água virtual, indicador biofísico, imputação multivariada, metabolismo social.

1. Introducción

La condición actual del cambio climático es una manifestación de la crisis del sistema capitalista, que enmarca en especial las cualidades del recurso hídrico hoy en día. La constante escasez y problemas de disponibilidad futura de este recurso determinan, la imperativa necesidad de concientizar a la humanidad actual sobre cómo es utilizado directa e indirectamente el recurso hídrico en las diarias actividades sociales y económicas del ser humano, y en la búsqueda de opciones más eficientes y sustentables que, permitan la correcta explotación de este recurso fundamental para la sobrevivencia, tanto de la humanidad como del planeta.

El acelerado crecimiento de la población a nivel global, junto con la expansión capitalista han provocado una situación de desgaste prematuro de los recursos naturales, producto de una excesiva explotación de estos, en especial del hídrico, que presenta, además, altos niveles de contaminación en algunas áreas del planeta; condiciones que van provocado graves problemas de accesibilidad al agua potable por parte de la humanidad, que constantemente interrumpe y no respeta el ciclo hidrológico del planeta, generando que un recurso tan indispensable como el agua sea cada día más escaso. El informe de la UNESCO (2023), explica que tres cuartas partes de la superficie terrestre está conformada por agua, pero sólo el 0.005% de ésta es potable accesible.

Esta situación priva el uso de metodologías de análisis que proporcionen un abordaje más holístico y epistémico de la problemática hídrica, como parte integral de la crisis ambiental. La economía ecológica (EE) aporta esa metodología que se requiere para tal complejidad, al incorporar el estudio del metabolismo social (MS), como un instrumento que permite el análisis de los flujos de intercambio de energía, materia e información al interior de cada sociedad, y la vez, muestra como cada agente y actor social modifican su entorno y al mismo tiempo lo impactan, por medio del estudio de cinco componentes: la apropiación, la transformación, la distribución, el consumo y la excreción de la materia-energía. La EE es un paradigma que, brinda un marco teórico-metodológico de crítica al modo de producción capitalista y reflexiona sobre cómo abordar y entender la crisis de la sociedad actual ante el cambio climático. “La conjunción entre la crisis económica mundial y el avance de la crisis climática (con toda su gravedad) no es algo fortuito. Las raíces de ambas crisis son las mismas: la naturaleza del capital y de la producción capitalista” (Pajoni, 2009, p.9). Un binomio que se visualiza en la desregulación y liberalismo del capital, que conlleva como condición el desarrollo de la globalización.

El MS es la forma en que las sociedades gestionan su intercambio de energía y materiales con su ambiente. El objetivo es revertir el proceso entrópico al que se enfrenta, como cualquier ser vivo, está a merced de esta ley termodinámica (Infante-Amate et al. 2017). Esta herramienta teórica-metodológica de análisis (Fisher-Kowalski, 1997) integra el cálculo de indicadores biofísicos como la huella hídrica (HH), la cual “registra el volumen de agua consumida, evaporada o contaminada, tanto directa como indirectamente; ya sea en unidad de tiempo o en unidad de masa, que incluye la cantidad de agua necesaria para la

producción de los bienes y servicios consumidos por los habitantes de un país” (Valenciano y Fonseca, 2019, p. 210), región, comunidad, industria, institución u organización.

La cantidad de agua necesaria en la producción un bien o servicio se define como agua virtual. Representa toda el agua contenida en la cadena de producción de un bien o servicio (cultivo, transformación, fabricación, transporte y venta), se le califica como virtual porque no es una cantidad visible en los productos finales (Velázquez, 2009).

“El agua virtual (Allan, 1993) y la HH (Hoekstra, 2003) son dos indicadores que suponen un avance en la consideración de que el sistema económico, está abiertos al intercambio de flujos de materia y energía entre sistemas” (Beltrán y Velázquez, 2021, p. 45). Porque al ser integrados a la EE, permiten cuantificar aspectos del MS, que demuestran la condición real del sistema socioeconómico actual, sobre la apropiación y explotación, por parte del ser humano, de los recursos disponibles del planeta, y “que toda actividad económica (particularmente su aceleración), generará consecuencias importantes tanto en la extracción de recursos y materiales, como respecto de los desechos producidos. Ya que el flujo de energía disponible en la biósfera es finito y constante (por la primera ley de la termodinámica), lo que implica que la economía como subsistema que se nutre de la biósfera no puede crecer infinitamente” (Hartley, 2008, p. 16-17).

El estudio de Madrid-López y Giampietro (2015), explican como al fusionarse el indicador de agua virtual a la HH, como su elemento fundamental, es posible conectar el uso: La dependencia de las condiciones sociales de los flujos materiales y energéticos para su propio funcionamiento y reproducción del servicio ecosistémico hídrico con el impacto: indica la dependencia de las condiciones ecosistémicas de los flujos de materiales y energía para su propio funcionamiento y reproducción.

La HH, además integra, metodológicamente, la procedencia del recurso hídrico, dependiendo de su origen identifica tres tipos de huellas: La azul son los metros cúbicos (m^3) de agua potable extraída de fuentes subterráneas o superficiales, que se utiliza en diversas actividades humanas, por ejemplo, nacientes, agua de pozos, toda la red de acueductos que abastecen a las distintas comunidades y ciudades de un país de agua potable. La verde cuantifica la cantidad de agua de lluvia contenida en el proceso productivo principalmente agrícolas y que no forman parte de las aguas residuales. La gris es el nivel de contaminación del agua potable, como consecuencia de la cadena de producción y comercialización de un bien o servicio. De esta forma, el cálculo de la HH sería la sumatoria de estos tres elementos.

Considerando el potencial que brinda la HH, a la aplicabilidad del análisis del MS, el Proyecto Trabajo y Crisis: aportes desde una economía política crítica heterodoxa para la vida, desarrollado en el Escuela de Economía de la Universidad Nacional de Costa Rica (UNA), que busca entre otros objetivos, el estudio de los fenómenos asociados a la crisis del sistema capitalista, como el cambio climático; con el fin de promover la transformación social que conduzca a la sustentabilidad de la vida. Reconoce la importancia de aplicar estas

herramientas metodológicas, que permiten analizar una parte del MS que desarrolla con su entorno una institución como la UNA, de esta forma, el artículo presenta los resultados del cálculo de la HH azul (HH_A) de la universidad, en el periodo comprendido del 2017 al 2022, esta medición posibilita detallar la cantidad real del recurso hídrico utilizado en la institución y los puntos críticos en los cuales debería intervenir, para una mejora continua de la gestión integral del recurso en la universidad. Estructurar este indicador en una institución educativa es de especial importancia por el impacto que tiene sobre la formación de futuros profesionales y el aporte a la sociedad sobre el uso responsable del recurso hídrico, al mostrar en un caso práctico, la importancia de cuantificar un indicador como la HH.

El caso de estudio quiere, además, resaltar ¿por qué se vuelve tan importante realizar este tipo de mediciones?, en un mundo que cada vez presiona más al recurso hídrico, y el cual es esencial en el mantenimiento de la vida al interior del planeta y por ende la sobrevivencia de las diferentes especies que conviven en él, que por acción de la actividad socioeconómica de la humanidad, ha creado y acrecentado la crisis ambiental, principalmente con el aumento de la contaminación y escasez del recurso hídrico, el análisis de las condiciones de este recurso se torna crucial, la posibilidad de estructurar y aplicar indicadores que, ayuden a cuantificar el uso del recurso, brinda información de cómo, cuándo y dónde se realizan presiones irresponsables por su explotación. El indicador de HH es indispensable en el planteamiento y estudio de cualquier sistema, debido a que permite tomar medidas y acciones en el logro de uso sustentable de este recurso vital, escaso y no renovable.

En el primer apartado del artículo, se presenta una introducción al tema a desarrollar, con una descripción del marco teórico que lo sustenta, el segundo realiza una pequeña exposición de la metodología adoptada en la cuantificación de la HH_A de la UNA, en el tercero se analizan los resultados de la aplicación del indicador y por último se plantean las conclusiones y recomendaciones de la aplicación de la HH_A a la universidad.

2. Metodología para la estimación de la huella hídrica

Existen dos metodologías para calcular la HH: La ISO 14046, basándose en el análisis del ciclo de vida (ISO, 2014) y la desarrollada por la Red de Huella Hídrica (Hoekstra, Chapagain, Aldaya y Mekonnen, 2021), esta última proporciona una técnica de cálculo que se ajusta al marco teórico de análisis de la economía ecológica. El manual de Hoekstra (et al. 2021) define una norma global para obtener la HH y explica cómo desarrollar, y calcular el indicador a través de una serie de fases; pero no brinda una metodología específica de estimación de la HH para una universidad.

Esta situación ha sido solventada adaptando la HH de una empresa, que es descrita en Hoekstra (et al. 2021), a una institución universitaria, como algunos casos de estudio la han desarrollado (Chavarría-Solera et al., 2020; Ortiz-Sarango, 2018; Contreras y Torres, 2017).

Hoekstra (et al. 2021) define la HH de una empresa como: “El volumen total de agua dulce que se usa de forma directa o indirecta para su funcionamiento. Incluye dos componentes

principales: la HH operacional (directa) de una empresa, que es el volumen de agua dulce consumida por la actividad empresarial y la HH de la cadena de suministros (indirecta) de la empresa, que es el volumen de agua dulce consumida (como insumo) para la producción de todos los bienes y servicios de la empresa”. (p. 93).

Considerando tanto esta descripción de HH, como las adaptaciones que han seguido los diversos autores, ya mencionados, principalmente el aporte de Chavarría, et al (2020), se determinó las variables que se incluyen en la tabla 1, para el cálculo de la HH azul (HH_A) de la UNA, esta tabla muestra cual fue la estructura de estimación elegida y que elementos fueron seleccionados. La cantidad de m³ agua utilizada en la UNA representaría la HH directa.

El cálculo del consumo indirecto se construyó mediante la contabilización del agua virtual, incluida en recursos que son utilizados a diario en las diversas actividades académicas y administrativas de la universidad, los cuales son: el consumo de energía eléctrica medido por kilowatt por hora (kwh), cantidad de resmas de papel blanco, y el uso de combustibles fósiles de fuentes móviles, en litros de diésel, se escoge este hidrocarburo, porque el 86% de la flotilla vehicular de la UNA funciona con este combustible, por esta razón es del único que se presentan datos de consumo según el Programa UNA-Campus Sostenible (2023).

Tabla 1
Variables utilizadas en el cálculo de la huella hídrica

HH Directa	HH indirecta (Agua virtual)
	Suministros
Consumo de agua (facturación)	Papel
	Electricidad
	Consumo de combustible.

Fuente: Elaboración propia con base en Contreras y Torres (2017).

El modelo desarrollado para estimar la HH azul (HH_A) de la UNA, se estructura siguiendo el procedimiento de Chavarría (et al. 2020) y el de Hoekstra (et al. 2021), el primero determino en su estudio que, estas variables utilizadas (tabla 1) son estadísticamente significativas para calcular el indicador. La fórmula de cálculo es la siguiente:

$$HH_A = CD_{m^3/año} + CI_{m^3/año}$$

Dónde:

CD_{m³/año} = Consumo Directo Anual de agua en m³.

CI_{m³/año} = Agua virtual (AV_{m³/año}) = Consumo indirecto anual en m³.

El agua virtual se calcula:

$$AV_{m^3/año} = \sum (HH_i)$$

Donde:

HH_i = HH por suministro (energía, papel, combustible).

La HH por suministro se calcula:

$$HH_i = Consumo_i \times \text{factor de conversión (m}^3/\text{año)}$$

Donde:

$Consumo_i$ = Cantidad de papel usado, cantidad de Kwh y litros de combustible consumido.
 $\text{factor de conversión (m}^3/\text{año)}$ = factor usado para estandarizar los datos a m^3 .

Como se observa en la ecuación anterior, la elaboración de este indicador biofísico requiere de una base de datos, con cierto tratamiento y análisis estadístico que, permita estimar la cantidad y la forma en que la universidad utiliza el recurso hídrico. Este tratamiento es la conversión a unidades de volumen en m^3 , de las cantidades consumidas de los insumos utilizados en la UNA (Tabla 1). La tabla 2 contiene los factores de conversión empleados en el cálculo del agua virtual de la HH_A , son los mismos parámetros utilizados por Chavarría et al (2020), la tabla 2 muestra el equivalente de m^3 de agua por Kilowatts hora (kwh), por litro de combustible (diésel) y por resma de papel. Estos coeficientes son relevantes para la homogeneización que requiere la estimación de la HH (Hoekstra et al., 2021), para obtener un indicador confiable y comparable con otras estimaciones de huellas hídricas, en especial con la obtenida por Chavarría et al. (2020), antecedente del presente estudio.

Tabla 2.

Factores de conversión de la huella hídrica azul

Consumo Indirecto	Factor de conversión
Energía eléctrica	22 m^3 /277,77 kW/h
Diésel	0.05 m^3 /L de Combustible
Papel	5 m^3 /Resma

Fuente: Elaboración propia con base en Chavarría et al (2020, p.195).

Como se observa en la tabla 2, el factor de conversión a m^3 de agua por energía eléctrica, establece que por cada 277,77 kwh se requieren de 22 m^3 de recurso hídrico, se utiliza el factor de conversión de energía hidroeléctrica, porque representa según el ICE (2022) el 75% del total de energía consumida en Costa Rica.

Adicionalmente, la HH_A se estimó a nivel per cápita, agregando toda la población de la UNA, que incluye el número de estudiantes, personal académico y administrativo (EEUNA y UNA Transparente), con el objetivo de realizar una estimación más eficiente del consumo marginal por usuario de la institución. Se realiza sólo el cálculo de la HH_A , por falta de información para estimar la HH gris y HH verde, se recomienda el desarrollo de bases de datos que permitan la profundización y estimación de estos componentes, para una

obtención más objetiva de la HH y un mayor análisis de la contribución de la institución al metabolismo social local y nacional.

Por otra parte, como la serie de tiempo requerida para cuantificar la HH indirecta asociada al consumo de papel, está incompleta como se muestra en la figura 1, no aparecen registros de algunas cifras en las bases de datos de la UNA. Se aplicó el método de imputación multivariable de forma unilateral desarrollado por Rubín (1987), utilizando una regresión de máxima verosimilitud, con el objetivo de intentar captar los valores con la mayor probabilidad de ser cercanos a los verdaderos datos omitidos en el periodo de estudio, la técnica desarrollada por Rubin (1987), se fundamenta en métodos de simulación de Monte Carlo.

Esta metodología establece una serie de procedimientos para generar los valores imputados (Rubin, 1987), los cuales son: “Uno simular la varianza estimada del error a través del uso de la distribución asintótica de este estimador, que en este caso corresponde a una chi-cuadrado. Dos simular el vector de regresores considerando tanto la incertidumbre de dichos parámetros, a través de la distribución asintótica que corresponde a la normal multivariada como la asociada a la estimación de la varianza del error obtenida en el paso anterior y tres, generar el valor imputado considerando los valores simulados de los puntos anteriores”. (Alfaro y Fuenzalida 2009, p. 276-277), estos pasos se aplican siguiendo la siguiente formulación (Rubi, 1987), se sustituyen los datos faltantes a partir de un número ($m > 1$) de simulaciones que, considera una variable Q y V el estimador de su varianza. Después se generan m conjuntos de datos mediante simulaciones, se obtiene un estimador promedio (\bar{Q}):

$$\bar{Q} = \frac{1}{m} \sum_{t=1}^m Q_t$$

Se debe obtener la varianza de cada imputación:

$$\bar{V} = \frac{1}{m} \sum_{t=1}^m V_t^2$$

La varianza entre imputaciones:

$$\bar{V}_m = \frac{1}{m-1} \sum_{t=1}^m (Q_t - \bar{Q})^2$$

Se suman las dos fórmulas de varianzas, corrigiendo el número finito de imputaciones por $\left(1 + \frac{1}{m}\right)$, según el método de Rubin (1987) y se obtiene una varianza total:

$$VT = \frac{1}{m} \sum_{t=1}^m V_t^2 + \left(1 + \frac{1}{m}\right) \left[\frac{1}{m-1} \sum_{t=1}^m (Q_t - \bar{Q})^2 \right]$$

Alfaro y Fuenzalida (2009) describen los componentes del cálculo del estimador imputado como Q_t , V_t es el error estándar en la distribución t-student, representa la esperanza matemática de los errores estándar al cuadrado en la segunda ecuación. $\bar{V}m$ el estimador de dispersión del modelo. Los parámetros obtenidos se utilizan en un modelo de máxima verosimilitud:

$$Q(\theta/\theta^{(t)}) = \int l\left(\frac{\theta}{y}\right) f(Y_{mis}|Y_{obs}, \theta = \theta^{(t)}) dY_{mis}$$

Donde:

$\theta = \bar{Q}$

$\theta^{(t)} = VT$

\mathcal{Y} = valor imputado faltantes.

Y_{mis} = función de datos no observados.

Y_{obs} = función de datos observados.

Se estiman los parámetros del modelo con las series con información completa con la función de máxima verosimilitud, se utilizan los parámetros obtenidos en las primeras ecuaciones, para predecir los valores no observables, se sustituyen los datos objetivos por las imputaciones. De esta forma, se calculan los nuevos valores de los parámetros, al maximizar la verosimilitud de las series de datos completos, obteniendo los resultados que se observan en la figura 2.

3. Huella hídrica azul

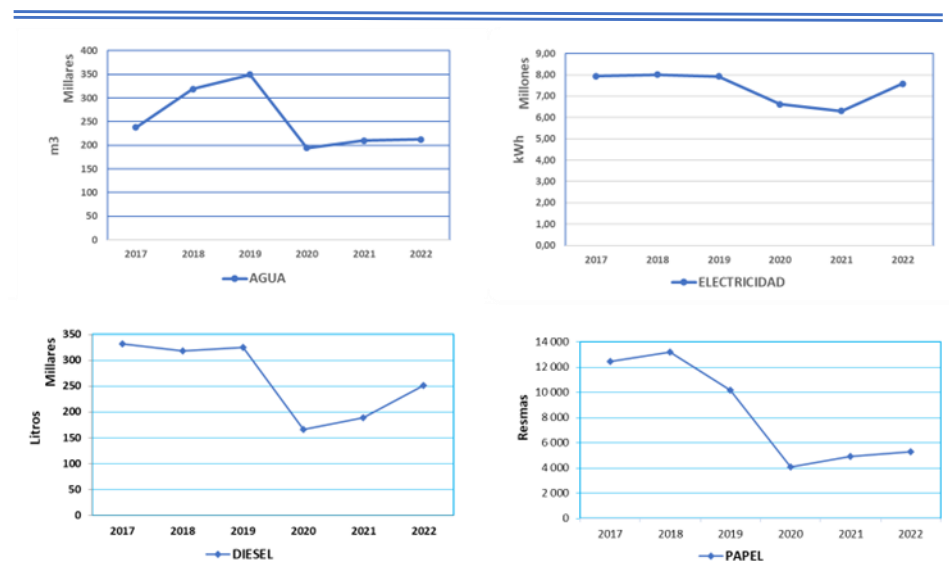
Las variables escogidas para realizar el cálculo de la HH_A, como se explicó anteriormente, son las que se observan en figura 1, que muestra el comportamiento de estos suministros utilizados por la institución en el periodo de estudio (Chavarría Solera, 2018; 2019; 2020; 2022 y 2023), la figura indica un patrón irregular, producto de las políticas desarrolladas por la UNA, en la búsqueda de una eficiencia en el uso de estos insumos. El plan de gestión ambiental institucional implementado por la universidad, permitió consolidar campañas de ahorro y concientización a estudiantes y funcionarios por medio de talleres y otros espacios de educación ambiental que, junto a la inversión en la instalación de nuevas tecnologías (Una Campus Sostenible, 2023a), han permitido que el consumo de energía eléctrica y de combustible, como se observa en la figura 1, se hayan mantenido relativamente estables en el periodo de estudio (2017-2022). Sin embargo, no presentan una tendencia hacia la disminución, condición que si se aprecia en la cantidad de remas de papel utilizadas, la mayor cobertura de internet y la actualización de los equipos de cómputo han permitido esta disminución.

No obstante, estas estrategias no han propiciado una disminución en el consumo de agua, como se puede apreciar en el figura 1, la cual aumenta consistentemente en los primeros tres años, situación agravada por la construcción y remodelación de una serie de edificios en las diferentes sedes de la UNA, junto con la no implementación de nuevas tecnologías de mayor ahorro del recurso en los servicios sanitarios, principalmente en la sede central de la universidad, condiciones que han provocado estos constantes aumentos, a pesar de que la

población universitaria no se ha incrementado, como se muestra en la tabla 3. El punto máximo se observa para el año 2019, siendo el año que inician funciones los nuevos edificios (PGAI, 2019).

El estudio, por otra parte, contempla el período de pandemia sufrida en el mundo, y como cualquier instancia a nivel global la UNA no fue la excepción sobre la afectación que esta provocó, se pueden observar los significativos cambios entre el 2019 y 2022, producto de la ausencia de la población universitaria en los diferentes recintos de la UNA, resultados que respaldan lo que muchos científicos en el mundo han argumentado, la inactividad productiva de la sociedad capitalista, brindó un respiro ambiental al planeta, al disminuir considerablemente los impactos causados a la biosfera (PNUMA, 2024). En la UNA estos efectos se observan, principalmente, en el consumo del recurso hídrico, en el uso del diésel y del número de remas de papel.

Figura 1
Consumo anual de la UNA por tipo de suministro 2017- 2022

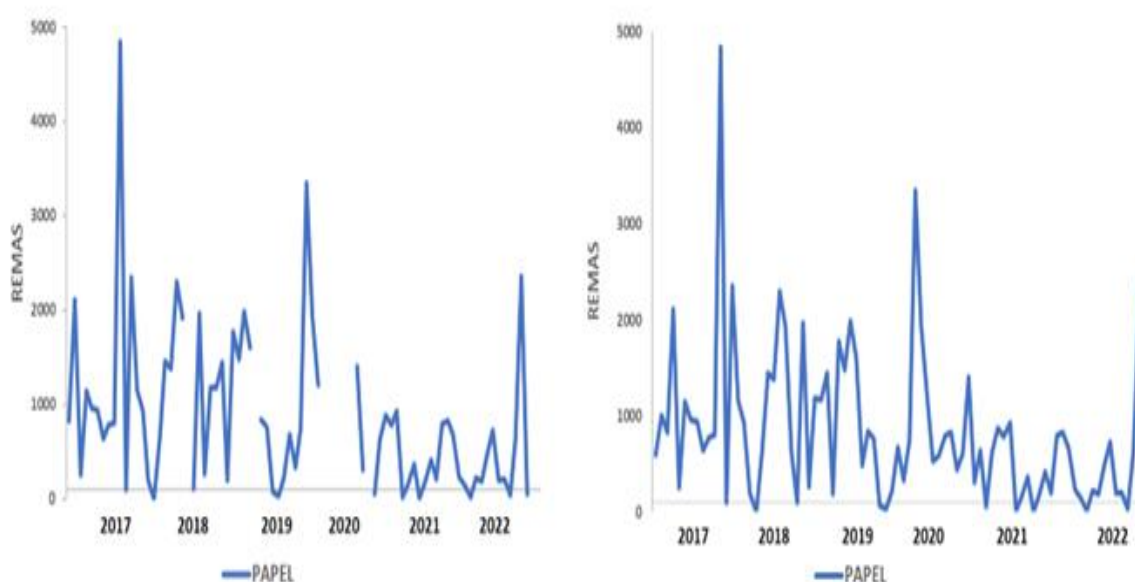


Fuente: Elaboración propia con base en datos del PGAI (2019, 2023).

Con respecto al consumo de papel se presenta una particularidad, si se hubieran utilizado, para cuantificar la HH_A , los datos anuales, como se observan en figura 1, no se habría detectado un problema en la serie de tiempo de la variable, que no existen datos para varios meses, principalmente para el año 2020, por esta razón y siendo rigurosos en el uso de la metodología, para obtener un cálculo objetivo de la HH_A , las series utilizadas son a nivel mensual. Este detalle evidencia que, si la HH se elaborara anualmente se incurriría en un grave error y no sería un indicador real del nivel de consumo de la UNA, y por consiguiente no se podría utilizar como un instrumento del análisis del metabolismo social. La información es fundamental para conocer la verdadera envergadura de la institución dentro del sistema metabólico de la región en la cual la UNA forma parte.

Por esta razón, se utilizó el método de imputación multivariable, a partir de un modelo de máxima verosimilitud, para obtener los valores más probables a los omitidos en el periodo de estudio, como se observa en la figura 2.

Figura 2
Consumo de resmas de papel por mes 2017-2022



Fuente: Elaboración propia con base en datos obtenidos por medio de la regresión realizada y del PGAI (2023).

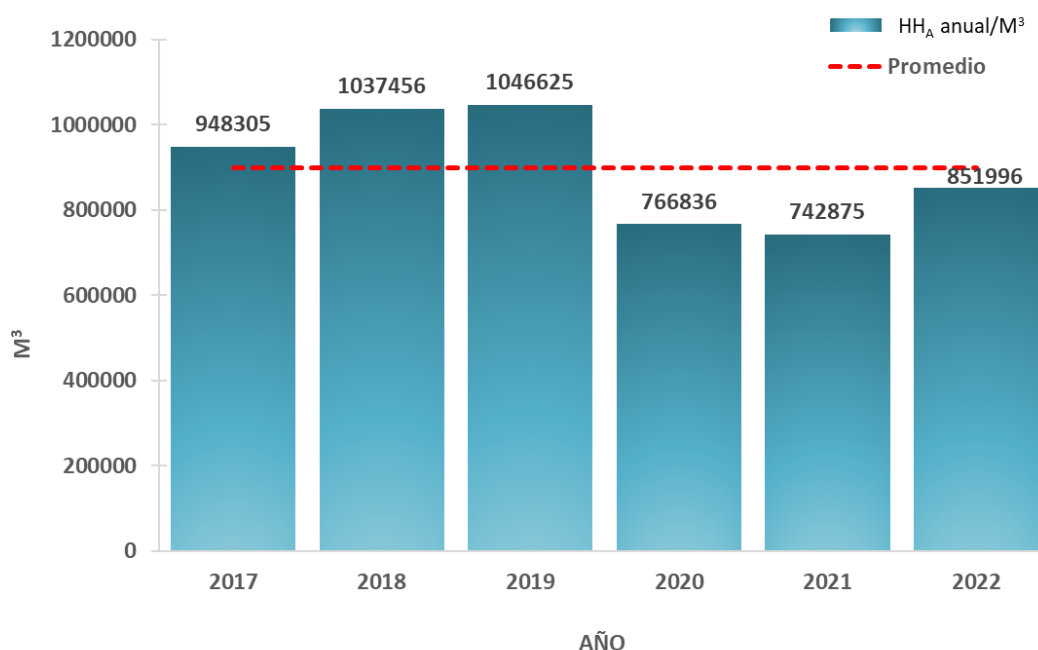
Una vez imputados los datos faltantes, se obtiene una serie de tiempo de consumo de papel homogénea en el tiempo que, permite obtener un indicador más robusto que no subestime el uso de papel en la institución.

Con la serie completada y utilizando los factores de conversión de la tabla 2, se calculó la HH_A anual de la UNA, obteniendo el indicador total que se muestra en la figura 3. Los resultados denotan un aumento significativo antes de la crisis sanitaria del 2020, se supera el promedio de la serie, pero a partir de ese año la HH_A disminuye sustancialmente alrededor de un 36%, el comportamiento a la baja continuo para el 2021, pero posteriormente con el regreso a la presencialidad en la UNA la HH_A aumento en un 14%, sin embargo no supera la esperanza matemática del periodo de estudio de 899015,5 m³ por año, esto significa que el consumo anual promedio de la UNA representa aproximadamente 225 piscinas olímpicas en su capacidad máxima (Gómez, 2023).

Con los resultados obtenidos mostrados en las figuras 3, 4 y la tabla 4, se visualiza lo que Beltrán y Velázquez (2011) explican que es “el proceso producción-consumo” (p,29) al interior del metabolismo hídrico-social de la UNA, analizado utilizando los cinco procesos metabólicos, se denota que se apropia (primer proceso metabólico) del recurso hídrico, como un insumo indispensable para mantener y reproducir su función de producción en

forma directa y como agua virtual, esta forma de apropiación circula entre las diversas sedes de la UNA, por medio del traslado de su población y de las remas de papel necesario en los diversos recintos de la universidad. De esta forma la UNA, consume el recurso hídrico en forma de papel, combustible, agua potable como satisfactor básico del quehacer de toda actividad social o económica de cualquier agente productivo, y como energía eléctrica. Finalmente excreta el recurso hídrico, como energía disipada, papel desechado y calor disipado, y gases tóxicos, “cada fase del proceso tiene su propio metabolismo hídrico, esto es, tiene entradas y salidas de agua, en forma real y virtual” (Beltrán y Velázquez, 2011, p.29). Los procesos metabólicos identificados en la UNA serían cuatro, apropiación, circulación, consumo y excreción. En cuanto al último proceso metabólico la UNA ha realizado grandes esfuerzos para disminuir el impacto sobre el recurso hídrico local, “actualmente cuenta con 9 plantas de tratamiento, de las cuales 7 son de lodos activados, una es un Humedal Artificial y una es un Reactor de Biopelícula Móvil (MBBR)” (UNA Campus Sostenible, 2023b, p.5).

Figura 3
Huella hídrica azul de la UNA



Fuente: Elaboración propia con base en datos obtenidos del cálculo HH_A.

Adicionalmente, se realizó el cálculo de la HH_A a nivel per cápita (figura 4), utilizando la información de la tabla 3, que muestra la población total de la UNA, considerando tanto la población regular, como la flotante, que son aquellos estudiantes y académicos que no tienen una presencia regular en la universidad, sino de forma ocasional. Pero que de una u otra forma utilizan tanto el recurso hídrico, como las otras variables contempladas en el estudio. Por otra parte, es importante explicar que en el cálculo de la HH_A per cápita, se considera que todas las personas en la institución utilizan el recurso hídrico, la electricidad

y el combustible de diésel, debido al empleo de vehículos para giras y transporte de trabajadores y estudiantes entre cedes.

Tabla 3
Población de la UNA por año.

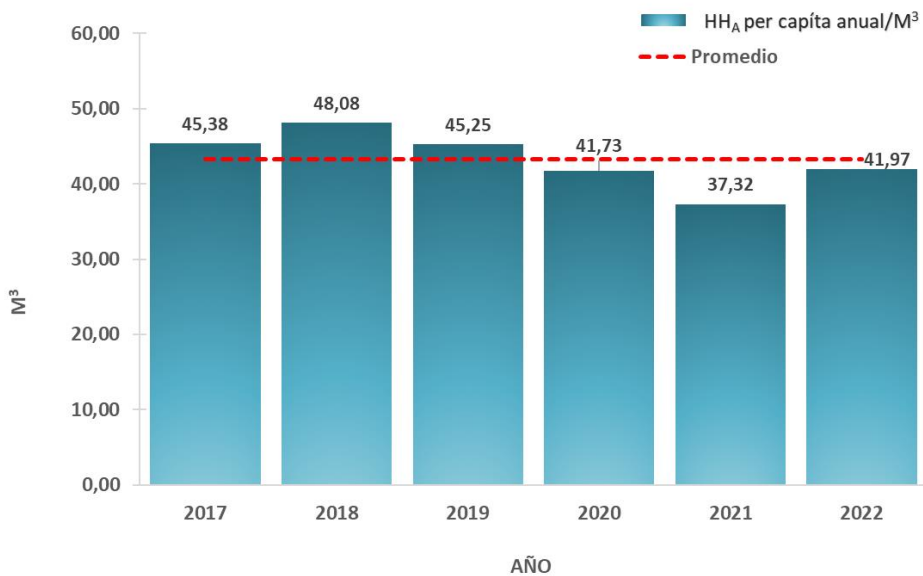
Año	2017	2018	2019	2020	2021	2022
Funcionarios	3622	3962	4023	3600	3603	3555
Estudiantes	28676	27476	27072	20115	19855	20344
Total	32298	31438	31095	23715	23458	23899

Fuente: Elaboración propia con base en datos de EEUNA y UNA transparente.

Sin embargo, el uso de papel que adquiere la universidad es utilizado exclusivamente por los académicos y personal administrativo de la UNA, por esta razón se excluye del cálculo de la HH_A del papel per cápita, la población estudiantil.

En la tabla 3 se observa, que el total de estudiantes y funcionarios pertenecientes a la UNA durante la serie evaluada disminuyo progresivamente hasta el 2020, en donde el cambio se dio de forma abrupta, la UNA perdió poco menos de 7000 estudiantes y 423 funcionarios de un año a otro, producto de las consecuencias de la pandemia, esta disminución continuo levemente en el 2021, lo cual al tener una relación inversamente proporcional entre población y el indicador, incidió relativamente en la disminución de la cuantificación de HH_A, per cápita, como se observa en la figura 4.

Figura 4
Huella hídrica azul per cápita de la UNA



Fuente: Elaboración propia con datos en resultados obtenido del cálculo de la HH_A.

Al analizar los resultados mostrados en la figura 4, el indicador ecológico denota un comportamiento diferente al observado en la figura 3, en este el pico más alto fue en el año 2019, los primeros tres años superan al promedio anual del período de estudio, en cambio a nivel per cápita se presenta en el año 2018, precisamente porque en este año se alcanza la mayor población universitaria del periodo de estudio, posteriormente se muestra una tendencia decreciente en el número de estudiantes y funcionarios en la UNA. Sin embargo, a partir del año siguiente y hasta el 2021 se visualiza una reducción sustancial en la HH_A atribuido a la disminución en el uso de papel al interior de la institución, si se observa la tabla 4 que desglosa el cálculo de la HH_A per cápita, el punto más bajo de la serie evaluada es en el año 2021, exceptuando el indicador del agua y del uso del diésel, se advierte que en este año la reducción es atribuida a la mejor utilización y reducción del uso de papel, cuyo aporte al indicador para este año con respecto al 2020 disminuyó en un 49.7%. Además, aun cuando existe una tendencia a la disminución de estudiantes esta variable no explica el cambio, como se muestra en la tabla 3, el efecto no fue considerable como para incidir en la reducción del indicador, la diferencia entre el 2020 al 2021 fue de tan sólo un 1.3% en el número de estudiantes.

Por otra parte, específicamente en los años 2020 y 2021 se obtuvo una reducción importante en el consumo de combustibles dada la imposibilidad de realizar giras y la reducción en las necesidades de transporte de estudiantes y personal institucional para el traslado entre las diferentes sedes de la UNA, lo que explica la reducción de la HH_A de esta variable, como se aprecia en la tabla 4.

Además, en estos años a nivel per cápita, no se aprecian cambios tan abruptos como en la figura 3, por el efecto de la disminución proporcional del indicador a consecuencia de que, el denominador en el cálculo de la HH_A per cápita se redujo generando un suavizamiento del efecto de la reducción de la HH_A total, siendo la reducción de la HH_A del 2019-2021 de aproximadamente 8%.

Tabla 4
Huella hídrica azul por tipo de variable 2017-2022.

Año	Combustible	Papel	Energía	Agua	Total
2017	0,51	18,04	19,48	7,48	45,38
2018	0,51	17,26	20,17	10,15	48,08
2019	0,52	13,31	20,18	11,23	45,25
2020	0,35	11,08	22,10	8,21	41,73
2021	0,40	6,67	21,30	8,94	37,32
2022	0,53	7,43	25,14	8,88	41,97
Media m ³	0.47	12,29	21,39	9,13	43,29
Media litros	469.64	12298.57	21394.11	9126.52	43288.85

Fuente: Elaboración propia con base en los datos obtenidos del cálculo de la HH_A directa e indirecta.

La media condicional aritmética del indicador per cápita durante la serie evaluada, fue de $43,29\text{m}^3$ por año, lo que indica de forma intuitiva que un estudiante o funcionario de la UNA, utiliza aproximadamente 43000 litros de agua anualmente directa e indirectamente, lo que representa alrededor de 8,6 camiones cisterna de consumo anual, dado que estos últimos poseen una capacidad media de 5000 litros, es un resultado realmente preocupante, que a su vez muestra la importancia de un indicador como la HH_A , que al considerar el agua virtual evidencia el verdadero nivel de uso del recurso hídrico en una institución como la UNA y el de cualquier otra institución. De esta forma, “el agua virtual se puede entender como un indicador del consumo de agua desde la producción y la HH desde el consumo” (Beltrán y Velázquez, 2011, p.23), este indicador evidencia un hecho fundamental que los individuos, independientemente de su actividad, no consumen solamente el agua directamente, sino que cada bien o servicio que se utilice como insumo de otro proceso productivo o actividad social, conlleva el consumo indirecto del agua que estos bienes y servicios contienen, visualizando la interacción metabólica que el uso de este recurso implica (Peinado, et al., 2020).

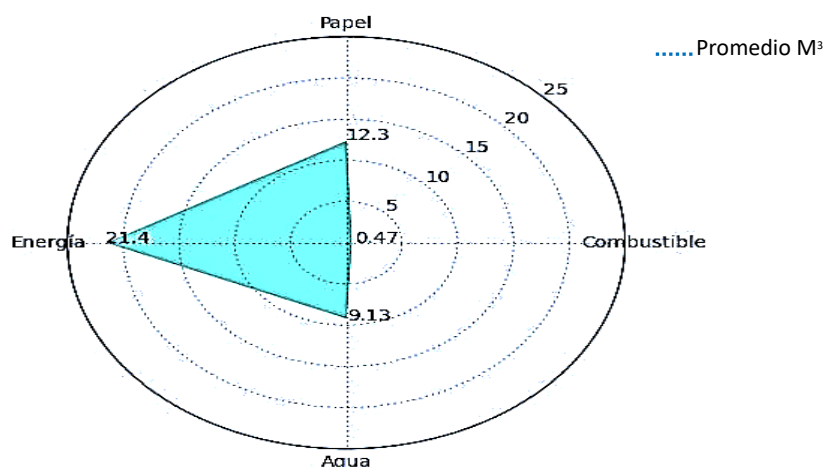
La cuantificación de la HH_A posibilita analizar el metabolismo social a través de sus cinco procesos metabólicos: extracción, apropiación, transformación, circulación y excreción; y la vez el impacto que causan, no sólo sobre el recurso hídrico, sino sobre la presión que se ejerce sobre la explotación de otros recursos naturales, como la energía, combustibles y la fabricación de papel, y cómo la mayor necesidad de ellos por parte de la UNA, presiona la posibilidad de accesibilidad de las sociedades adyacentes a la universidad a los mismos recursos. Si se compara el promedio mensual anual de la HH_A de la UNA con el promedio por industria (servicios) de consumo de agua, del periodo de estudio, existe una diferencia del 80.7%, que representa el consumo de agua virtual, que no se contempla en los cálculos normales del recurso, un porcentaje elevado que evidencia la poca comprensión y ocupación por considerar al agua como un recurso de múltiples funciones, y del cual toda actividad: productiva, económica o social depende, además no se debe obviar un hecho fundamental la falta de agua potable y su accesibilidad a nivel mundial.

Utilizando las medias en m^3 de la tabla 4 se realizó la figura 5, para demostrar cual es el aporte individual promedio de cada una de las variables sobre el indicador de HH_A de la UNA. La figura 5 visualiza fácilmente la contribución de cada recurso en el cálculo del indicador, el uso de la energía eléctrica aporta el mayor promedio de 21.4m^3 , es decir cada individuo de la universidad consume 21.394 litros de agua en promedio por el uso de la electricidad, aproximadamente en un 49% coadyuva al indicador. En cambio, el uso de papel y de agua poseen aportes relativamente similares de 12.3 y 9.13 m^3 per cápita respectivamente, el que prácticamente no aporta a la HH_A es el consumo de diésel, como se denota con una participación promedio de apenas 0.47 litros cúbicos per cápita.

La HH_A de la energía eléctrica, a lo largo del periodo de estudio, ha mantenido una tendencia de aumento, inclusive en los años más complicados de la pandemia, la reducción es insignificante, apenas de un 4%. Esto denota la importancia de realizar una mejor gestión institucional en el ahorro energético. Situación que explica porque, los resultados de la HH_A

no son más favorables, a pesar del esfuerzo de la UNA en lograr que la universidad sea sustentable.

Figura 5
Aporte promedio por tipo de insumo de la UNA a la HH_A



Fuente: Elaboración propia con base en los resultados de la HH_A.

Por otra parte, al comparar los resultados obtenidos con los cálculos realizados por Chavarría et al (2020), las HH_A de la UNA, a largo de poco más de una década, no se ha visto sustancialmente disminuida, sólo en el periodo comprendido por la pandemia del Covid-19, que implicó plantear una serie de políticas de protección para los estudiantes y funcionarios, lo cual creó un comportamiento anormal sobre la dinámica universitaria, pero una vez superado el periodo más crítico de la pandemia y se reanuda la presencialidad los indicadores empezaron a aumentar. Lo que demuestra que la institución debe realizar un esfuerzo mayor en materia de gestión hídrica pero más holística, los resultados indican que las reducciones sustanciales de la HH_A son consecuencias de la pandemia, no por medidas impulsadas por la UNA. Las políticas por implementar deben integrar la complejidad del recurso como un insumo multifuncional y ecosocial (Aguilera, 2008).

Los resultados demuestran que el problema mayor de la institución no es el consumo de agua directa, como se podría suponer erróneamente, al realizar el análisis del proceso metabólico hídrico del binomio producción-consumo de la UNA, por medio de la HH_A, se descubre que es el agua virtual contenida en la energía eléctrica. Es la variable que deben dirigir los esfuerzos de gestión ambiental de la UNA. Acciones impulsadas por la institución, han conducido a disminuir la HH_A del papel y se visualiza una tendencia ligera de reducción en la HH_A del agua directamente.

4. Conclusiones y recomendaciones

La cuantificación de la HH_A denota la importancia que en el país, instituciones académicas como la UNA, que siempre se ha caracterizado por ser una generadora de pensamiento crítico, trabajen con indicadores que les permitan medir y gestionar adecuadamente el uso del agua, con el fin de que se promuevan cada vez más acciones para la reducción de su huella hídrica, priorizando siempre la sustentabilidad y la conciencia ambiental tanto en la población interna de la universidad, como a nivel regional.

Es vital que de forma conjunta todos como sociedad, desde consumidores individuales, familias; empresas (tanto públicas como privadas) y el gobierno en general se unan en la toma de decisiones y acciones concretas, que con ayuda de indicadores como la HH les permitan realizar los ajustes necesarios, focalizando dónde, cómo se deben poner en práctica las medidas por realizar. La UNA, juega un papel fundamental, en la concreción de estas condiciones, como promotora e impulsadora del conocimiento y el cambio de aptitud social que se requiere en el país, en la búsqueda de un desarrollo sustentable.

El MS permite examinar el cómo y en qué cantidades la UNA utiliza el agua. Se puede determinar de qué manera esta institución interactúa con su entorno natural. El análisis permite identificar cambios significativos a la baja en el consumo de papel y diésel dentro de la institución, variaciones que sin duda alguna impactan positivamente en las condiciones ambientales de las diferentes regiones de influencia de la UNA, una repercusión generadora de beneficio social.

No obstante, una vez superada la pandemia y reiniciar la actividad normal de la institución, la HH_A muestra una clara tendencia de aumento, revelando dónde se deben dirigir los mayores esfuerzos de la institución, en la gestión de la energía eléctrica. Este resultado denota la utilidad de un indicador como la HH, que ayuda a identificar cuáles son las áreas prioritarias y a la su vez que la gestión del recurso hídrico no es sólo su consumo directo, sino el consumo virtual del agua. Es el mayor aporte metodológico y analítico de la cuantificación del indicador, el número que se obtiene al final es relevante, pero lo importante es como ésta compuesto e integrado al nivel metabólico de la UNA.

Reducir un indicador tan importante como el de la HH es vital para conservar el recurso y lograr mitigar los impactos sobre el ambiente que crean las diversas actividades cotidianas, de una institución como la UNA. Algunas recomendaciones en pro de lo anterior son: mantener una constante capacitación a los funcionarios y estudiantes de la universidad, promoviendo una concientización de la importancia del ahorro del agua para su sustentabilidad presente y futura.

La implementación de dispositivos para el ahorro de agua como aireadores para los grifos, los cuales contribuyen a una reducción de entre 30 y 50% del consumo, la instalación de inodoros más eficientes para la reducción de litros en las descargas. Ubicar sensores de movimiento y temporizadores para apagar automáticamente las luces cuando no se

necesiten y mejorar las condiciones de iluminación natural son parte de los esfuerzos, si se desea una reducción sustancial del indicador.

Aunado a lo anterior, es crucial y necesario continuar con la medición de este indicador para poder examinar el cumplimiento o no de los objetivos propuestos en la institución, puntos de mejora, así como las estrategias necesarias para promover una universidad sustentable que minimice su incidencia en el impacto ambiental.

Las bases de datos de las estancias de la UNA, dedicadas a la gestión ambiental, brindan información suficiente y eficiente para la cuantificación de la HH_A, lo que permitiría obtener el indicador de forma regular.

5. Referencias

Aguilera, F. (2008). *La nueva economía del agua*. Catarata.

Alfaro, R. & Fuenzalida, M. (2009). Imputación múltiple en encuestas microeconómicas. Cuadernos de economía, 46(134), 273-288. <https://dx.doi.org/10.4067/S0717-68212009000200007>

Allan, J.A. (1993). Fortunately there are substitutes for water otherwise our hydropolitical futures would be imposible. In ODA, Priorities for water resources allocation and management, ODA, London, pp.13-26.

Beltrán, M. J., & Velázquez, E. (2021). La ecología política del agua virtual y huella hídrica. Reflexiones sobre la necesidad de un análisis crítico de los indicadores de flujos virtuales de agua en la economía. Revista De Economía Crítica, 2(20), 44–56. <https://www.revistaeconomicacritica.org/index.php/rec/article/view/85>

Beltrán M. J. & Velázquez E., (2011). Del metabolismo social al metabolismo hídrico. EcoEcoEs. Asociación de Economía Ecológica en España. <http://www.ecoeco.es>

Contreras Tuirán, Y & Torres Porto, C. (2017). Cuantificación de la huella hídrica en las instalaciones de la universidad de córdoba campus montería, para el año 2014.

Chavarría Solera, F. (2018). Informe avance PGAI UNA 2017. <https://documentos.una.ac.cr/handle/unadocs/9128>

Chavarría Solera, F. (2019). Informe Avance PGAI UNA 2018. <https://documentos.una.ac.cr/handle/unadocs/10428>

Chavarría Solera, F. (2020). Informe avance PGAI UNA 2019. <https://documentos.una.ac.cr/handle/unadocs/11661>

- Chavarría Solera, F. (2022). Informe Avance PGAI UNA 2021.
<https://documentos.una.ac.cr/handle/unadocs/15120>
- Chavarría Solera, F. (2023). Informe Avance PGAI UNA 2022.
<https://documentos.una.ac.cr/handle/unadocs/15195>
- Chavarría-Solera, F., Gamboa-Venegas, R., Rodríguez-Flores, J., Chinchilla-González, D., Herrera-Araya, A., & Herra-Solís, A. C. (2020). Medición de la huella hídrica azul de la Universidad Nacional de Costa Rica, del 2012 al 2016. *Uniciencia*, 34(1), 189-203.
[https://documentos.una.ac.cr/bitstream/handle/unadocs/13998/Chavarr%C3%ADa%20%20et%20Huella%20h%C3%ADdrica-020.pdf?sequence=1&isAllowed=yEnerg%C3%ADahidroelectrica%E2%80%93RIDER.\(2019.\)](https://documentos.una.ac.cr/bitstream/handle/unadocs/13998/Chavarr%C3%ADa%20%20et%20Huella%20h%C3%ADdrica-020.pdf?sequence=1&isAllowed=yEnerg%C3%ADahidroelectrica%E2%80%93RIDER.(2019.))
- Fischer-Kowalski, M. (1997). Society's Metabolism: On the Childhood and Adolescence of a Rising Conceptual Star. *The International Handbook of Environmental Sociology*. 119-137.
- Gómez, I. (2023). Piscina olímpica: que es y sus características - Fluidra. Fluidra.
<https://www.fluidra.com/projects/es/piscina-olimpica/>
- Hartley Ballester, M. (enero – diciembre de 2008). “Economía ambiental y economía ecológica: Un balance crítico de su relación”. *Revista Economía y Sociedad*, (33 y 34), p. 55 – 65.
- Hartley Ballester, R. (enero – abril del 2008). “Necesidades y consumo: posibilidades del ambiente”. *Revista Energía*. (54), p.14-23.
- Hoekstra, A.Y. (2003). “Virtual Water. An Introduction”. *Virtual Water Trade. Proceedings of the International Expert Meeting on Virtual Water Trade. Values of Water Research Report Series* (12).
- Hoekstra, A. Chapagain, A. Aldaya, M. y Mekonnen, M. (2021). Manual de evaluación de la huella hídrica.
https://www.waterfootprint.org/resources/TheWaterFootprintAssessmentManual_Spanish.pdf
- Infante-Amate, Juan, González de Molina Manuel, Toledo Víctor M. (2018) “El Metabolismo Social. Historia, métodos Y Principales Aportaciones”. *Revibec: Revista Iberoamericana De Economía Ecológica* 27, p. 130-152.
<https://raco.cat/index.php/Revibec/article/view/335101>

- Instituto Costarricense de Electricidad (ICE). (2022). Generación y demanda. Informe anual. <https://apps.grupoice.com/CenceWeb/CenceDescargaArchivos.jsf?init=true&categoria=3&codigoTipoArchivo=3008>
- International Organization for Standardization (ISO). (2014). ISO 14046: Environmental management-Water footprint-Principles, requirements and guidelines. Ginebra: ISO. <https://cdn.standards.iteh.ai/samples/43263/98b5af59d9574880a6d97da0aeb30940/ISO-14046-2014.pdf>
- Madrid-López, C. & Giampietro, M. (2015). The Water Metabolism of Socio-Ecological Systems: Reflections and a Conceptual Framework. Journal of Industrial Ecology. DO:19. 10.1111/jiec.12340.
- Ortiz Sarango, C.A. (2018). Medición de la huella hídrica de la Universidad Politécnica Salesiana campus sur. <https://dspace.ups.edu.ec/handle/123456789/16078>
- Pajoni, G. (2009). Crisis del sistema capitalista –análisis, coyuntura y alternativas. <https://doczz.es/doc/6350386/descargar-archivo>
- Peinado, G.; Mora, A.; Ganem, J.; Ferrari, B. (2020). Las huellas de la contradicción entre desarrollo y ambiente. Un análisis del metabolismo socioeconómico en América del Sur a través de sus huellas ecológica e hídrica Revista del CESLA, vol. 25. <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=243362830003>
- Programa para el medio ambiente (PNUMA). (2024). COVID-19: materiales del Programa de la ONU para el Medio Ambiente. <https://www.unep.org/es/node/27394>
- Programa UNA-Campus Sostenible. (2023). Indicadores ambientales 2017-2022. <https://documentos.una.ac.cr/handle/unadocs/15510>
- Programa de gestión ambiental institucional (PGAI). (2019). Informe de avance 2019. <https://documentos.una.ac.cr/handle/unadocs/11661>
- Programa de gestión ambiental institucional (PGAI). (2023). Informes de avance PGAI-UNA 2011-2022. <https://documentos.una.ac.cr/handle/unadocs/7331>
- Rubin, D.B. (1987) Multiple Imputation for Nonresponse in Surveys. John Wiley & Sons Inc. <http://dx.doi.org/10.1002/9780470316696>
- UNESCO. (2023). Informe Mundial. Alianzas y cooperación por el agua. Naciones Unidas sobre el Desarrollo de los Recursos Hídricos.

UNA Campus Sostenible (2023a). Boletín digital #1. Recursos naturales, educación, ambiente y sostenibilidad. Universidad Nacional.

<https://documentos.una.ac.cr/handle/unadocs/15751>

UNA Campus Sostenible (2023b). Boletín digital #3. Noticias e información de nuestro quehacer. Universidad Nacional.

<https://documentos.una.ac.cr/handle/unadocs/15956>

Velázquez, E. (2009). “El agua virtual, la huella hídrica y el binomio agua-energía: repensando los conceptos”. Boletín Ecodes.

Webb:

UNA Transparente. <https://www.transparencia.una.ac.cr/>

EEUNA. Estadísticas estudiantiles. <https://www.eeuna.una.ac.cr/index.php>

ODS Costa Rica. <https://ods.cr/es/17-objetivos-de-desarrollo-sostenible/los-odm-sus-logros-y-pendientes>