

Evaluación de la huella hídrica del café en la estación experimental Pueblo Bello.

Coffee water footprint assessment in Pueblo Bello experimental station.

Daniel Andrés Cotes-García¹, Luis Carlos Díaz-Muegue², Martha Lucia Mendoza-Castro³

^{1,2}Fundación Universitaria del Área Andina - Colombia

ORCID: ¹[0000-0003-3936-2669](https://orcid.org/0000-0003-3936-2669), ²[0000-0001-9587-6061](https://orcid.org/0000-0001-9587-6061), ³[0000-0002-0323-3091](https://orcid.org/0000-0002-0323-3091)

Recibido: 04 de noviembre de 2021.

Aprobado: 15 de diciembre de 2021.

Resumen— En este estudio se utilizó el software Cropwat 8.0, con el fin de evaluar la huella hídrica del café en la estación experimental Pueblo Bello en el departamento del Cesar, el cual se ve reflejado en la sostenibilidad Ambiental, social y económica de la huella hídrica. Esta metodología se basó en el manual de huella hídrica propuesto por Hoekstra et al, en donde para calcular la huella hídrica se tomó como referencia los datos climáticos para los años 2017 y 2018, los cuales sirvieron para calcular la huella hídrica verde y el Agua Virtual. Finalmente, los resultados mostraron que la huella hídrica en el 2017 fue 84,24 m³/año y para el 2018 fue 86,58 m³/año, lo cual demuestra que el consumo de agua en la estación experimental para estos años fue bajo, ya que para producir 1 Kg de café se requirió aproximadamente 0,3 litros de agua.

Palabras Claves: huella hídrica; sostenibilidad; Agua Virtual; beneficio del café; índice de Escasez Hídrica.

Abstract— In this study, the software Cropwat 8.0 was used to assess the coffee water footprint in Pueblo Bello experimental station in the department of Cesar, which was reflected in the water footprint environmental, social and economic sustainability. This approach was based on the water footprint manual proposed by Hoekstra et al, where to calculate the water footprint was taken into account as a reference the climatic data for the years 2017 and 2018, which served for calculating green water footprint and Virtual Water. Finally, the results showed the water footprint in 2017 was 84,24 m³/año and in 2018 was 86,58 m³/año, which demonstrate that the water consumption in the experimental station for these years was low, because for producing 1 Kg of coffee it is required approximately 0,3 liters of water.

Keywords: water footprint; sustainability; Virtual Water; coffee beneficiation; Water Scarcity Index.

*Autor para correspondencia.

Correo electrónico: dcotes@areandina.edu.co (Daniel Andrés Cotes García).

La revisión por pares es responsabilidad de la Universidad de Santander.

Este es un artículo bajo la licencia CC BY-ND (<https://creativecommons.org/licenses/by-nd/4.0/>).

Forma de citar: D. A. Cotes-García, L. C. Díaz-Muegue y M. L. Mendoza-Castro, "Evaluación de la huella hídrica del café en la estación experimental Pueblo Bello", Aibi revista de investigación, administración e ingeniería, vol. 10, no. 1, pp. 13-28, 2021.

I. INTRODUCCIÓN

Durante las últimas décadas, la demanda global de agua, conducida principalmente por el crecimiento de la población y desarrollo económico ha estado incrementando en una tasa de 1% por año; al mismo tiempo, el ciclo de agua global está intensificándose debido al cambio climático, con regiones secas que se están haciendo aún más secas y eventos extremos más frecuentes [1,2].

Sin duda alguna, un indicador que permite monitorear el consumo de agua es la huella hídrica, el cual se refiere al consumo total de agua que incluye consumo agua directa e indirecta (agua consumida para producir productos de entrada en el proceso de producción) para producir los bienes y servicios para un cierto grupo de personas [3; 4]; esto quiere decir, que la huella hídrica simultáneamente considera la cantidad y la calidad de agua desde la perspectiva de producción y cadenas de suministro, y está cercanamente relacionada con los grupos asociados con el consumo de agua, por lo tanto, provee una perspectiva nueva e innovadora para la gestión del agua [5,6,4].

Actualmente, existen diferentes modelos de simulación de cultivo que se utilizan para evaluar la huella hídrica, tales como FASSET, CROPWAT 8, DSSAT y WOFORST, los cuales predicen herramientas que ayudan a los tomadores de decisiones a manejar la planeación de recursos hídricos efectivos, proveen información precisa sobre los requerimientos de agua, y calculan el requerimiento de agua de irrigación como una función del tipo de suelo, cultivo y condiciones climáticas [7,8, 9], la mayoría de estos métodos tienen la limitación de que ellos no pueden completamente capturar la variación espacial del uso de agua a través de y entre los campos agrícolas [10].

Por su parte, el sector económico que más contribuye a la demanda global de agua es la agricultura, ya que es el mayor usuario de agua dulce, contabilizando el 99% del consumo de agua global [11, 12]; dentro de este, se destaca el cultivo de café, ya que dentro de su proceso de producción, una de las etapas que más consumo de agua genera es el beneficio tradicional del mismo, en esta etapa se pueden llegar a emplear hasta 40 litros de agua por kilogramo de café pergamino seco, distribuidos en 12,5% en el despulpado, 37,5% en el lavado y transporte de granos y 50% en el transporte de la pulpa, la disposición de estas aguas generalmente es inadecuada, debido a que se lleva a cabo en los afluentes hídricos o en terrenos al aire libre [13].

Cabe destacar, que para el área hidrográfica Caribe aproximadamente el 19% del agua virtual verde está asociada al café, con 242,1 millones de m³ de agua, ubicándose en el tercer lugar en cuanto a consumo de agua por productos agrícolas, detrás de los cultivos de plátano y banano, con 517,6 millones de m³ y 475,3 millones de m³ respectivamente [14].

De esta forma, se evidencia que uno de los principales aspectos negativos asociados con la producción tradicional de café es el relacionado con los impactos al agua, debido a que esta se utiliza para el beneficio del café, y las aguas mieles del proceso se vierten en ríos y arroyos sin ningún tratamiento, lo cual afecta directamente a los productores ya que este es un recurso valioso para ellos [15]. Por ejemplo, en las etapas de despulpado y lavado, estas aguas residuales generan problemas de contaminación de alto impacto ambiental, debido a la carga de contaminantes orgánicos que son nocivos para los afluentes hídricos, la salud humana, la flora y fauna acuática [16,17].

Se puede señalar, que la etapa en la que se encuentra el cultivo de café afecta el consumo de agua, ya que el alto consumo de este recurso en la fase de Desarrollo inicial se debe a variaciones climáticas, la mayor exposición del suelo y pequeña área de la hoja, mientras que, desde la etapa de floración hasta el comienzo del relleno de grano, la cantidad de agua aumenta mayoritariamente desde el área de la hoja grande de las plantas [18,19].

Además, en Colombia los procesos que se llevan a cabo fuera de la granja contribuyen a casi el 80% de la disminución del recurso agua sin importar el Sistema de cultivo, teniendo en cuenta que actualmente en la mayoría de esos cultivos no hay tratamiento para reutilizar el agua [20]. Como consecuencia de lo anterior, algunas señales perturbadoras de estrés climático son atribuidas a la huella hídrica en la producción de café, ya que se estima que una singular taza de café requiere el uso de cerca de 140 litros de agua, siendo la mayor parte atribuida al cultivo de los árboles [21,22].

Cabe agregar, que cuando los residuos de café son vertidos a cuerpos hídricos se agota el oxígeno del agua, lo cual genera asfixia acuática; adicionalmente la descarga de nutrientes puede generar eutrofización, y el uso de las aguas residuales para riego puede afectar negativamente al crecimiento de las especies vegetales [23,17]. Por otro lado, teniendo en cuenta el sistema de cultivo, los árboles de café bajo sombra afectan el contenido de agua del suelo incrementando la transpiración en el nivel del sistema e incrementan la intercepción de precipitación, potencialmente reducen la disponibilidad de agua para el cultivo sotobosque [24,25,26].

Similarmente, en el departamento del Cauca los granos de café rojo son preparados usando el método húmedo, en donde la pulpa y el mucílago son removidos después de la fermentación y no se le da ningún tratamiento para el reciclaje del agua [27]. No obstante, en los últimos años se han venido generando investigaciones relacionadas con tecnologías para optimizar el consumo de agua y aprovechamiento de los subproductos, sin embargo, el beneficio húmedo convencional del café se continúa implementando, y las tecnologías que han aportado las investigaciones no se han utilizado debido a los costos que representan y a la falta de conciencia del caficultor [28].

A pesar de lo anterior, en la estación experimental Pueblo Bello no se le hace ningún tratamiento al agua que es utilizada para el proceso de producción del café, esta proviene del Rio Ariguani, específicamente de un arroyo que se desprende de este, el cual abastece un acueducto interno de 70.000 litros de agua. Teniendo en cuenta lo anterior, con este estudio se propone evaluar la huella hídrica del café, con el fin de tener un panorama ambiental claro del nivel de sostenibilidad del mismo, que permita identificar estrategias concretas para la optimización de la gestión del agua y que contribuya a mejorar la reputación social y ambiental de la empresa.

II. MARCO TEÓRICO

a. Huella híbrida

La huella hídrica de un producto es el volumen de agua dulce usado para producir el producto, medido sobre la cadena de suministro completa. Es un indicador multidimensional, que muestra los volúmenes de consumo de agua por fuente y volúmenes contaminados por tipo de polución, los cuales son especificados geográficamente y temporalmente [3]. Según Chapagain & Hoekstra [3] la huella hídrica de un producto es calculada como la ratio del volumen total de agua usada (m³/año) a la cantidad de la producción (Ton/año). La huella hídrica tiene tres componentes: la huella hídrica verde (evaporación y transpiración de agua suministrada de la lluvia en la producción del cultivo), la huella hídrica azul (evaporación del agua de irrigación suministrada de las fuentes de agua superficiales y subterráneas renovables) y la huella hídrica gris (volumen de agua dulce contaminada en el proceso de producción).

La evaluación de la huella hídrica consta de 4 etapas, la primera define los objetivos y alcance del estudio, mientras que la segunda etapa contabiliza la huella hídrica, la etapa 3 constituye el análisis de sostenibilidad, y si la huella hídrica no es sostenible, entonces la etapa 4 sirve para proponer medidas para lograr la sostenibilidad. El análisis de sostenibilidad es estructurado sobre las huellas hídricas de los diferentes procesos que generan la huella hídrica del estudio, si las huellas hídricas de todos los procesos que componen la huella hídrica estudiada son sostenibles, entonces este es sostenible también [29].

b. Huella hídrica azul

Se refiere al consumo de agua dulce, superficial o subterránea, en toda la cadena de producción de un producto. Consumo se refiere a la pérdida de agua en cuerpos de agua disponibles en la superficie o en acuíferos subterráneas en el área de la cuenca. Esta pérdida ocurre cuando el agua se evapora, no regresa a la misma cuenca, es dispuesta al mar o se incorpora a un producto [3].

c. Huella hídrica verde

Según Hoekstra et al [3], la huella hídrica verde es el volumen de agua lluvia consumida durante el proceso de producción. Esto es particularmente relevante para productos agrícolas y forestales, donde se refiere a la evapotranspiración de agua lluvia total (de los campos y plantaciones) más el agua incorporada en el cultivo cosechado o madera.

$$HH_{proc.verde} = \text{Evaporación de agua verde} + \text{Incorporación de agua verde} \left(\frac{Vol}{tiempo} \right) \quad (Ec. 1)$$

d. Huella hídrica gris

La huella hídrica gris de una etapa del proceso es un indicador del grado de contaminación de agua dulce que puede ser asociada con la etapa del proceso. Es definido como el volumen de agua dulce que es requerido para asimilar la carga de contaminantes basado en concentraciones naturales de fondo y estándares de calidad de agua del ambiente existente. La huella hídrica gris es calculada dividiendo la carga contaminante (C, en masa/tiempo) por la diferencia entre el estándar de calidad de agua del ambiente para ese contaminante (la concentración máxima aceptable c_{max} , en masa/volumen) y su concentración natural en el cuerpo de agua receptor (C_{nat} , en masa/volumen) [3]. Lo anterior se representa en la siguiente ecuación:

$$HH_{proc.gris} = \frac{L}{C_{max} - C_{nat}} \left(\frac{Vol}{tiempo} \right) \quad (Ec. 2)$$

e. Agua Virtual

El Contenido de Agua Virtual (CAV) es definido como la cantidad de agua requerida para la producción de bienes y servicios a través de las cadenas de suministro [30].

f. Evapotranspiración ET

“La evaporación y la transpiración ocurren simultáneamente y no hay una manera sencilla de distinguir entre estos dos procesos. Aparte de la disponibilidad de agua en los horizontes superficiales, la evaporación de un suelo cultivado es determinada principalmente por la fracción de radiación solar que llega a la superficie del suelo. Esta fracción disminuye a lo largo del ciclo del cultivo a medida que el dosel del cultivo proyecta más y más sombra sobre el suelo. En las primeras etapas del cultivo, el agua se pierde principalmente por evaporación directa del suelo, pero con el desarrollo del cultivo y finalmente cuando este cubre totalmente el suelo, la transpiración se convierte en el proceso principal” [31].

ETo es un parámetro que combina el agua perdida desde la superficie del suelo y la superficie de la planta simultáneamente, el cual es esencial en calcular el consumo de agua del cultivo y los requerimientos de agua de irrigación [9].

El método de Penman-Monteith está probado como uno de los métodos más confiables y exhaustivos para la estimación de la evapotranspiración y requerimientos de agua del cultivo, y es ampliamente utilizado [9], [32].

g. Variables climáticas

Los principales parámetros climáticos que afectan la evapotranspiración son la radiación, la temperatura del aire, la humedad atmosférica y la velocidad del viento. [31]

Otro variable climática importante es la precipitación, específicamente la precipitación efectiva, la cual se define como la parte de la lluvia caída en un sitio determinado que puede ser aprovechada directa o indirectamente por los cultivos establecidos en el área; estas dependen del estado de humedad del suelo (o del régimen de riego) y es un factor clave para planificar las prácticas de producción de cultivos [33], [34].

h. Cropwat

Para el cálculo de las variables climáticas, uno de los softwares más utilizados es el Cropwat, este es un modelo recomendado por la FAO para el manejo de irrigación, que integra las variables clima, cultivo y suelo para evaluar la Evapotranspiración de referencia (ET₀), Evapotranspiración del cultivo (ET_c) y requerimientos de agua de irrigación y más específicamente el diseño y manejo de planes de irrigación [35], [36].

Cropwat ayuda en el cálculo de los Requerimientos de Agua del Cultivo (RAC) y la distribución de agua óptima que resulta en el rendimiento más alto bajo condiciones de agua limitada, para un clima, cultivo y rendimiento dado. Además, muestra las consecuencias sobre el plan de irrigación en términos de eficiencia de aplicación de agua y respuesta de rendimiento esperado. El modelo Cropwat es una herramienta confiable para entender los Requerimientos de Agua del Cultivo, la planeación de irrigación y manejo de la irrigación [37], [38].

i. Sostenibilidad de la huella hídrica

El análisis de sostenibilidad de la huella hídrica consiste en evaluar que tan sostenible es la apropiación del recurso hídrico en ese proceso con la finalidad de conocer cuál es la mejor asignación posible del recurso para las personas, los ecosistemas y las actividades económicas. La sostenibilidad posee diferentes dimensiones (ecológica, social y económica), los impactos pueden ser formulados a diferentes niveles (primarios y secundarios), la HH tiene tres componentes (azul, verde y gris) por tanto la sostenibilidad de una HH puede abordarse desde un gran número de puntos de vista distintos [3], [39].

j. Sostenibilidad ambiental

Teniendo en cuenta lo planteado por Hoekstra et al [3] y Esparza [39], el análisis de la sostenibilidad ambiental se basa en dos criterios fundamentales:

1. Cumplimiento de los requerimientos de agua del medio ambiente: los flujos de aguas superficiales y subterráneas deberán permanecer dentro de ciertos rangos con respecto a la escorrentía natural. Estos rangos deben garantizar que haya agua suficiente para los ecosistemas y los medios de subsistencia humana de las personas viviendo en el sector y que dependen de estos ecosistemas.
2. No excedencia de la capacidad de asimilación de contaminantes: este criterio se refiere a que la calidad del agua debe permanecer dentro de ciertos límites, que generalmente están dados por las normas de calidad ambiental.

k. Sostenibilidad social

El Manual de Evaluación de la Huella Hídrica se explica que, cuando el agua no es usada de manera equitativa en un proceso, la huella hídrica es insostenible. Una determinada cantidad de agua dulce disponible debe ser asignada a satisfacer las necesidades básicas de los seres humanos, se debe garantizar un abastecimiento suficiente de agua para beber, lavar y cocinar; de igual manera debe haber una asignación suficiente de agua destinada a la producción de alimentos, esto implica que solo una parte del agua dulce que queda, tras atender las necesidades de los caudales ambientales y las necesidades humanas básicas, puede ser destinada a bienes o usos de no primera necesidad. [3], [39].

l. Sostenibilidad económica

El Manual de Evaluación de la Huella Hídrica indica que, cuando el agua no es usada de manera económicamente eficiente en un proceso, la huella hídrica es insostenible. Los beneficios de una huella hídrica resultante de la utilización del agua para un determinado propósito, debe ser superior a los costos totales asociados a dicha huella, caso contrario la huella será insostenible. Si la huella hídrica no cumple alguno de los criterios de sostenibilidad (ambiental, económica o social), no se puede considerar geográficamente sostenible [3].

m. Índice de Escasez Hídrica

Este corresponde a la relación porcentual entre la demanda potencial del agua del conjunto de actividades socioeconómicas y la oferta hídrica disponible en las fuentes abastecedoras [40] Este método calcula qué tan estresado está el recurso en determinada zona, tomando en cuenta la cantidad de agua superficial y subterránea que se utiliza para satisfacer las necesidades de la población [41]. La escasez se presenta cuando la demanda supera el abastecimiento de agua dulce en un área determinada [42], [41].

III. METODOLOGÍA O PROCEDIMIENTOS

a. Área de estudio

La zona de estudio es la Subestación Experimental Pueblo Bello, la cual pertenece a Cenicafé y está ubicada en el municipio de Pueblo Bello, Cesar en el ecotopo cafetero 402 y en el cual, por condiciones ambientales y de suelos similares están incluidos los municipios de Valledupar y El Copey, en el departamento del Cesar y Riohacha, Barrancas, Fonseca y San Juan del Cesar, en el departamento de La Guajira. En esta zona la distribución de la lluvia es unimodal con presencia del período de menor precipitación entre diciembre y marzo. El área en café es de 9.825 hectáreas, de las cuales entre el 65 y el 80% se encuentran establecidas en sistemas de producción bajo sombra [43].

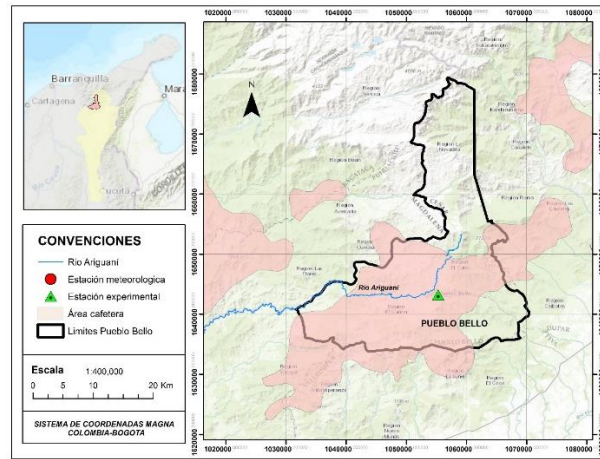


Figura 1: Localización de la estación experimental Pueblo Bello.
Fuente: Elaboración propia.

b. Recolección y análisis de datos

La huella hídrica del café se focalizó en los componentes azul y verde, así como también el agua virtual de los cultivos de café para los años 2017 y 2018. La información de rendimiento correspondió al promedio anual durante el ciclo de vida del cultivo para el café, es decir, el promedio de la producción del ciclo en la unidad de estudio.

La huella hídrica agrícola de la cuenca del río Ariguani correspondió a la sumatoria de la huella hídrica de cada subcuenca asociada al cultivo de café y esta fue calculada de acuerdo a la ecuación (3):

$$HH_{subcuenca} = \sum_{cultivos} RAC \times \sum_{cultivos} \text{área cultivada} \quad (Ec. 3)$$

Donde; Área cultivada hace referencia a las sumatorias de las áreas sembradas en los cultivos de café en la subcuenca y RAC corresponde a la sumatoria de los requerimientos de agua azul, verde y gris de los cultivos ubicados en la subcuenca.

El RAC se calculó mediante la ecuación (4):

$$RAC = Kc \times ET0 \quad (Ec. 4)$$

Donde; el Kc es el coeficiente de evapotranspiración del cultivo tomado de FAO [31], para el cultivo de café con suelo sin cobertura fue de 0,90-0,95 y 0,95. ET0 fue calculada mediante el modelo de Penman-Monteith. Para la diferenciación entre RAC azul y verde, se tomó la diferencia entre el RAC del cultivo y la precipitación efectiva (Ecuación 5).

$$RAC_{azul} = RAC - P_{efectiva} \quad (Ec. 5)$$

Donde la Pefectiva se relaciona con el agua que efectivamente llega al cultivo y en este caso se calculó a través del modelo USDA SCS (USDA Soil Conservation Service). Todos los cálculos se realizaron con el software CROPWAT 8.0 [44]

Luego, se calculó el Agua Virtual teniendo en cuenta la huella hídrica obtenida y la producción de café en la estación experimental, lo cual está consignado en la ecuación (6):

$$AV = \frac{\text{Huella Hídrica}}{\text{Producción de café}} \quad (Ec. 6)$$

c. Análisis de datos

Para el análisis de la sostenibilidad se tomó como referencia la metodología utilizada por Esparza [39] y Hoekstra et al [3], en donde se evaluó qué tan sostenible es el uso del recurso hídrico en los cultivos de café y cuál es su efecto en las personas, en los ecosistemas y en la actividad económica, debido a esto se evaluó la sostenibilidad ecológica, económica y social de la huella hídrica del café para los años 2017 y 2018.

Los criterios que se tuvieron en cuenta para realizar el análisis de la sostenibilidad fueron los siguientes:

1) Análisis de sostenibilidad ambiental

Para realizar este análisis se siguió los lineamientos de la metodología propuestos por Hoekstra et al. [33], donde se tuvo en cuenta la oferta y demanda del recurso hídrico. A partir de esto se calculó el índice de escasez hídrico para establecer la disponibilidad de agua en la zona de estudio (Ecuación 7).

$$IE_{anual} = \frac{\sum \text{huella hídrica anual}}{\text{Oferta ambiental y regulada}} \quad (Ec. 7)$$

Para el análisis de sostenibilidad ambiental de la huella hídrica se comparó la demanda y oferta del recurso, donde la demanda corresponde a la huella hídrica del cultivo de café y la oferta se asocia a la disponibilidad de agua en la unidad de estudio.

2) Análisis de sostenibilidad social

La sostenibilidad social se determinó en función de si la producción de café garantizaba un abastecimiento suficiente de agua para beber, lavar, cocinar y para la producción de alimentos en las áreas de influencia directa del proyecto en función de los datos obtenidos de HH Azul.

3) Análisis de sostenibilidad económica

La sostenibilidad económica se determinó a partir de los costos directos e indirectos del proceso de producción del café, del análisis físico-químico y tratamiento del agua.

IV. RESULTADOS, ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN

a. Estimación de la huella hídrica del café en 2017

Para el cálculo de la huella hídrica del café producido en la estación experimental de Cenicafé en Pueblo Bello, Cesar para el año 2017, los datos históricos de Temperatura y Precipitación fueron extraídos del Anuario Meteorológico Cafetero 2017 publicado por la Federación Nacional de Cafeteros FNC y Cenicafé [45], los cuales se presentan en las Tablas 1 y 2.

Tabla 1: Temperatura de la Estación Pueblo Bello en el año 2017.

| Mes | Temp. Min. Med. (°C) | Temp. Max. Med. (°C) | Temp. Media (°C) | Hum. Rel. (%) |
|------------|----------------------|----------------------|------------------|---------------|
| Enero | 13.6 | 26.5 | 20.0 | 76.3 |
| Febrero | 14.4 | 27.6 | 21.1 | 72.7 |
| Marzo | 15.7 | 26.8 | 20.9 | 77.9 |
| Abril | 16.8 | 27.6 | 21.9 | 80.7 |
| Mayo | 17.5 | 26.7 | 21.6 | 86.3 |
| Junio | 17.5 | 26.8 | 21.8 | 85.7 |
| Julio | 17.4 | 27.0 | 21.6 | 85.6 |
| Agosto | 17.6 | 26.8 | 21.7 | 86.4 |
| Septiembre | 17.2 | 27.0 | 21.3 | 86.5 |
| Octubre | 17.1 | 26.8 | 21.3 | 86.0 |
| Noviembre | 16.7 | 25.9 | 20.8 | 87.4 |
| Diciembre | 14.1 | 26.4 | 19.7 | 79.3 |
| Promedio | 16.3 | 26.8 | 21.1 | 82.6 |

Fuente: [45].

Tabla 2: Precipitación de la Estación Pueblo Bello en el año 2017.

| Mes | Precipitación total (mm) | Brillo sol (h) |
|------------|--------------------------|----------------|
| Enero | 2,6 | 8,2 |
| Febrero | 48,4 | 7,3 |
| Marzo | 108,1 | 5,4 |
| Abril | 163,0 | 6,2 |
| Mayo | 423,4 | 5,8 |
| Junio | 564,9 | 5,6 |
| Julio | 213,5 | 5,8 |
| Agosto | 191,4 | 6,1 |
| Septiembre | 253,2 | 4,7 |
| Octubre | 296,3 | 4,7 |
| Noviembre | 219,3 | 5,6 |
| Diciembre | 71,8 | 8,7 |
| Promedio | 212,9 | 6,2 |

Fuente: [45].

Los datos de velocidad del viento requeridos para el cálculo de ETO se tomaron de la página web del International Research Institute for Climate and Society IRI [46], los cuales se describen en la Tabla 3:

Tabla 3: Histórico de velocidad del viento por mes.

| Mes | Vel. del viento (Km/día) |
|------------|--------------------------|
| Enero | 172,8 |
| Febrero | 172,8 |
| Marzo | 172,8 |
| Abril | 172,8 |
| Mayo | 172,8 |
| Junio | 172,8 |
| Julio | 172,8 |
| Agosto | 172,8 |
| Septiembre | 172,8 |
| Octubre | 172,8 |
| Noviembre | 172,8 |
| Diciembre | 172,8 |

Fuente: [46].

A partir de los datos meteorológicos presentados en las Tablas 2 y 3, se procedió a calcular ETo en el Software Cropwat 8.0, obteniendo los resultados que se muestran en la Tabla 4.

Tabla 4: Cálculo de ETo para el año 2017.

| Mes | T. Min | T. Max | Hum. | Viento | Sol | Rad | ETo |
|-------------------|--------|--------|------|--------|-------|------------------------|--------|
| | °C | °C | % | km/day | Hours | MJ/m ² /day | mm/day |
| Enero | 13.6 | 26.5 | 76 | 172 | 8.2 | 19.4 | 3.74 |
| Febrero | 14.4 | 27.6 | 72 | 172 | 7.3 | 19.3 | 4.05 |
| Marzo | 15.7 | 26.8 | 77 | 172 | 5.4 | 17.5 | 3.72 |
| Abril | 16.8 | 27.6 | 80 | 172 | 6.2 | 19.1 | 3.96 |
| Mayo | 17.5 | 26.7 | 86 | 172 | 5.8 | 18.1 | 3.59 |
| Junio | 17.5 | 26.8 | 85 | 172 | 5.6 | 17.5 | 3.53 |
| Julio | 17.4 | 27.0 | 85 | 172 | 5.8 | 17.9 | 3.60 |
| Agosto | 17.6 | 26.8 | 86 | 172 | 6.1 | 18.7 | 3.68 |
| Septiembre | 17.2 | 27.0 | 86 | 172 | 4.7 | 16.4 | 3.36 |
| Octubre | 17.1 | 26.8 | 86 | 172 | 4.7 | 15.7 | 3.20 |
| Noviembre | 16.7 | 25.9 | 87 | 172 | 5.6 | 15.9 | 3.07 |
| Diciembre | 14.1 | 26.4 | 79 | 172 | 8.7 | 19.5 | 3.67 |
| Promedio | 16.3 | 26.8 | 82 | 172 | 6.2 | 17.9 | 3.60 |

Fuente: Elaboración propia.

Con base en la información presentada en la Tabla 4 se calculó la huella hídrica de la subcuenca del Río Ariguánf utilizando la ecuación (3):

Para obtener la ecuación (3) fue necesario calcular primero el RAC, el cual se obtuvo de la ecuación (4):

$$RAC = Kc \times ETo \text{ (Ec. 4)}$$

$$RAC = 0,90 \times 3,60$$

$$RAC = 3,24$$

Con este valor de RAC se calcula la huella hídrica verde utilizando la ecuación (3), teniendo en cuenta que el área cultivada de café es de 26 Has, la ecuación queda de la siguiente manera:

$$HH_{subcuenca} = 3,24 \times 26$$

$$HH_{subcuenca} = 84,24m^3/año$$

En la Tabla 5 se presenta los resultados de la huella hídrica por mes en el año 2017.

Tabla 5: Huella hídrica por mes en 2017.

| Mes | KC | ET0 | RAC | Huella Hídrica (m3) |
|------------|-----|------|-----|---------------------|
| Enero | 0,9 | 3,74 | 3,4 | 87,52 |
| Febrero | 0,9 | 4,05 | 3,6 | 94,77 |
| Marzo | 0,9 | 3,72 | 3,3 | 87,05 |
| Abril | 0,9 | 3,96 | 3,6 | 92,66 |
| Mayo | 0,9 | 3,59 | 3,2 | 84,01 |
| Junio | 0,9 | 3,53 | 3,2 | 82,60 |
| Julio | 0,9 | 3,6 | 3,2 | 84,24 |
| Agosto | 0,9 | 3,68 | 3,3 | 86,11 |
| Septiembre | 0,9 | 3,36 | 3,0 | 78,62 |
| Octubre | 0,9 | 3,2 | 2,9 | 74,88 |
| Noviembre | 0,9 | 3,07 | 2,8 | 71,84 |
| Diciembre | 0,9 | 3,67 | 3,3 | 85,88 |
| Promedio | 0,9 | 3,6 | 3,2 | 84,24 |

Fuente: Elaboración propia.

En la Figura 2 se presenta la variación en los resultados obtenidos de la huella hídrica por mes en el 2017.

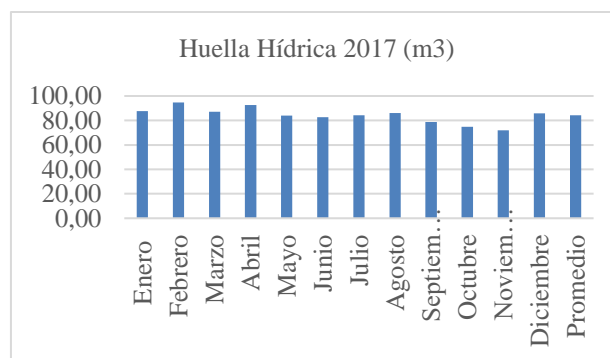


Figura 2: Variación de la Huella hídrica por mes en 2017.

Fuente: Elaboración propia.

La Figura 2 muestra que los meses del 2017 en los que más huella hídrica se generó fueron los meses comprendidos entre diciembre y abril, los cuales se consideran como los meses más secos del año, mientras que en los que menos huella hídrica se generó fueron los meses de septiembre a noviembre, que son los que se consideran como húmedos.

Para calcular la huella hídrica azul se ingresaron al software Cropwat 8.0 los datos de precipitación mensual, con el fin de obtener Pefectiva, obteniendo los resultados mostrados en la Tabla 5. Con base a esta información se utilizó la ecuación (5):

$$RAC\ azul = RAC - Pefectiva \text{ (Ec.5)}$$

$$RAC\ azul = 3,24 - 1390,2$$

$$RAC\ azul = -1386,96$$

Debido a que el resultado fue negativo se concluye que no se requiere de agua azul o de riego, es decir, solo se abastece agua verde.

b. Estimación de la huella hídrica del café en 2018

Para el cálculo de la huella hídrica del café producido en la estación experimental de Cenicafé en Pueblo Bello, Cesar para el año 2018, los datos históricos de Temperatura y Precipitación fueron extraídos del Anuario Meteorológico Cafetero 2018 publicado por la Federación Nacional de Cafeteros y Cenicafé [47], los cuales se presentan en las Tablas 6 y 7.

Tabla 6: Temperatura Estación Pueblo Bello en el 2018.

| Mes | Temp. Mín. Med. (°C) | Temp. Max. Med. (°C) | Temp. Media (°C) | Hum. Rel. (%) |
|------------|----------------------|----------------------|------------------|---------------|
| Enero | 14,8 | 26,1 | 20 | 80,8 |
| Febrero | 12,6 | 27,5 | 19,7 | 67,7 |
| Marzo | 15,2 | 28,4 | 21,4 | 71,4 |
| Abril | 16,7 | 26,7 | 21 | 81,8 |
| Mayo | 17,2 | 26,4 | 21,3 | 86,5 |
| Junio | 17,1 | 27,2 | 21,8 | 83,7 |
| Julio | 16,5 | 27,7 | 21,9 | 78,5 |
| Agosto | 16,3 | 27,9 | 21,5 | 79 |
| Septiembre | 16,8 | 27 | 21,3 | 83,6 |
| Octubre | 17 | 25,8 | 20,8 | 88,2 |
| Noviembre | 16 | 26,2 | 20,8 | 86,4 |
| Diciembre | 12,5 | 27,3 | 19,4 | 75,8 |
| Promedio | 15,73 | 24,74 | 20,91 | 80,28 |

Fuente: [47].

Tabla 7: Precipitación de la Estación Pueblo Bello en el año 2018.

| Mes | Precipitación total (mm) | Brillo sol (h) |
|------------|--------------------------|----------------|
| Enero | 180,6 | 7,3 |
| Febrero | 11,8 | 8 |
| Marzo | 70,7 | 7,4 |
| Abril | 123,2 | 4,5 |
| Mayo | 302,2 | 4,6 |
| Junio | 182,6 | 5,5 |
| Julio | 70,4 | 6,7 |
| Agosto | 123,5 | 6,1 |
| Septiembre | 257,2 | 5 |
| Octubre | 217,4 | 4,7 |
| Noviembre | 185,6 | 6,7 |
| Diciembre | 0 | 9,2 |
| Promedio | 143,77 | 6,3 |

Fuente: [47].

A partir de los datos meteorológicos presentados en las tablas 6 y 7, se procedió a calcular ETo en el Software Cropwat 8.0, obteniendo los resultados que se muestran en la tabla 8.

Tabla 8: Cálculo de ETo para el 2018.

| Mes | T. Min | T. Max | Humedad | Viento | Sol | Rad | ETo |
|------------|--------|--------|---------|--------|-------|------------------------|--------|
| | °C | °C | % | km/day | Hours | MJ/m ² /day | mm/day |
| Enero | 14.8 | 26.1 | 80 | 172 | 7.3 | 18.1 | 3.48 |
| Febrero | 12.6 | 27.5 | 67 | 172 | 8.0 | 20.4 | 4.27 |
| Marzo | 15.2 | 28.4 | 71 | 172 | 7.4 | 20.6 | 4.41 |
| Abril | 16.7 | 26.7 | 81 | 172 | 4.5 | 16.4 | 3.51 |
| Mayo | 17.2 | 26.4 | 86 | 172 | 4.6 | 16.3 | 3.31 |
| Junio | 17.1 | 27.2 | 83 | 172 | 5.5 | 17.4 | 3.59 |
| Julio | 16.5 | 27.7 | 78 | 172 | 6.7 | 19.2 | 4.03 |
| Agosto | 16.3 | 27.9 | 79 | 172 | 6.1 | 18.7 | 3.96 |
| Septiembre | 16.8 | 27.0 | 83 | 172 | 5.0 | 16.9 | 3.52 |
| Octubre | 17.0 | 25.8 | 88 | 172 | 4.7 | 15.7 | 3.07 |
| Noviembre | 16.0 | 26.2 | 86 | 172 | 6.7 | 17.5 | 3.30 |
| Diciembre | 12.5 | 27.3 | 75 | 172 | 9.2 | 20.2 | 3.91 |
| Promedio | 15.7 | 27.0 | 80 | 172 | 6.3 | 18.1 | 3.70 |

Fuente: Elaboración propia.

Con base en la información presentada en la Tabla 8, se calculó la huella hídrica de la subcuenca del Río Ariguani para el año 2018 utilizando la ecuación (3).

Para obtener la ecuación (3) fue necesario calcular primero RAC, el cual se obtuvo de la ecuación (4):

$$RAC = Kc \times ETo \text{ (Ec. 3)}$$

$$RAC = 0,90 \times 3,70$$

$$RAC = 3,33$$

Con este valor de RAC se calcula la huella hídrica verde utilizando la ecuación (3), teniendo en cuenta que el área cultivada de café es de 26 Has, la ecuación queda de la siguiente manera:

$$HH_{\text{subcuenca}} = 3,33 \times 26$$

$$HH_{\text{subcuenca}} = 86,58 \text{ m}^3/\text{año}$$

En la Tabla 9 se presenta los resultados de la huella hídrica por mes en el año 2018.

Tabla 9: Huella hídrica por mes en 2018.

| Mes | KC | ET0 | RAC | Huella Hídrica (m3) |
|------------|----|-----|-----|---------------------|
| Enero | 1 | 3,5 | 3,1 | 81,43 |
| Febrero | 1 | 4,3 | 3,8 | 99,92 |
| Marzo | 1 | 4,4 | 4,0 | 103,19 |
| Abril | 1 | 3,5 | 3,2 | 82,13 |
| Mayo | 1 | 3,3 | 3,0 | 77,45 |
| Junio | 1 | 3,6 | 3,2 | 84,01 |
| Julio | 1 | 4 | 3,6 | 94,30 |
| Agosto | 1 | 4 | 3,6 | 92,66 |
| Septiembre | 1 | 3,5 | 3,2 | 82,37 |
| Octubre | 1 | 3,1 | 2,8 | 71,84 |
| Noviembre | 1 | 3,3 | 3,0 | 77,22 |
| Diciembre | 1 | 3,9 | 3,5 | 91,49 |
| Promedio | 1 | 3,7 | 3,3 | 86,58 |

Fuente: Elaboración propia.

En la Figura 3 se presenta la variación en los resultados obtenidos de la huella hídrica por mes en el 2018.

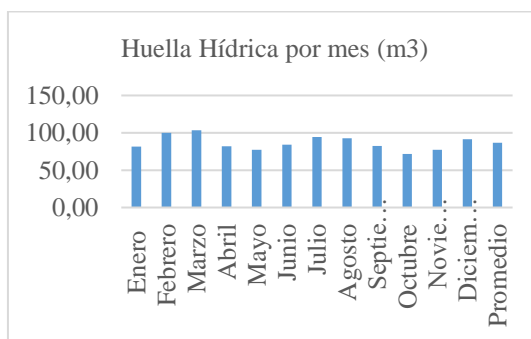


Figura 3: Variación de la Huella hídrica por mes en 2018.

Fuente: Elaboración propia.

La Figura 3 muestra que los meses del 2018 en los que más huella hídrica se generó fueron los meses febrero y marzo, los cuales se consideran como los meses más secos del año, mientras que en los que menos huella hídrica se generó fueron los meses de octubre y noviembre, que son los que se consideran como húmedos.

Para calcular la huella hídrica azul se ingresaron al software Cropwat 8.0 los datos de precipitación mensual, con el fin de obtener Pefectiva, obteniendo los resultados mostrados en la Tabla 10.

Tabla 10: Cálculo de precipitación efectiva 2018.

| Mes | Prec | Prec Eff |
|------------|--------|----------|
| | Mm | Mm |
| Enero | 180.6 | 128.4 |
| Febrero | 11.8 | 11.6 |
| Marzo | 70.7 | 62.7 |
| Abril | 123.2 | 98.9 |
| Mayo | 302.2 | 155.2 |
| Junio | 182.6 | 129.3 |
| Julio | 70.4 | 62.5 |
| Agosto | 123.5 | 99.1 |
| Septiembre | 257.2 | 150.7 |
| Octubre | 217.4 | 141.8 |
| Noviembre | 185.6 | 130.5 |
| Diciembre | 0.0 | 0.0 |
| Promedio | 1725.2 | 1170.6 |

Fuente: Elaboración propia.

Con base a la información anterior se utilizó la ecuación (5).

$$RAC\ azul = RAC - Pefectiva$$

$$RAC\ azul = 3,33 - 1390,2$$

$$RAC\ azul = -1386,9$$

Debido a que el resultado fue negativo se concluye que no se requiere de agua azul o de riego, es decir, solo se abastece agua verde.

En la Tabla 11 se presenta la comparación entre los resultados obtenidos de huella hídrica en los años 2017 y 2018.

Tabla 11: Cuadro comparativo huella hídrica del café en el periodo 2017-2018.

| Huella hídrica del café | |
|---------------------------|--------------------------|
| Huella hídrica en 2017 | Huella hídrica en 2018 |
| 84,24 m ³ /año | 86,58m ³ /año |

Fuente: Elaboración propia.

En la Figura 4 se presenta el comparativo entre las huellas hídricas obtenidas en los años 2017 y 2018.

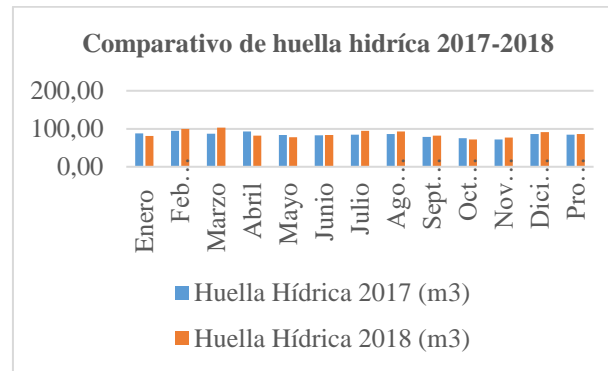


Figura 4: Comparativo de huella hídrica por mes en los años 2017 y 2018.

Fuente: Elaboración propia.

La Figura 4 muestra que el comportamiento de la huella hídrica entre los años 2017 y 2018 es muy similar, en donde los meses que más huella hídrica generó coinciden con los más secos, tales como los correspondientes al periodo diciembre-marzo, mientras que los meses que menos huella hídrica obtuvo fueron los meses de octubre y noviembre, que corresponden a los meses más húmedos.

Teniendo en cuenta los resultados obtenidos de la huella hídrica para los años 2017 y 2018, se calculó el Agua Virtual a través de la ecuación (6):

$$AV = \frac{Huella\ Hídrica}{Producción\ de\ café} \quad (Ec. 6)$$

Para el cálculo de la producción de café se tiene en cuenta la planteado por Farfán y Sánchez [48], en donde se menciona que, para un cultivo de café bajo el sistema de producción agroforestal en la Estación Experimental Pueblo Bello, la productividad es de 8.947 Kg/Ha.

Teniendo en cuenta que el área de la estación experimental es 26 Hectáreas la producción de café quedaría de la siguiente manera:

$$Producción\ de\ café = 8.947Kg/Ha \times 26Ha$$

$$Producción\ de\ café = 232.622\ Kg$$

Se convierte la huella hídrica en litros, obteniendo los siguientes resultados:

$$Huella\ hídrica\ 2017 = 84,24m^3 \times (1.000l/1m^3) = 84.240\ l$$

$$Huella\ hídrica\ 2018 = 86,58m^3 \times \left(\frac{1.000l}{1m^3}\right) = 86.580\ l$$

Agua Virtual 2017

$$V = \left(\frac{84.240\ l}{232.622Kg}\right) = 0,36l/Kg\ año$$

Agua Virtual 2018

$$V = \left(\frac{86.580\ l}{232.622Kg}\right) = 0,37l/Kg\ año$$

Los resultados obtenidos de Agua Virtual para los años 2017 y 2018, indican que se necesitaron 0,36 litros de agua para producir 1 Kg de café en el año 2017; y 0,37 litros de agua para producir 1 kg de café en el año 2018.

c. Análisis de sostenibilidad de la huella hídrica

El análisis de sostenibilidad hídrica para la producción de café se realizó teniendo en cuenta los resultados obtenidos de la huella hídrica verde y comparándolo con la oferta hídrica del río Ariguani, luego se analizaron los resultados desde el punto de vista ambiental, económico y social.

d. Análisis de sostenibilidad ambiental

Para el análisis de la sostenibilidad del consumo de agua en la estación experimental de Pueblo Bello se utilizó la ecuación (7), en la cual se utilizó la huella hídrica obtenida para los años 2017 y 2018, y se calculó la oferta hídrica a partir de los datos de caudales generados por el río Ariguani

$$IE_{\text{anual}} = \frac{\Sigma \text{huella hídrica anual}}{\text{oferta ambiental y regulada}} \text{ (Ec. 7)}$$

La oferta hídrica disponible del río Ariguani es 770.000.000 m³ año promedio para una superficie total de 533.300 Ha [49]. Teniendo en cuenta que la superficie de la estación experimental Pueblo Bello es de 26 hectáreas, la oferta hídrica disponible para la subcuenca quedaría de la siguiente manera:

$$\text{Oferta hídrica disponible subcuenca} = \left(\frac{776.000.000 \text{ m}^3 \times 26 \text{ Ha}}{533.300 \text{ Ha}} \right) = 37.832,36 \text{ m}^3$$

Los datos anteriores se reemplazan en la ecuación (4), teniendo lo siguiente:

$$IE_{\text{anual}} 2017 = \frac{84,24 \text{ m}^3}{37.832,36 \text{ m}^3} \times 100 = 0,22\%$$

$$IE_{\text{anual}} 2018 = \frac{86,58 \text{ m}^3}{37.832,36 \text{ m}^3} \times 100 = 0,23\%$$

Tomando como referencia lo establecido por el IDEAM [50], el índice de escasez hídrica de la subcuenca del río Ariguani para los años 2017 y 2018 es bajo, debido a que los resultados mostraron porcentajes menores al 10%, lo que indica que no se experimentan presiones importantes sobre el recurso hídrico.

El resultado anterior, es coherente debido a que en la Estación Pueblo Bello se utiliza para el despulpado del café la tecnología Becolsub, la cual no requiere de agua para este proceso, y el resultado del agua virtual muestra que la cantidad de agua utilizada para producir 1 Kg de café en los años 2017 y 2018 no supera los 0,4 litros.

Desde el punto de vista ambiental, la huella hídrica del café producido en la estación experimental Pueblo Bello es sostenible, debido a que la huella hídrica generada es inferior a la oferta hídrica disponible, además de que no se genera huella hídrica azul ni huella hídrica gris, lo que indica que esta actividad económica no representa peligro para los ecosistemas acuáticos ni para el consumo humano.

e. Análisis de sostenibilidad social

Para el análisis de la sostenibilidad social de la huella hídrica del proceso, se tuvo en cuenta los resultados obtenidos de huella hídrica, comparada con el índice de Escasez Hídrica obtenido en el 2017 y 2018, lo cual se presenta en la Tabla 12.

Tabla 12: índice de Escasez Hídrica del río Ariguani en el periodo 2017-2018 por mes.

| Mes | HH 2017 (m ³) | HH 2018 (m ³) | Oferta hídrica (m ³) | IE 2017 (%) | IE 2018 (%) |
|------------|---------------------------|---------------------------|----------------------------------|-------------|-------------|
| Enero | 87,52 | 81,43 | 37832,36 | 0,23 | 0,22 |
| Febrero | 94,77 | 99,92 | 37832,36 | 0,25 | 0,26 |
| Marzo | 87,05 | 103,19 | 37832,36 | 0,23 | 0,27 |
| Abril | 92,66 | 82,13 | 37832,36 | 0,24 | 0,22 |
| Mayo | 84,01 | 77,45 | 37832,36 | 0,22 | 0,20 |
| Junio | 82,60 | 84,01 | 37832,36 | 0,22 | 0,22 |
| Julio | 84,24 | 94,30 | 37832,36 | 0,22 | 0,25 |
| Agosto | 86,11 | 92,66 | 37832,36 | 0,23 | 0,24 |
| Septiembre | 78,62 | 82,37 | 37832,36 | 0,21 | 0,22 |
| Octubre | 74,88 | 71,84 | 37832,36 | 0,20 | 0,19 |
| Noviembre | 71,84 | 77,22 | 37832,36 | 0,19 | 0,20 |
| Diciembre | 85,88 | 91,49 | 37832,36 | 0,23 | 0,24 |
| Promedio | 84,24 | 86,58 | 37832,36 | 0,22 | 0,23 |

Fuente: Elaboración propia.

En la figura 5 se presenta la variación del Índice de Escasez Hídrica por mes durante los años 2017 y 2018.

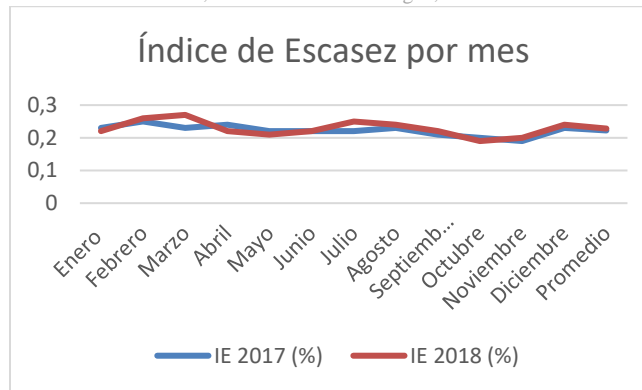


Figura 5: Comparativo Índice de Escasez hídrica por mes en los años 2017 y 2018.
Fuente: Elaboración propia.

En la figura 5 se evidencia un comportamiento similar en el índice de Escasez Hídrica a lo largo de los años 2017 y 2018, en donde el porcentaje no supera el 1 %, lo que indica que no se afecta la calidad y cantidad del recurso hídrico.

La comparación de los resultados de la huella hídrica y el Índice de Escasez Hídrica muestran que el proceso de producción del café no genera presiones significativas sobre la subcuenca del río Ariguaní, lo cual quiere decir que se asegura que las personas que están en el área de influencia tengan agua dulce disponible para satisfacer sus necesidades, demostrando que esta actividad económica es sostenible socialmente.

f. Análisis de sostenibilidad económico

Costo de inversión en el proceso de producción de café

Para el análisis de la sostenibilidad económica de la huella hídrica se tiene en cuenta el costo de inversión en el proceso de producción de café solamente, ya que en la estación experimental Pueblo Bello no se le hace ningún tratamiento al agua, en la Tabla 13 se detallan los valores de los costos totales por actividad.

Tabla 13: Costo total de Producción por actividad-Cuadernos de Cuenta Colombia.

| Actividad | Valor Total Promedio (COP) |
|---------------------------|----------------------------|
| Mano de obra | 1.910.138 |
| Insumos | 959.008 |
| Equipos | 497.489 |
| Transporte | 151.693 |
| Otros | 283.727 |
| Costo total producción/Ha | 3.802.055 |

Fuente: [51].

Teniendo en cuenta que la estación experimental Pueblo Bello tiene 26 Has, el costo total de la producción de café sería el siguiente:

$$\text{Costo total de producción} = 3.802.055 \times 26 = 98.853.430 \text{ COP}$$

$$\text{Costo total de producción/Kg} = \frac{98.853.430}{232.622} = 424.953 \text{ COP/Kg}$$

En la Tabla 14 se presenta la relación entre el Agua Virtual y el costo de producción por Kg.

Tabla 14: Agua virtual vs costo de producción/Kg.

| Agua Virtual 2017 | Agua Virtual 2018 | Costo producción/Kg |
|-------------------|-------------------|---------------------|
| 0,36 l/Kg | 0,37 l/Kg | 424.953 COP |

Fuente: Elaboración propia.

El proceso de beneficio del café utilizado con la metodología Becolsub permite un ahorro del agua utilizada para la producción de café, debido a que los resultados demuestran que se requiere menos de 1 litro para producir 1 Kg de café; además, el hecho de no realizar ningún tratamiento al agua evidencia la sostenibilidad económica de la huella hídrica del café, indicando que es económicamente eficiente.

Los resultados de esta investigación indican que el proceso de producción del café en la estación experimental Pueblo Bello es el adecuado para garantizar la sostenibilidad hídrica, ya que el beneficio ecológico que se le hace al café por medio de la tecnología Becolsub contribuye a que no se requiera de grandes cantidades de agua para obtener un producto adecuado para comercializar, ya que para producir 1 Kg de café se requiere aproximadamente 0,3 litros de agua, a diferencia de los resultados obtenidos por Ariza y Arévalo [52], microcuencas con producción cafetera en el departamento del Huila y encontraron que en promedio para producir 1 kg de café pergamino seco se requiere 6.328 litros de agua, considerando 3 sistemas diferentes de beneficio del café.

La huella hídrica del café para el 2017 fue de 84, 24 m³/año y para el 2018 fue de 86,58 m³/año, lo cual al compararse con los resultados obtenidos por Tovar-Hernández et al [53], quienes estimaron la huella hídrica para los cultivos de arroz y palma de aceite, encontrando que la huella hídrica verde para el cultivo de palma de aceite fue 9.030 m³/ha/año y para el arroz fue 2.670 m³/ha/año, lo cual indica que el consumo de agua para la producción de café bajo las condiciones en las que se desarrolla en la estación Pueblo Bello consume mucha menor cantidad de agua que la que se consume en los cultivos de palma de aceite y arroz; esto es contrario con lo planteado por el IDEAM [49] en el Estudio

Nacional de Agua, donde menciona que dentro de la huella hídrica agrícola, la huella hídrica verde de la palma de aceite corresponde al 14,8 %, mientras que la huella hídrica verde del café corresponde al 25,5 %, esto demuestra que las tecnologías implementadas para la optimización del consumo de agua son efectivas.

En cuanto a los resultados de huella hídrica, se evidenció que la huella hídrica que se genera es la verde, lo cual indica que el agua que es requerida para la producción del café es la que resulta del proceso de evapotranspiración de las plantas, esto se compara con el estudio realizado en El Salvador por Avilés y Mineros [54], quienes demostraron que la mayor huella hídrica que se genera para la producción de café es la huella hídrica verde, y en menor proporción la huella hídrica azul y la huella hídrica gris con valores muy bajos.

Además, con este estudio se evidenció que la estación experimental Pueblo Bello no genera presiones importantes sobre el río Ariguani, ya que el índice de escasez hídrica para los años 2017 y 2018 no superó el 1%, lo cual es similar a lo obtenido por Lala-Ayo [55], quien realizó un estudio en el que calculó el índice de Escasez verde de la microcuenca del río Pita en Ecuador, obteniendo un resultado entre 0.5 y 0.6, con una variabilidad íntima entre cada mes, todo esto debido a la pugna de agua en el sector de estudio que se vuelve variable, pues la necesidad de alimentos agrícolas y cárnicos es directamente proporcional al crecimiento de la población, la cual debe satisfacer sus necesidades básicas, por lo que en estos sectores se incrementarán los requerimientos.

Con relación a la utilización del software Cropwat 8,0, se destaca que este fue útil para el cálculo de la huella hídrica mensual y anual, ya que los datos requeridos para el cálculo de la Evapotranspiración estaban dados, lo que permitió tener un resultado preciso del consumo de agua en la producción de café, esto va en relación a lo planteado por Suryadi et al [56], quienes utilizaron este mismo software para analizar los requerimientos de agua del cultivo de maíz y plantearon que a través de este se puede conocer la posibilidad de disminuir los resultados que ocurrirán a partir de los datos de requerimiento de agua del cultivo y la provisión de irrigación.

V. CONCLUSIONES

Con base en los resultados obtenidos en este estudio, se concluye que la huella hídrica que generó la producción de café en la estación experimental de Cenicafé en Pueblo Bello, Cesar para los años 2017 y 2018 fue baja, ya que para producir 1 Kg de café se requirió aproximadamente 0,3 litros de agua, y esto se debió principalmente al uso de tecnologías amigables con el medio ambiente, tales como la tecnología Becolsub, la cual realiza el despulpado de café sin agua.

Finalmente, se resalta que el cultivo de café tuvo un comportamiento similar para los años 2017 y 2018, ya que las condiciones climáticas encontradas revelaron que hay una temporada seca a comienzos de año en los meses de enero a abril y una temporada húmeda en los meses de septiembre a noviembre, lo cual determina el periodo de cosecha y brinda la posibilidad de que se realice un mejor aprovechamiento de la humedad del suelo, contribuyendo a que la huella hídrica se mantenga baja.

En cuanto a recomendaciones, en primer lugar se recomienda realizar un estudio en el cual se pueda comparar la huella hídrica del proceso de producción del café que utiliza el beneficio ecológico y otro que utiliza el beneficio convencional, sin ningún tipo de tecnología.

Además, es necesario realizar estudios en el que se pueda calcular la humedad del suelo y compararla con la huella hídrica en un periodo de tiempo determinado, para determinar la relación que se puede presentar entre estos 2 elementos.

Finalmente, evaluar la huella hídrica de otros sectores económicos importantes en el departamento del Cesar, tales como la minería y la ganadería.

VI. REFERENCIAS

- [1] WWAP (United Nations World Water Assessment Programme)/UN-Water (2018). The United Nations world water development report 2018: nature-based solutions for water. <http://www.unwater.org/publications/world-water-development-report2018/>
- [2] He, L., Bao, J., Daccache, A., Wang, S. and Guo, P. (2020). Optimize the spatial distribution of crop water consumption based on a cellular automata model: A case study of the middle Heihe River basin, China. *Science of The Total Environment* Vol. 720 137569.
- [3] Hoekstra, Chapagain, Aldaya y Mekonnen (2011). *The Water Footprint Assessment Manual. Setting the Global Standard*. Earthscan and Water Footprint Network.
- [4] Feng, B., Zhuo, L., Xie, D., Mao, Y., Gao, J., Xie, P. and Wu, P. (2021). A quantitative review of water footprint accounting and simulation for crop production based on publications during 2002–2018. *Ecological Indicators* 120 106962.
- [5] Hoekstra, A. (2017). Water footprint assessment: evolution of a new research field. *Water Resour. Manage.* 31 (10), 3061–3081.
- [6] Arodudu, O., Helming, K., Wiggering, H., Voinov, A. (2017). Towards a more holistic sustainability assessment framework for agro-bioenergy systems - A review. *Environ. Impact Assess. Rev.* 62, 61–75.
- [7] Allard W, Hendrik B, Davide F, Sander J, Rob K, Iwan S, et al (2019). 25 Years of the WOFOST cropping systems model. *Agric Syst*;168:154–67.
- [8] Halimi A. and Ashebir HT (2019). Application of CROPWAT model for estimation of irrigation scheduling of Tomato in changing climate of Eastern Europe: the case study of Godollo, Hungary. *Int J Agric Environ Sci*;6:1–11.
- [9] Elsayed, M. and Mostafa, E. (2020). Assessment of irrigation management practices using FAO-CROPWAT 8, case studies: Tina Plain and East South El-Kantara, Sinai, Egypt. *Ain Shams Engineering Journal*.
- [10] Van der Laan, M., Jarmain, C., Bastidas-Obando, E., Annandale, J., Fessehazion, M. and Haarhoff, D. (2019). Are water footprints accurate enough to be useful? A case study for maize (*Zea mays* L.). *Agricultural Water Management* Volume 213, Pages 512-520.
- [11] Hoekstra, A.Y., Mekonnen, M. (2012). The water footprint of humanity. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA* 109, 3232–3237.
- [12] Mekonnen, M. and Hoekstra, A. (2020). Sustainability of the blue water footprint of crops. *Advances in water resources* Vol. 143 103679.

- [13] Botero y Betancur (2012). Buenas prácticas agrícolas en el beneficio del café en Colombia. Trabajo de grado presentado como requisito parcial para optar por el título de Agrónomo, Universidad Nacional Abierta y a Distancia, Escuela de Ciencias Agrícolas, Pecuarias y del Medio Ambiente, Medellín.
- [14] Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales IDEAM y Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible MADS (2015). Evaluación Multisectorial de la huella hídrica en Colombia. Resultados por subzonas hidrográficas en el marco del Estudio Nacional del Agua 2014. Medellín, Colombia.
- [15] Osorio, N y Pombo, O (2019). La evolución tecnológica y la percepción de la calidad ambiental de los caficultores de El Águila, Valle del Cauca, Colombia. *Frontera Norte* Vol. 31 Art. 4.
- [16] Tharian, J; Padmapriya, R and Thirunalasundari, T (2013). Coffee waste management-An overview. *Int. J. Curr. Sci.*9:83-91.
- [17] Torres-Valenzuela, L., Sanín-Villarrea, A., Arango-Ramírez, A. y Serna-Jiménez, J. (2019). Caracterización fisicoquímica y microbiológica de aguas mieles del beneficio del café. *Revista Ion* 32(2):59-66.
- [18] Lena, B., Flumignan, D. y Faria, R. (2011). Evapotranspiração e coeficiente de cultivo de cafeeiros adultos. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, Brasília, v. 46, n. 8, p. 905-911.
- [19] Dardengo, M., Pereira, L., De Sousa and Dos Reis, F. (2018). Yield, quality and water consumption of conilon coffee under irrigated and dryland managements. *Coffee Science* Vol. 13 No. 3.
- [20] Acosta-Alba, I., Boissy, J., Chia, E. and Andrieu, N. (2020). Integrating diversity of smallholder coffee cropping systems in environmental análisis. *International Journal of Life Cycle Assessment* Vol. 25 No. 2.
- [21] Chapagain & Hoekstra (2007). The water footprint of coffee and tea consumption in the Netherlands. *Ecological Economics* 64 109–118.
- [22] Martins, L., Eugenio, F., Rodrigues, W., Tomaz, M., Dos Santos, A. and Ramalho, J. (2018). Carbon and water footprints in Brazilian coffee plantations - the spatial and temporal distribution. *Emirates Journal of Food and Agriculture* Vol. 30 No. 6.
- [23] Rattan S, Parande AK, Nagaraju VD and Ghiwari GK. A. (2015). Comprehensive review on utilization of wastewater from coffee processing. *Environ Sci Pollut Res.*22(9):6461-72.
- [24] Cannavo, P., Sansoulet, J., Harmand, J.M., Siles, P., Dreyer, E. and Vaast, P., (2011). Agroforestry associating coffee and Inga densiflora results in complementarity for Water uptake and decreases deep drainage in Costa Rica. *Agric. Ecosyst. Environ.* 140(1–2), 1–13.
- [25] Padovan, M.P., Cortez, V.J., Navarrete, L.F., Navarrete, E.D., Deffner, A.C., Centeno, L.G., Munguía, R., Barrios, M., Vilchez-Mendoza, J.S., Vega-Jarquín, C., Costa, A.N., Brook, R.M. and Rapidel, B. (2015). Root distribution and Water use in coffee shaded with *Tabebuia Rosea Bertol.* and *Simarouba Glauca DC.* Compared to full sun coffee in suboptimal environmental conditions. *Agrofor. Syst.* 89 (5), 857–868.
- [26] Sarmiento-Soler, A; Vaast, P; Hoffman, M; Rotter, R; Jassogne, L; Van Asten, P and Graefe, S (2019). Water use of *Coffea arabica* in open versus shaded systems under smallholder's farm conditions in Eastern Uganda. *Agricultural and Forest Meteorology* Volumes 266–267.
- [27] Acosta-Alba, I., Boissy, J., Chia, E. y Andrieu, N. (2020). Integrating diversity of smallholder coffee cropping systems in environmental análisis. *International Journal of Life Cycle Assessment* Vol. 25 No. 2
- [28] Boyacá, L. (2018). Estudio exploratorio de la obtención de café verde mediante beneficio MHoney y la determinación de su calidad en taza. Tesis presentada como requisito parcial para optar al título de: Magister en Ciencia y Tecnología de Alimentos. Universidad Nacional de Colombia, Facultad de Ciencias Agrarias, Dirección de Posgrados, Bogotá D.C, Colombia.
- [29] Pellicer, F & Martínez, J (2016). The Water Footprint as an indicator of environmental sustainability in water use at the river basin level. *Science of the Total Environment* Vol. 571 15, p. 561-574.
- [30] Ye, Q; Li, Y; Zhang, W y Cai, W (2019). Influential factors on water footprint: A focus on wheat production and consumption in virtual water import and export regions. *Ecological Indicators* 102 (2019) 309–315.
- [31] Food and Agriculture Organization of the United Nations FAO (2006). Evapotranspiración del cultivo Guías para la determinación de los requerimientos de agua de los cultivos. Roma, Italia.
- [32] Ayushi T, Pyasi S. and Galkate R (2018). Estimation of evapotranspiration using CROPWAT 8.0 Model for Shipra River basin in Madhya Pradesh, India. *Int J Curr Microbial App Sci* (7):1248–59.
- [33] Dastane, N. G. (1974). Effective Rainfall in Irrigated Agriculture. F.A.O. Irrigation and drainage paper 25, Food and Agriculture Organization of the United Nations. Roma, Italia. 68 pp.
- [34] Villazón, J., Noris, P. y Martín, G. Determinación de la precipitación efectiva en áreas agropecuarias de la provincia de Holguín. Universidad de Holguín. Sede José de la Luz y Caballero, Facultad de Ciencias Naturales y Agropecuarias, Centro de Estudios para Agroecosistemas Áridos (CEAAR).
- [35] Saravanan, K. and Saravanan, R. (2014). Determination of water requirements of main crops in the tank irrigation command area using CROPWAT 8.0. *International Journal of Interdisciplinary and Multidisciplinary Studies*, 1(5), 266-272.
- [36] Hossain, M., Maniruzzaman, M. and Biswas, J. (2017). Irrigation Scheduling of Rice (*Oryza sativa* L.) Using CROPWAT Model in the Western Region of Bangladesh. *The Agriculturists* 15(1): 19-27.
- [37] Chaali, N., Ouazaa, S., Jaramillo-Barrios, C., Araujo, G. and Ávila, E. (2020). Edaphoclimatic characterization and crop water requirement of Arracacha (*Arracacia xanthorrhiza* Bancroft) roots in upland production áreas. *Scientia Horticulturae* 272, 109533.
- [38] Luo, X., Xia, J. and Yang, H. (2015). Modeling water requirements of major crops and their responses to climate change in the North China Plain. *Environ. Earth Sci.* 74 (4), 3531–3541.
- [39] Esparza, A. (2019). La huella hídrica como indicador de sustentabilidad del uso del agua en taladros de perforación del proyecto minero de exploración avanzada Cascabel en la provincia de Imbabura. Trabajo de Investigación previo a la obtención del Título de Magister en Gestión Sustentable de Recursos Naturales. Universidad Técnica del Norte, Instituto de Posgrado, Ibarra – Ecuador.
- [40] Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales – IDEAM (2008). Informe anual sobre el estado del medio ambiente y los recursos renovables en Colombia: Estudio Nacional del Agua, relaciones de demanda de agua y oferta hídrica. Bogotá. 162p.
- [41] Bueno, S., Marcelleño, S., Nájera, O. y De Haro, R. (2019). Implementación del método de escasez en la determinación de la huella hídrica en la zona costera de San Blas, México. *Tecnura*, 23(62), 45-54.
- [42] Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO) (2018). The Global Framework on Water Scarcity in Agriculture. Roma. Recuperado de <http://www.fao.org/land-water/overview/wasag/en/>
- [43] Cenicafé (2005). La Variedad Castillo Pueblo Bello para las regiones de Magdalena, Cesar, La Guajira y Norte de Santander. *Avances Técnicos* 341.
- [44] Food and Agriculture Organization of the United Nations - FAO, (2010). CROPWAT 8.0 Model, Rome, Italy, available at: <http://www.fao.org/nr/water/infores/databases/cropwat.html>.

- [45] Federación Nacional de Cafeteros FNC y Cenicafé (2018). Anuario meteorológico cafetero 2017. Chinchiná, Caldas.
- [46] International Research Institute for Climate and Society IRI. Monthly Wind Climatology. Recuperado de http://iridl.ldeo.columbia.edu/maproom/Global/Climatologies/Vector_Winds.html?T=Jan.
- [47] Federación Nacional de Cafeteros FNC y Cenicafé (2019). Anuario meteorológico cafetero 2018. Chinchiná, Caldas.
- [48] Farfán, F. y Sánchez, P. (2016). Densidad de siembra del café Variedad Castillo en sistemas agroforestales en el departamento de Santander, Colombia. *Cenicafé* 67(1):55-62
- [49] Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales – IDEAM (2019). Estudio Nacional del Agua ENA 2018. Bogotá.
- [50] Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales – IDEAM (2019). Estudio Nacional del Agua ENA 2018. Bogotá.
- [51] Burítica, A., Rodríguez, F., González, C. y Lundy, M. (2015). Costos de producción de café en Nariño, Colombia. Una aproximación a los costos de producción (2013). Centro Internacional de Agricultura Tropical – CIAT.
- [52] Ariza, W. y Arévalo, D. (2018). Estimación de la huella hídrica azul y verde de la producción cafetera en ocho cuencas en el sur del Departamento del Huila. *Revista de Investigación Agraria y Ambiental RIAA* Vol. 9, Núm. 2.
- [53] Tovar-Hernández, N, Trujillo-González, J, Muñoz-Yáñez, S, Torres-Mora, M y Zárate, E (2017). Evaluación de la sostenibilidad de los cultivos de arroz y palma de aceite en la cuenca del río Guayuriba (Meta, Colombia), a través de la evaluación de huella hídrica. *ORINOQUIA - Universidad de los Llanos - Villavicencio, Meta. Colombia* Vol. 21 - No 1.
- [54] [43] Avilés, L. y Mineros, A. (2018). Evaluación de la huella hídrica y el efecto de los factores tecnológicos de la producción y procesamiento de café oro. Requisito para optar por el título de Ingeniería Agroindustrial. Universidad de El Salvador, Facultad de Ciencias Agronomicas, Departamento de Recursos Naturales y Medio Ambiente. San Salvador.
- [55] Lala-Ayo, H. y Fernández.Quintana, M. (2020). Análisis de la sostenibilidad mediante huella hídrica de la microcuenca del río Pita, Ecuador. *Tecnología y ciencias del agua* 11(1), 169-234.
- [56] Suryadi, E., Ruswandi, D., Dwiratna, S. and Pareira, B. (2019). Crop Water Requirements Analysis Using Cropwat 8.0 Software in Maize Intercropping with Rice and Soybean. *International Journal on Advanced Science Engineering Information Technology*.