

Evapotranspiration in Zero Discharge Constructed Covered Wetlands for Treatment of Coffee Wastewater

Vega Serrano, Haimar Ariel; Almeida Ospina, Juan Ernesto

Haimar Ariel Vega Serrano

haimar.vega@unilibre.edu.co

Universidad Libre, Colombia

Juan Ernesto Almeida Ospina

juan.almeida@unilibre.edu.co

Universidad Libre, Colombia

Revista Ingenierías USBMed

Universidad de San Buenaventura, Colombia

ISSN-e: 2027-5846

Periodicidad: Semestral

vol. 14, núm. 1, 2023

ingenierias.usbmed@usb.edu.co

Recepción: 02 Abril 2021

Revisado: 23 Marzo 2022

Aprobación: 14 Octubre 2022

URL: <http://portal.amelica.org/ameli/journal/536/5364250005/>

DOI: <https://doi.org/10.21500/20275846.5160>

Resumen: Durante la cosecha del café se producen residuos sólidos y líquidos con altas concentraciones de carga contaminante, los cuales por manejo inapropiado generan contaminación del suelo y de las fuentes hídricas, afectando a los seres vivos que utilicen esta agua para el consumo y actividades del campo. A lo largo del tiempo se han propuesto alternativas para el manejo y tratamiento de los residuos del beneficio del café, sin embargo, ha resultado ser un proceso complejo, costoso, poco adoptado por los productores del grano o los efluentes no cumplen con los requisitos de la normatividad vigente en el país. El objetivo de la investigación es establecer la evapotranspiración (ET) y los coeficientes de cultivo (Kc) de tres especies de plantas comunes en la región cafetera: Arundo donax, heliconia fire opal y brachiaria mutica. Con estas plantas se espera que se utilicen en los humedales construidos con descarga cero, como alternativa para el tratamiento de aguas residuales del beneficio del café. De igual manera, se construyen tres unidades en recipientes plásticos de 100 litros en las cuales se siembran las especies. Pasados tres meses del establecimiento de los cultivos se inician las mediciones del consumo diario de agua en cada humedal y se calcula la ET y la evaporación de referencia ET₀. Con lo anterior se evidencia que la especie Arundo donax es la especie con mayor ET, con un promedio de 8.6 4.2 mm/d, logrando un incremento del 83 % respecto de la ET₀ la cual es de 4.7 0.5 mm/d. El Kc promedio para la caña es de 1.8 0.8 siendo el mayor valor identificado. Las tres especies presentan valores de Kc mayores a uno. Con lo anterior, se concluye que estas especies pueden ser utilizadas para el tratamiento mediante evapotranspiración en humedales de descarga cero.

Palabras clave: Coeficiente de cultivo, humedad del suelo, tratamiento biológico, vertimiento cero.

Abstract: During the coffee harvest, solid and, liquid residues with high concentrations of contaminant load are produced, which due to inappropriate handling generate contamination of the soil and water sources, affecting living beings that use this water for consumption and field activities. Over time, alternatives have been proposed for the management and treatment of coffee processing residues, however, it has turned out to be a complex, expensive process, little adopted by grain producers, or the effluents do not meet the requirements of the regulations in force in the country. The objective of the research is to establish the evapotranspiration (ET) and the crop

coefficients (K_c) of three common plant species in the coffee region: *Arundo donax*, heliconia fire opal, and *brachiaria mutica*. With these plants, it is expected that they will be used in wetlands built with zero discharge, as an alternative for the treatment of wastewater from the coffee mill. In the same way, three units are built in 100-liter plastic containers in which the species are planted. Three months after the establishment of the crops, the measurements of the daily water consumption in each wetland begin and the ET and reference evaporation ET_r are calculated. With the above, it is evident that the species *Arundo donax* is the species with the highest ET , with an average of 8.6 4.2 mm/d, achieving an increase of 83 % with respect to ET_r , which is 4.7 0.5 mm/d. The average K_c for cane is 1.8 0.8, being the highest value identified. The three species present K_c values greater than one. With the above, it is concluded that these species can be used for treatment by evapotranspiration in zero discharge wetlands.

Keywords: Crop Coefficient, Soil Humidity, Biological Treatment, Zero Disposal.

I. INTRODUCCIÓN

Una de las principales actividades económicas en Colombia es la producción de café representando ingresos para más de 500 mil familias productoras en varias regiones del país [1]. Para obtener el café pergamino seco (*cps*) se requiere retirar la pulpa y el mucílago del grano, el proceso es conocido como beneficio; las aguas residuales generadas durante el procesamiento por vía húmeda con los cuatro lavados en el tanque tina (beneficio tradicional) tienen un potencial de hidrógeno (pH) bajo y concentraciones de demanda química de oxígeno (DQO) alrededor de 27000 mg/l O. [2].



FIGURA 1.
Vertimiento aguas residuales en estanques

Los residuos líquidos del beneficio son comúnmente vertidos en estanques excavados como se aprecia en la Figura 1, tienen una alta cantidad de materia orgánica [3], emiten fuertes olores, generando impactos ambientales negativos debido a la gran cantidad de macro/micronutrientes y compuestos fenólicos presentes

[4]. Por ello, se requiere un tratamiento apropiado antes de su vertimiento [5], esta situación condujo al Centro Nacional de Investigación en Café (Cenicafé) a desarrollar el sistema modular de tratamiento anaerobio para las aguas mieles del café (SMTA) para los residuos líquidos del beneficio en el tanque tina. A pesar del tratamiento los efluentes se mantienen las concentraciones de carga alta que pueden afectar las fuentes hídricas y los suelos de las regiones cafeteras [2].

De acuerdo con la revisión bibliométrica realizada en Scopus, se encuentran 36 artículos de investigaciones para el tratamiento de los residuos líquidos del procesamiento del café entre 2008 y 2020, la mayor parte realizadas en Brasil y otros países como India y Colombia. Los tratamientos propuestos son de tipo biológico, con tendencia en los últimos años a usar tratamientos químicos. Los humedales construidos (CWs sigla por su nombre en inglés) se han convertido en una alternativa para el tratamiento de aguas residuales, siendo una opción para las aguas residuales del procesamiento de los frutos del café, utilizando filtros anaerobios seguidos de humedales construidos [6]. Gregersen y Brix [7] proponen un tipo de humedal construido de descarga cero utilizando cultivos de sauce (*Salix viminalis* L.) para evapotranspirar las aguas residuales domésticas y las aguas producto de las lluvias en estanques revestidos. En este tipo de humedal, los árboles absorben los nutrientes y las sustancias potencialmente contaminantes de las aguas residuales, según Halicki et al. [8] logran una reducción de casi el 100 % en compuestos orgánicos, fósforo y bacterias patógenas, los compuestos de nitrógeno se disminuyen hasta el 85 %. Otra ventaja de estos humedales es el uso de los tallos de los sauces como biomasa. Debido a estas ventajas se inicia el desarrollo de este tipo de humedales, como alternativa para tratar aguas residuales domésticas en zonas rurales donde los vertimientos no están permitidos y de esta forma evitar la contaminación del suelo y el agua.

El tamaño de los humedales construidos con descarga cero depende directamente de la evapotranspiración (ET) por ello debe ser evaluada, en el caso de Tuttolomondo et al. [9] en Sicilia (Italia) miden la ET de *Arundo donax* en humedales construidos con longitud de 50 m, 1.0 m de ancho y 0.5 m de profundidad con flujo continuo para tratamiento de aguas residuales, a una temperatura media de 17 °C, estimando una evapotranspiración de referencia (ET₀) promedio de 4.3 mm/d, los valores de coeficiente de cultivo (K_c) promedio para 10 días son entre 1.2 y 7.5 en el primer año de medición.

La precisión de las estimaciones de la evapotranspiración ha mejorado debido a métodos nuevos y sofisticados. Sin embargo, la estimación de la ET de humedales sigue estando insuficientemente caracterizada debido a la complejidad de las características de la superficie y la diversidad de tipos de humedales [10]. Existen valores de K_c disponibles para algunas especies de plantas en humedales y el cálculo no estándar de ET₀ ha dado como resultado varios valores de K_c para la misma especie de planta [10]. Por ello, se necesita incrementar las investigaciones con el fin de optimizar la eficiencia de los sistemas [9].

Esta investigación se realiza para identificar especies de plantas con la capacidad de evapotranspirar la mayor cantidad de agua por unidad de área por día, debido a la necesidad de tratar las aguas residuales del beneficio del café de en las fincas con bajos requerimientos de operación y mantenimiento. El objetivo general es evaluar la evapotranspiración en humedales construidos con descarga cero con cubierta en las especies caña castilla (*Arundo donax*), heliconia fire opal y *Brachiaria mutica* como alternativa para el tratamiento de aguas residuales del beneficio del café. Para ello, se establece el comportamiento de los elementos meteorológicos, se determinan los valores de evapotranspiración (ET_c), evapotranspiración de referencia (ET₀) y el coeficiente de cultivo (K_c) de cada especie.

II. METODOLOGÍA

El proyecto de investigación se realiza en la Hacienda Majavita, propiedad de la Universidad Libre, localizada en El Socorro, Santander, a una elevación de 1350 m sobre el nivel medio del mar con coordenadas geográficas: latitud 6°28'21.05" y longitud -73°15'03.08".

A. Materiales

En la evaluación de la ET en los CWs se utiliza el agua proveniente de la fuente de abastecimiento, conocida como La Ceiba, localizada en la Hacienda Majavita. En la Tabla 1 se presentan las características fisicoquímicas del agua sin tratamiento.

TABLA 1.
Características fisicoquímicas del agua

Parámetro	Valor	Unidad
Alcalinidad	353.0	mg/l CaCO ₃
Color aparente	27.7	UPC
Conductividad	414.0	μS/cm
pH	7.3	upH
Temperatura	19.0	°C
Turbiedad	6.3	UNT
	Fuente: [11]	

La selección de las especies de plantas para el estudio se realiza en función de los antecedentes para el tratamiento de aguas residuales en humedales por ser especies comunes en la región y haber sido evaluadas previamente en un estudio piloto [12] estas son: Arundo donax, heliconia fire opal y Brachiaria mutica. A continuación, se describen algunas de sus características.

Arundo donax, conocida como caña castilla, tiene su parte aérea formada por tallos huecos y segmentados con nudos cada 20 a 30 cm y un diámetro medio de 2 cm y una altura entre los 5 a 6 m. Los nudos con forma de anillo engrosado. La parte subterránea está constituida por un rizoma carnoso [13]. Además, se caracteriza por ser una gramínea (Poaceae) rizomatosa perenne (PRG); es una hierba C3, considerada entre los cultivos apropiados para la producción de biomasa debido a su alto rendimiento y bajos requisitos de insumos [14], tiene tolerancia a los contaminantes, permite aplicaciones de fitorremediación, no produce semillas y el esparcimiento se limita a la dispersión mecánica [15]. La tasa de producción anual promedio es de 3 kg/m² de materia seca [16].

La Heliconia fire opal conocida, como ave del paraíso, se caracteriza por una altura entre 1.0 y 2.5 m, tiene aproximadamente 70 inflorescencias al año por planta, las cuales aparecen a los 7 meses de la siembra. Además, sus usos potenciales son: protección de fuentes de agua, paisajismo y ornamentación [17].

Brachiaria mutica es una especie usada en procesos de tratamiento de aguas residuales, es una hierba perenne [18], sus tallos pueden alcanzar 1.0 m en altura o 3.0 m en arrastre [19], son huecos y robustos, tienen



FIGURA 2.
Humedales descarga cero con cubierta.
Autor

nudos peludos y vainas en las hojas, donde los nodos tocan el suelo brotan nuevas raíces [20]. Por otro lado, su desarrollo fenológico es en 8 meses con producción de materia seca acumulada de 8978 kg/ha año, su uso en humedales construidos se da por su capacidad de producción de materia seca y los consumos de agua, nitrógeno y biomasa [21].

B. Procedimiento

Para el procedimiento se dimensionan y construyen tres dispositivos para la medición de la ET como se aprecia en la Figura 2, cada uno compuesto por un humedal adecuado en un recipiente plástico de color negro de los utilizados como saleros marca Colempaques con un largo de 1.0 m, ancho de 0.40 m y profundidad de 0.25 m. También está compuesto por un dispensador de agua elaborado en tubería PVC sanitaria de cuatro pulgadas con control de flujo mediante un flotador instalado dentro de un recipiente plástico de color blanco.

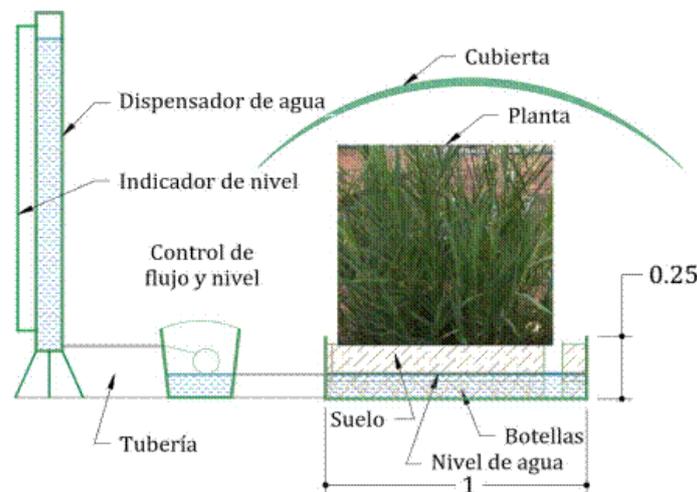


FIGURA 3.
Diagrama dispositivo para medición de ET

Cada dispensador con un piezómetro en manguera plástica translúcida de media pulgada con un metro para identificar el nivel dentro del tubo. Cada humedal tiene una cubierta elaborada con estructura en tubería PVC de media pulgada y recubierta en plástico translúcido del usado para invernaderos, para evitar el ingreso de agua durante las precipitaciones. En el humedal se usa un flotador para identificar el nivel de agua, el cual

debe ser constante. En la Figura 3 se presenta el diagrama del dispositivo para medir la ET y sus principales componentes y en la Figura 4 se presenta una fotografía del dispositivo donde es posible identificar algunos de los componentes del humedal plantado con Arundo donax.



FIGURA 4.
Humedal descarga cero con caña castilla

El humedal construido está compuesto por una capa inferior de 10 cm de espesor en botellas plásticas compactadas usado como lecho fijo para permitir la dispersión del agua por toda el área. Una capa de suelo areno arcilloso con 15 cm de espesor el cual se prepara combinando en igual proporción al área interna: tierra usada para propagar plantas con residuos compostados de la cosecha de café del año anterior. Sobre la capa de suelo se siembran las plantas seleccionadas mediante 10 esquejes. El agua ingresa al humedal a una distancia de 12 cm desde el fondo, proveniente del dispensador siendo su flujo controlado por el flotador para mantener un nivel constante y garantizar el suministro según el consumo de las plantas.

C. Recopilación de los datos

La recopilación de los datos se realiza haciendo mediciones en cada uno de los dispositivos a las 5:30 de la tarde. Donde se registraba el valor inicial del nivel en el dispensador y al siguiente día el nivel final, con los dos valores se calcula la diferencia de nivel. También, se realiza una verificación del nivel de agua dentro del tanque de control y del nivel de agua dentro del humedal mediante una reglilla (tapa de color amarillo) para garantizar los niveles de agua constantes y validar el suministro continuo a las plantas de acuerdo con el consumo.

D. Estimación del consumo

El consumo diario de agua se calcula en función de la variación del nivel en el dispensador (ΔH) y el

$$\text{Volumen} = \text{Área dispensador} \times \Delta H \quad (1)$$

La ET_c en el CWs con descarga cero se calcula en función del volumen de agua consumida por la especie de planta y el área del humedal según la siguiente ecuación:

$$ET_c = \frac{\text{Volumen}}{\text{Área humedal}} \quad (2)$$

Con los valores de ET_c en mm/d (litros/m²/d) se realiza el análisis del consumo en el tiempo.

La evapotranspiración del cultivo de referencia ET_0 es la tasa de evapotranspiración de una superficie de referencia, que ocurre sin restricciones de agua. La superficie de referencia corresponde a un cultivo hipotético de pasto con características específicas. Los únicos factores que afectan ET_0 son los parámetros climáticos [22]. En este caso ET_0 se calcula con la fórmula de Hargreaves [23].

El coeficiente de cultivo se establece mediante la relación entre ET_c y ET_0 siendo adimensional:

$$K_c = \frac{ET_c}{ET_0} \quad (3)$$

Los valores mayores a uno indican una evapotranspiración mayor a la del cultivo de referencia y se consideran aceptables para ser usadas en humedales con descarga cero.

Transcurridos tres meses de ser plantadas las especies en los humedales se inician las mediciones del consumo. La evaluación de las tres especies se realiza en el año 2019 desde finales de febrero hasta inicios de noviembre en un periodo de 262 días.

E. Diseño experimental

El diseño experimental aplicado es un solo factor completamente aleatorio, donde las repeticiones están constituidas por las mediciones en el tiempo y los tratamientos de cada una de las especies de plantas evaluadas. Los factores externos se involucran de la misma manera en todos los tratamientos, evitando el ingreso de agua lluvia a los humedales con la cubierta traslucida. Las unidades experimentales se ubican en el mismo lugar, con ello los elementos meteorológicos se consideran homogéneos en todo el experimento. El modelo estadístico usado para el análisis fue: $Y_{ij} = \mu + \tau_i + \epsilon_{ij}$, donde: $i = 1, \dots, t$; t : número de tratamientos; $j = 1, \dots, n$; n : número de repeticiones por tratamiento; μ es el efecto medio; τ_i es el efecto del i ésimo tratamiento; ϵ_{ij} es el error experimental [24].

La hipótesis nula considera igualdad en la ET para las especies de plantas evaluadas y la hipótesis alternativa considera diferencia entre al menos dos de las especies.

F. Análisis estadístico

A los valores de ET correspondientes a los CW_s se les calcula, para cada especie, los percentiles 0.05 y 0.95. Además, se omiten los valores fuera de este intervalo con el

TABLA 2.
Elementos meteorológicos

Variable	Temperatura (°C)			Humedad relativa (%)		
	Mínima	Máxima	Media	Mínima	Máxima	Media
Promedio	16.3	28.9	21.1	45.6	97.3	78.7
Desviación	0.9	1.7	0.9	8.9	2.3	5.5
CV	5.2	6.0	4.5	19.5	2.3	7.0
Mínimo	14.8	22.6	18.6	27.0	89.0	64.0
Máximo	18.6	32.7	23.1	67.0	100.0	89.4
Rango	3.8	10.1	4.5	40.0	11.0	25.4

fin de evitar valores extremos [25]. Seguidamente, se calculan promedios, desviaciones estándar, coeficientes de variación, máximos, mínimos y rangos, para los valores de ET_c , ET_0 , K_c , temperaturas y humedades relativas, máxima, mínima y media. También se realiza un análisis de varianza para los valores de ET_c y se establecen las ecuaciones de correlación entre ET_c acumulada respecto de ET_0 acumulada y el tiempo acumulado (TA).

III. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Con la información de la estación meteorológica Alberto Santos de Cenicafé se establecen los valores de temperatura y humedad relativa y a partir del consumo de agua la ET de cada especie el coeficiente de cultivo y sus variaciones.

A. Elementos meteorológicos

En la Tabla 2 se presenta el resumen de los valores recopilados del boletín diario de la estación Alberto Santos de [26] localizada en la vereda Morros en el Socorro Santander con coordenadas geográficas latitud $6^{\circ}42'30.22''$ y longitud $-73^{\circ}13'18.28''$ a una elevación de 1505 m sobre el nivel medio del mar.

De acuerdo con la medición realizada en [27] se encuentra a una distancia aproximada de 4.0 kilómetros desde la hacienda Majavita. La temperatura media durante los días de monitoreo presenta poca variación y es de 21.1 ± 0.9 grados centígrados, la humedad relativa media es de 78.7 ± 5.5 %. Según lo anterior, se identifica que es la variable con mayor dispersión la humedad relativa mínima al tener los mayores coeficientes de variación y el rango más amplio.

B. Comportamiento de la temperatura

La temperatura ambiente es una de las variables intervinientes en el proceso de evaporación. En la Figura 5 se representa el comportamiento de la temperatura mínima, máxima y media durante el período de evaluación de la evapotranspiración de los humedales de descarga cero, siendo la temperatura máxima la que presenta mayores variaciones. A mediados de marzo y septiembre se presentan los mayores valores de temperatura máxima, siendo el mayor 32.7 #C registrado en septiembre.

El período con las temperaturas más bajas se presenta entre finales de agosto, inicio de septiembre y mediados de octubre, el valor mínimo fue de 14.8 #C a principios de septiembre.

Las estaciones y las temperaturas mínimas son los principales factores climáticos que afectan la ET de [28]. Los mayores deltas de temperatura entre máxima y mínima se presentan las dos primeras semanas de septiembre con un máximo de 17.3 #C, el promedio es de 12.6 ± 2.1 #C siendo homogénea según el coeficiente de variación. En la temperatura máxima se presenta un valor atípico correspondiente al día tres de octubre, la información se verifica con otras estaciones de la zona y ese día se presentan temperaturas bajas.

C. Comportamiento humedad relativa

La humedad relativa es una variable interviniente en el proceso de evapotranspiración con un comportamiento inversamente proporcional a la ET. En la Figura 6 se aprecian los box plot de la distribución de la humedad relativa mínima, máxima y media durante el período de seguimiento. Las menores humedades relativas se presentan en las dos primeras semanas de septiembre con un valor mínimo de 27 %. La humedad relativa máxima promedio es de 97.3 ± 2.3 % con poca variación de los valores durante el período de evaluación, siendo los mayores valores a mediados de junio.

D. Evapotranspiración de referencia

El comportamiento de ET_0 durante el período de seguimiento presenta poca variabilidad según el coeficiente de variación. El promedio es de 4.7 ± 0.5 mm/d. Los valores más elevados se presentan durante las dos primeras semanas de septiembre, debido a los mayores registros de temperatura y las menores humedades relativas. Los mejores valores son en las dos primeras semanas de noviembre. El valor acumulado para los 262 días es de 367 mm.

E. Evapotranspiración de las especies

Según los resultados presentados en la Tabla 3 con los valores comprendidos entre los percentiles 0.05 y 0.95 el promedio de los tres humedales es 7.5 ± 4.3 mm/d con un valor máximo de 19.5 mm/d para el CW plantado con heliconias. Los valores menos dispersos son para la caña con un coeficiente de variación (CV) del 49 %, los más dispersos son de la heliconia. Los tres humedales tienen valores mayores a ET_0 , con un porcentaje mayor para la caña con el 83 % y el menor para la heliconia con el 39 %

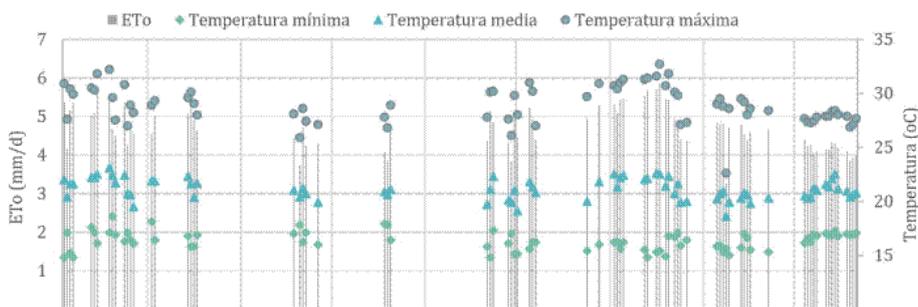


FIGURA 5
Comportamiento de la temperatura y ET0 en los días de monitoreo

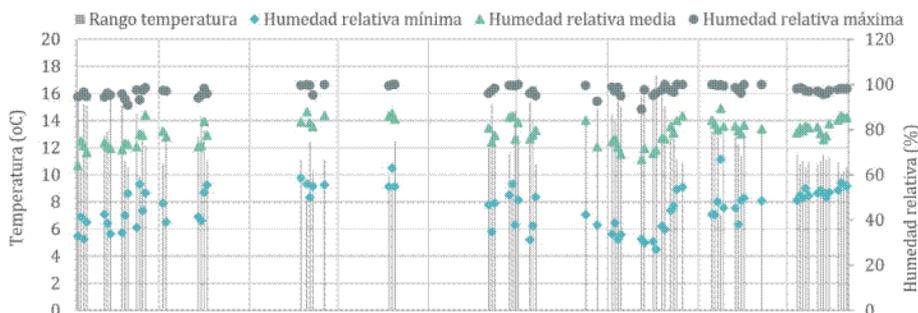


FIGURA 6
Comportamiento de la humedad relativa y el rango de temperatura en los días de monitoreo

TABLA 3.
Comportamiento de ETc y ET0 en mm/d

Variable	Todos	Caña	Heliconia	Mutica	ET0
Promedio	7.5	8.6	6.5	7.46	4.7
Desviación	4.3	4.2	4.7	3.6	0.5
CV	56.4	49.1	71.5	48.9	11.6
Mínimo	0.3	1.8	0.3	1.0	3.3
Máximo	19.5	19.2	19.5	16.0	5.9
Rango	19.2	17.3	19.2	15.0	2.6
Datos	229	78	73	78	78
Incremento	60	83	39	57	%

Con la agrupación de los valores de ET por días consecutivos de monitoreo se identifican los períodos con los menores valores en el primer semestre, siendo los mínimos a finales de julio y los mayores valores se presentan a inicios de octubre para las tres especies. El comportamiento está relacionado con el desarrollo de las plantas, siendo mayor el tamaño de las plantas a finales del período de evaluación, por ello, los valores más altos en consumo.

La distribución de la evapotranspiración en cada una de las especies se observa en la Figura 7, donde se observa un mayor valor para la caña con promedio y medianas muy próximas, el segundo lugar es para el pasto mutica y los valores más bajos para la heliconia. Los valores de ET más dispersos corresponden a la heliconia y los menos disgregados para el pasto mutica.

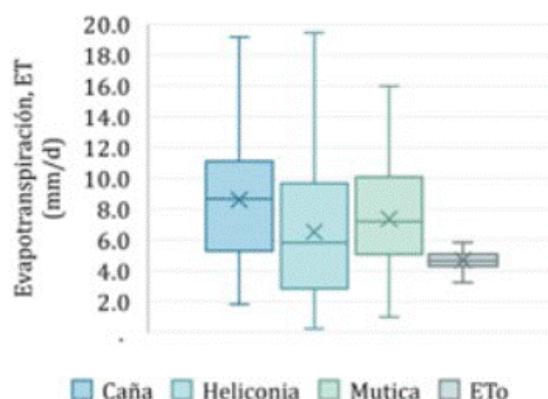


FIGURA 7.
Distribución de la ET por especies

El valor de ET_c para la caña es similar al reportado en un estudio piloto realizado por Vega [12] con valor de 7.8 6.8 mm/d.

El valor de ET_c para el pasto mutica es mayor al obtenido durante un período de 17 meses, en ocho lisímetros regados con efluentes de aguas residuales domésticas secundarias con remoción de nitrógeno y producción de forraje con una evapotranspiración promedió de 4.6 mm/d [29].

En el caso de Valencia [30] en Pereira Colombia se utiliza Heliconia psitacorum cultivada en recipientes de cuatro litros y sustrato en arena transcurridos dos meses estima un valor para la ET en 3.85 2.6 mm/d para un período de seguimiento de 33 días, bajo cubierta en este caso el valor es mayor.

La ET diaria de la caña castilla se evalúa en Pisa, Italia, mediante un lisímetro de forma cuadrada de 1.2 m y 0.9 m de profundidad, usando la misma tierra de la excavación con temperatura media de 18 °C y una ET_0 de 3.3 mm/d siendo la ET promedio de 7.4 mm/d, el K_c vario de 0.4 a 1.9 [31] en este caso el valor de ET_c es mayor.

El análisis de varianza para un nivel de significancia del 95 % ($\alpha < 0.05$) que se realiza con InfoStat a los valores de ET de las tres especies obtiene un p-value de 0.0006 denotando la existencia de diferencia entre los tratamientos. El análisis Post hoc que se realiza con Tukey obtiene un valor de 3.94 entre la caña y la heliconia, es decir, existe entre los dos tratamientos una diferencia significativa con lo cual se acepta la hipótesis alternativa.

F. Comportamiento de la ET acumulada

En la Figura 8 se presenta el comportamiento de la ET para las tres especies evaluadas en los CWs. Además, se aprecia al inicio del monitoreo el mayor consumo de la caña y en el tiempo acumulado la mayor capacidad de consumo de agua de la especie. En el caso de la heliconia y del pasto mutica los primeros días el consumo son similares, para el final del período se presenta un incremento en el consumo del pasto mutica por tener un mayor tamaño.

La evapotranspiración de referencia acumulada, denotada por ET_{0A} , es 367 mm, la evapotranspiración acumulada para los cultivos ET_cA de las especies en los 262 días son: caña de 673 mm siendo un 83 % mayor a la ET_{0A} , heliconia 478 mm con un valor mayor del 30 % y mutica 576 mm con un 57 % sobre la ET_{0A} . Los incrementos son similares a los hallados en [31] con un 60 % para la caña. Los valores de ET acumulados para cada una de las plantas se correlacionan con los valores acumulados de ET_0 , y tiempo acumulado (TA) obteniendo valores altos en los coeficientes de correlación de Pearson, siendo el mayor valor para Arundo donax.

En el estudio que se realiza en Bogotá, Colombia [25], para evaluar la tasa de ET de la especie de sauce Salix humboldtiana para tratar aguas residuales domésticas, se utilizan lisímetros para determinar el efecto

de la edad de la planta en el momento de la plantación (un año o seis meses) y el tipo de agua (aguas residuales domésticas o agua fertilizada). La edad de la planta es el parámetro más importante que influye en la tasa de ET. La tasa de ETc es de 1456 mm/año, para este caso el menor valor de la ETc acumulada puede estar relacionada por las especies utilizadas y la menor edad del cultivo.

G. Coeficiente de cultivo

El coeficiente de cultivo es la relación entre la ETc y la ET0, en la Figura 9 se representa la distribución de los coeficientes de cultivo para las tres especies evaluadas. El análisis se realiza con los valores comprendidos entre los percentiles 0.05 y 0.95 para evitar sesgos en los datos. Según los resultados el mayor valor corresponde a la caña y el menor a la heliconia. Los resultados son útiles para comparar con otros lugares con diferentes condiciones respecto de los elementos meteorológicos.

Los valores promedio para cada especie y la desviación estándar son: caña 1.8 0.8, heliconia 1.3 0.8 y mutica 1.6 0.7. Los valores con mayor dispersión son de la heliconia. Los resultados para la caña se encuentran entre los valores reportados por Tuttolomondo et al. [9] y Triana et al. [31] en lisímetros evaluados en Italia.

Los valores de los coeficientes de cultivo varían a lo largo del período de seguimiento para las tres especies, en el caso de la caña castilla de 0.4 hasta 4.5, los menores valores se registran a finales de julio y los mayores en los primeros días de octubre según lo expuesto por Drexler et al. [10] y Headley et al. [32]. Además, se identifica que los coeficientes pueden cambiar en función de las condiciones climáticas del lugar donde se evalúa, también, pueden variar sustancialmente con el tiempo por las estaciones, el tipo de vegetación y las características propias de la clase de humedales. En este caso los cambios en la temperatura y la humedad relativa afectan los valores de los coeficientes. Sin embargo, se mantienen dentro de lo esperado. De acuerdo con Borin et al. [33] el Kc asume diferentes patrones y valores en relación con la edad de la planta y la etapa de crecimiento por ello la importancia de las plantas en la regulación de las pérdidas de agua en sistemas de humedales construidos a pequeña escala, donde el efecto de la advección en las tasas de ET es evidente, en este caso el tamaño de los humedales utilizados se considera pequeños, fenómeno es posible de presentarse.

Los mayores valores de ET se presentan en el segundo semestre del seguimiento con valores superiores al promedio en la mayoría de los días, según lo explican Kadlec et al. [34] la ET puede estar fuertemente influenciada por otros factores que afectan la transpiración de la planta como el vigor de la planta y la cantidad de biomasa aérea y área foliar.

En una finca cafetera en Colombia [2], se evalúa un sistema acuático, utilizando las especies flotantes *E. crassipes* y *P. stratiotes* acoplado en serie a un SMTA y tres lagunas impermeabilizadas de 6 m de largo, 1.5 m de ancho y 0.5 m de profundidad, a un caudal de 550 ml/min, para una finca con producción de 844 @ de café pergamino seco (cps)/año y una generación media de agua residual de 5 litros/kg cps. El sistema acuático permite disminuir la concentración media de la DQO

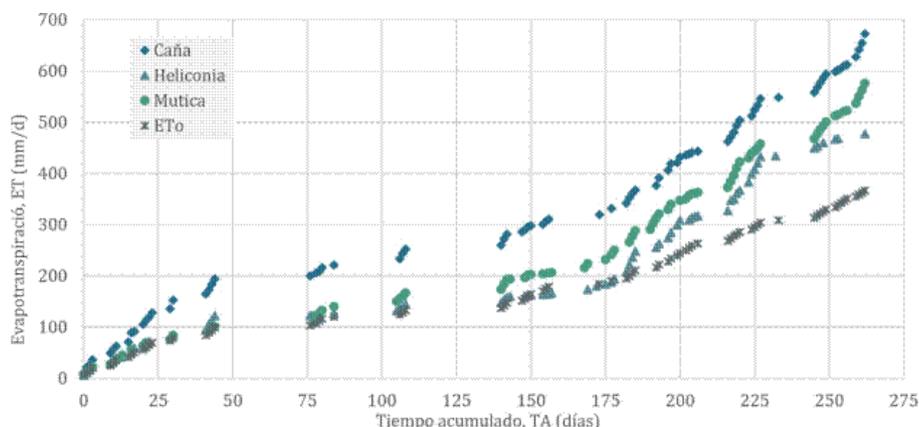


FIGURA 8.
ET acumulada en el tiempo de las tres especies

y DBO5 de las aguas mieles tratadas anaerobiamente desde valores de 1902 y 821 mg/l O₂ a valores de 328 y 143 mg/l O₂, respectivamente, con un tiempo de detención hidráulica de 16 días.

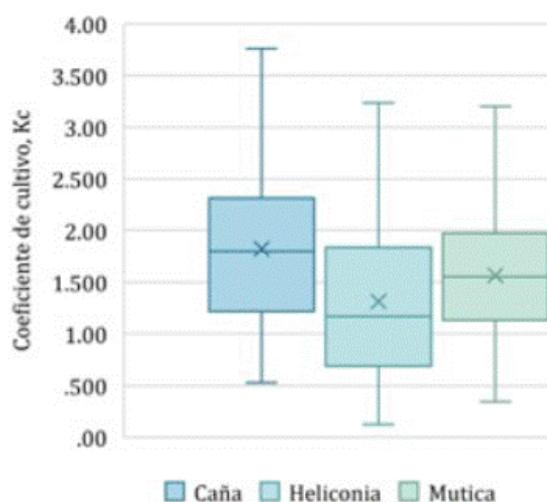


FIGURA 9.
Coeficientes de cultivo Kc

En el tratamiento con humedales de flujo continuo se requiere de 27 m² de área y un tiempo de retención de 16 días para lograr las remociones, previo tratamiento en otro sistema. Con humedales de descarga cero para las mismas condiciones planteadas se necesitan dos humedales 1.5 m de ancho por 6.5 m de largo con un área total de 22.2 m² para evapotranspirar los 55 metros cúbicos de agua residual, utilizando *Arundo donax* con una ET de 8.6 mm/d según los resultados. En el estudio que propone Higuera [35] de un biofiltro se utilizan cascarilla de arroz como sustituto parcial del sustrato de grava por ser menos costosa y estar disponible en la región. En este caso se utilizan botellas de plástico como sustrato por ser un material inerte que permite el flujo entre botellas y a través de estas. Además, se encuentre disponible y se reducen costos al no usar gravas.

La calidad del cultivo muestra un rendimiento estrictamente relacionado con la sanidad y las condiciones agroclimáticas [36]. Por ello, en este estudio se realiza el seguimiento de los elementos meteorológicos del lugar donde se desarrolla la investigación y se analiza su comportamiento.

IV. CONCLUSIONES

El pasto mutica y la caña castilla pueden ser utilizados para evapotranspirar el agua residual y producir biomasa con algunos usos en las fincas. Los valores de ET registrados están dentro de los intervalos reportados por los autores en otros lugares de Colombia y países como Italia.

Las principales variaciones en el consumo de agua, a lo largo del período de seguimiento, se relacionan con el crecimiento de las plantas (según los antecedentes) y el cambio en el estado del tiempo. Aunque los valores de ET se establecen de forma diaria para cuantificar con mayor precisión, se identifica que el valor acumulado de consumo de agua puede ser estimado según el tamaño de los humedales. De igual forma según la cantidad de agua residual generada en una determinada finca la cual depende de varios factores como el tamaño del cultivo y el tipo de beneficio utilizado.

Para usar los humedales construidos se requiere seguir haciendo mediciones de ET de las mismas especies y de otras, realizar el seguimiento durante un período de un año y suministrar agua residual a los CWs para establecer las variaciones en el consumo y la producción de biomasa y el índice de eficiencia del agua WUE para cada especie.

Los humedales con descarga o vertimiento cero como se estableció en la revisión son una alternativa para el tratamiento de las aguas residuales, por ello se propone su uso para las provenientes del beneficio del café y según los resultados las especies evaluadas pueden llegar a consumir el agua para su propio desarrollo y de esta forma impedir la descarga al medio con lo cual se evita la contaminación.

V. AGRADECIMIENTOS

Los autores expresan agradecimientos a los estudiantes de Ingeniería Ambiental de la Universidad Libre de los grupos de Hidrología y a la Universidad por los recursos económicos para la realización del proyecto.

REFERENCIAS

- [1] MinAgricultura, “MinAgricultura resalta labor de las más de 500 mil familias cafeteras en el Día Nacional del Café,” 2016 [Online]. Available: <https://www.minagricultura.gov.co/noticias/>.
- [2] N. Rodríguez Valencia, “Estudio de un biosistema integrado para el postratamiento de las aguas residuales del café utilizando macrófitas acuáticas,” Ph.D. dissertation, Universidad Politécnica de Valencia, 2009. <http://dspace.upv.es/xmlui/handle/10251/4342>.
- [3] M. M. Kondo, R. G. M. Moraes, S. J. Andrade y M. R. A. Silva, “Fenton and photo-Fenton process to the wastewater treatment of coffee fruits,” *Coffee Sci*, vol. 9, n.o 4, págs. 506-515, 2014.
- [4] D. L. Teixeira, A. T. Matos y M. Rossmann, “Folic acid in treatment of wastewater in coffee via wet processing,” *Coffee Sci*, vol. 7, n.. 1, págs. 91–98, 2012.
- [5] A. Cruz-Salomón, E. Ríos-Valdovinos, F. Pola-Albores, S. Lagunas-Rivera, R. MezaGordillo y V. M Ruíz-Valdiviezo, “Evaluation of hydraulic retention time on treatment of coffee processing wastewater (CPWW) in EGSB bioreactor,” *Sustainability (Switzerland)*, vol. 10, n.o 1, 2017. doi: 10.3390/su10010083.
- [6] R. Fia, A. T. Matos, M. P. Matos, E. C. Abreu y F. R. L. Fia, “Treatment of the wastewater of coffee fruit processing in anaerobic filter system followed by constructed wetland system: I Removal of organic material [Tratamento das águas do processamento dos frutos do cafeeiro em filtro anaeróbio seguido por sistema,” *Engenharia Agricola*, vol. 30, n.o 6, págs. 1191-1202, 2010. doi: 10.1590/S010069162010000600019.
- [7] P. Gregersen y H. Brix, “Zero-discharge of nutrients and water in a willow dominated constructed wetland,” *Water Science and Technology*, vol. 44, n.o 11–12, págs. 407-412, dic. de 2001. doi: 10.2166/wst.2001.0859.
- [8] W. Halicki y K. Kita, “Implementation of improved wetland systems as a ‘zerodischarge-technology’ in Poland,” *Water and Environment Journal*, vol. 31, n.o 2, págs. 168-175, 2017. doi: 10.1111/ wej.12230.
- [9] T. Tuttolomondo, M. Licata, C. Leto, R. Leone y S. Bella, *Effect of plant species on water balance in a pilot-scale horizontal subsurface flow constructed wetland planted with Arundo donax L. and Cyperus alternifolius L. Two-year tests in a Mediterranean environment in the West of Sicily (Italy)*, 2015. doi: 10.1016/j.ecoleng.2014.10.020.
- [10] J. Z. Drexler, R. L. Snyder, D. Spano y K. T. P. U. U, “A review of models and micrometeorological methods used to estimate wetland evapotranspiration,” *Hydrological Processes*, vol. 18, n.o 11, págs. 2071-2101, ago. de 2004. doi: 10.1002/hyp.1462.
- [11] J. P. Marín, A. Acosta, K. Sanabria y L. Gonzalez, “Evaluación de la calidad y oferta del recurso hídrico en las fuentes de abastecimiento de la Hacienda Majavita,” Socorro, Santander, 2019.
- [12] H. A. Vega Serrano, “Evapotranspiración en humedales con pasto elefante (*Pennisetum purpureum*) como tratamiento de aguas residuales del beneficio del café (escala piloto),” *El Centauro*, vol. 10, págs. 41-52, 2018.
- [13] M. P. Muelas, “Desarrollo de bioproductos de *Arundo donax* L. orientados al secuestro de carbono y reducción de la pérdida de biodiversidad,” vol. 1, n.. 1, 2015.
- [14] I. Lewandowski, J. M. O. Scurlock, E. Lindvall y M. Christou, “The development and current status of perennial rhizomatous grasses as energy crops in the US and Europe,” *Biomass and Bioenergy*, vol. 25, n.o 4, págs. 335-361, oct. de 2003. doi: 10.1016/S0961-9534(03)00030-8.

- [15] M. Czako y L. Márton, "Subtropical and tropical reeds for biomass," *Issues in Environmental Science and Technology*, págs. 322-340, dic. de 2010. doi: 10.1039/9781849732048-00322.
- [16] L. G. Angelini, L. Ceccarini y E. Bonari, "Biomass yield and energy balance of giant reed (*Arundo donax* L.) cropped in central Italy as related to different management practices," *European Journal of Agronomy*, vol. 22, n. 4, págs. 375-389, mayo de 2005. doi: 10.1016/j.eja.2004.05.004.
- [17] H. L. Ramírez, *Plantas exóticas: heliconias comunidad Bogotá Cachivera; Mitú, Vaupés*. Bogotá, 2012.
- [18] M. Douglas y R. A. O'Connor, "Effects of the exotic macrophyte, para grass (*Urochloa mutica*), on benthic and epiphytic macro invertebrates of a tropical floodplain," *Freshwater Biology*, vol. 48, n.o 6, págs. 962-971, 2003.
- [19] K. Langland y B. Craddock, *Identification and biology of non-native plants in Floridas natural areas*. University of Florida, 1998.
- [20] V. T. Thanh Ho *et al.*, "Surveying the growth and wastewater treatment ability of Para grass (*Brachiaria Mutica*) vegetation in the stabilization ponds," *ARNP Journal of Engineering and Applied Sciences*, vol. 13, n.o 19, págs. 8044-8048, 2018.
- [21] G. López A., J. Nuñez D., L. Aguirre T. y E. Flores M., "Dinámica de la producción primaria y valor nutritivo de tres gramíneas tropicales (*Melinis minutiflora*, *Setaria sphacelata* y *Brachiaria mutica*) en tres estados fenológicos," *Revista de Investigaciones Veterinarias del Perú*, vol. 29, n.o 2, pág. 396, 2018. doi: 10.15381/rivep.v29i2.14494.
- [22] J. A. Villegas y B. E. Torres, "Evapotranspiración," *Serie Didáctica, Facultad de Agronomía y Zootecnia, Universidad Nacional de Tucuman*, vol. 45, 1977.
- [23] J. Sánchez San Román, *Cálculo de la Evapotranspiración Potencial mediante la fórmula de Hargreaves*, 2010.
- [24] W. Hines y D. Montgomery, *Probabilidad y estadística para ingeniería y administración*, México, 1996.
- [25] F. Moreno, J. Lara-Borrero, L. Rojas e I. VeraPuerto, "Analysis of *Salix humboldtiana* to be used as the plant species in evapotranspirative willow systems in Latin American highland climate conditions," *Journal of Environmental Science and Health, Part A*, vol. 54, n.o 13, págs. 1302-1310, nov. de 2019. doi: 10.1080/10934529.2019.1642695.
- [26] Cenicafe, "Boletín diario Agroclima," 2020 [Online]. Available: <https://agroclima.cenicafe.org/web/guest/b>.
- [27] Google Earth, *Google Earth*, 2020.
- [28] J. Pioceau, F. Panfili, G. Bois, M. Anastase, L. Dufossé y V. Arfi, "Actual evapotranspiration and crop coefficients for five species of three-year-old bamboo plants under a tropical climate," *Agricultural Water Management*, vol. 137, págs. 15-22, 2014. doi: 10.1016/j.agwat.2014.02.004.
- [29] L. L. Handley y P. C. Ekern, "Effluent irrigation of para Grass: water, nitrogen, and biomass budgets," *JAWRA Journal of the American Water Resources Association*, vol. 20, n.o 5, págs. 669-677, 1984. doi: 10.1111/j.17521688.1984.tb04749.x.
- [30] J. V. Quintero, *Evaluación de humedales evaporativos para el post tratamiento de aguas residuales domésticas*. Universidad Tecnológica de Pereira, 2014.
- [31] F. Triana, N. Nasso, G. Ragolini, N. Roncucci y E. Bonari, "Evapotranspiration, crop coefficient and water use efficiency of giant reed (*Arundo donax* L.) and miscanthus (*Miscanthus giganteus* Greef et Deu.) in a Mediterranean environment," *GCB Bioenergy*, vol. 7, n.o 4, págs. 811-819, jul. de 2015. doi: 10.1111/gcbb.12172.
- [32] T. R. Headley, L. Davison, D. O. Huett y R. Müller, "Evapotranspiration from subsurface horizontal flow wetlands planted with *Phragmites australis* in sub-tropical Australia," *Water Research*, vol. 46, n.o 2, págs. 345-354, feb. de 2012. doi: 10.1016/J.WATRES.2011.10.042.
- [33] M. Borin, M. Milani, M. Salvato y A. Toscano, "Evaluation of *Phragmites australis* (Cav.) Trin. evapotranspiration in Northern and Southern Italy," *Ecological Engineering*, vol. 37, n.# 5, págs. 721-728, 2011. doi: 10.1016/j.ecoleng.2010.05.003.
- [34] R. H. Kadlec y S. D. Wallace, *Treatment Wetlands*, 2009.

- [35] S. K. Higuera Infante, "Biofiltro con cascarilla de arroz y pasto vetiver (*C. Zizanioides*) para el tratamiento del efluente de la PTAR del INPEC Yopal, Casanare, Colombia," *Revista de Investigación Agraria y Ambiental*, vol. 8, n.o 1, págs. 107-118, 2017.
- [36] A. D. Vera, S. E. Comte, J. Guamán y E. J. Mora, "Calidad del cultivo de maíz en la provincia de Santa Elena: Rendimiento, sanidad y condiciones agroclimáticas," *Revista Venezolana de Gerencia*, n.o 3, 2020. doi: 10.37960/rvg.v25i3.33376.