



Evapotranspiración en humedales construidos con pasto elefante (*Pennisetum purpureum*) como tratamiento de aguas residuales del beneficio del café (escala piloto)

Evapotranspiration in wetlands with elephant grass (*Pennisetum purpureum*) as wastewater treatment of coffee benefit (pilot scale)

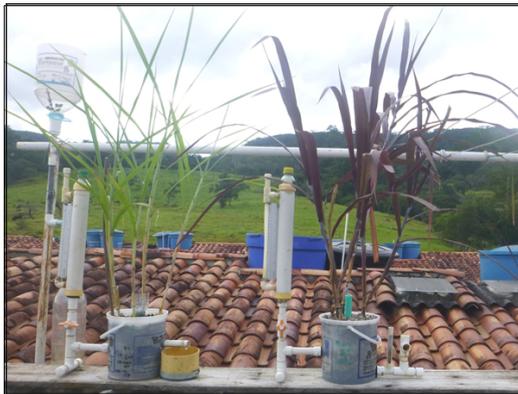
Haimar Ariel Vega Serrano¹

¹Ingeniero civil. Especialista en Manejo y ordenación de cuencas hidrográficas. Magíster en Desarrollo Sostenible y Medio Ambiente. Grupo de Investigación en Ingeniería Ambiental GIAM-Z, Universidad Libre Seccional Socorro. Colombia.
haimar.vega@unilibre.edu.co

Recepción artículo Noviembre 2018. Aceptación artículo Diciembre 2018.

EL CENTAURO. ISSN: 2027-1212

RESUMEN



Problema: Las aguas residuales del beneficio húmedo del café se generan en cantidades considerables en época de cosecha y son altamente contaminantes. Generalmente las fincas vierten estas aguas sin un manejo adecuado impactando de forma negativa el ambiente; por ello se deben buscar alternativas para su tratamiento. **Objetivo:** Evaluar el tratamiento de aguas residuales del beneficio de café mediante humedales de evapotranspiración con pasto elefante. **Metodología:** Se desarrolló un dispositivo hidráulico para la construcción de los humedales, incluyendo el sistema de suministro de agua y medición, se construyeron tres equipos, se evaluaron para verificar su correcta operación. En uno se sembraron por estaca cinco plantas de pasto elefante morado y en el otro elefante verde, se esperó el brote y crecimiento inicial de las plantas suministrando agua de forma permanente, luego se comenzó a agregar agua residual haciendo monitoreo diario,

midiendo periódicamente el tamaño de las plantas y la evaporación. Transcurridos 60 días se cortaron las plantas, se pesaron y se estimaron los consumos promedio diario y el incremento en tamaño. **Resultado:** Como resultado no existe diferencia significativa entre el consumo de agua de los dos pastos, pero si en el crecimiento y producción de biomasa, siendo mayor en el elefante morado con un consumo de agua de 15.4 mm/d y un crecimiento diario de 1.0 cm/d. **Conclusión:** El consumo de agua por planta es de 2.0 litros/mes, haciendo viable utilizar el tipo de humedal para el tratamiento del agua residual, al establecer la capacidad de las plantas de utilizar el agua residual para sus funciones vitales evitando el vertimiento al medio ambiente y de esta forma su deterioro.

Palabras Clave

Aguas residuales, biomasa producida, rendimiento, tratamiento biológico.

ABSTRACT

The wet coffee's benefit sewage are generated in considerable quantities in harvesting time and they are highly contaminants. Usually, in the farms throw them without an adequate treatment, which is a negative impact for the environment, therefore, treatment alternatives should be sought. The investigation objective was to evaluate the coffee's benefit sewage through evapotranspiration wetland with elephant pasture. For the wetlands construction a hydraulic dispositive was developed, including the water supply and measuring

system, and 3 systems were built, which were evaluate to verify their correct operation. In one of them were seed by stake five purple elephant pasture plants and in other one Green elephant pasture, it was waited the sprout and the initial growing of the plants, supplying water permanently, after that it started to add sewage and monitoring daily, measuring periodically the plants size and the evapotranspiration. Sixty days after, the plants were cut and weighed, and their average daily consumes and increase in size were estimated. As a result, there is no significant difference between the water consumption of the two pastures, but in the growth and production of biomass, being higher in the purple elephant pasture with a water consumption of 15.4 mm/d and a daily growth of 1.0 cm/d. The water consumption per plant is 2.0 Liters/month, making feasible to use the type of wetland for sewage treatment.

Keywords

Biological treatment, biomass produced, performance, sewage.

1. INTRODUCCIÓN

1.1. Contaminación por beneficio del café

En Colombia la producción de café es una de las principales actividades económicas, Santander es uno de los departamentos con mayor producción del reconocido grano. En el beneficio del café al retirar la pulpa y el mucílago se convierten en dos subproductos altamente contaminantes debido a las numerosas concentraciones de carga contaminante presentes, representadas en una demanda química de oxígeno [DQO] elevada y un potencial de hidrógeno [pH] bajo, hacen los dos residuos perjudiciales para el suelo y las fuentes hídricas donde son vertidas directamente o después de algún tipo de tratamiento.

Figura 1. Acidificación del suelo efecto de lixiviados



La causa de la contaminación está basada en las características propias de los residuos generados, los costos elevados de los sistemas de tratamiento requeridos por las altas cargas y el manejo inapropiado de los sistemas de tratamiento en las fincas donde se tienen de acuerdo a (Díaz Chaparro, Vesga Buenahora, & Vega Serrano, 2013), debido a la

poca o nula capacitación brindada a los propietarios de las fincas. Lo anterior trae efectos negativos como la alteración de las condiciones naturales del suelo y el agua, acidificación del suelo donde se hacen los vertimientos como se aprecia en la Figura 1, incremento los costos de potabilización del agua para consumo humano cuando se contamina en las partes altas de las microcuencas utilizadas como fuentes de abastecimiento.

En las fincas cafeteras se construyen las llamadas fosas Figura 2, consistentes en un pozo excavado en el suelo, donde son vertidos los lixiviados producto de la descomposición de la pulpa y en algunos casos de la mezcla mucílago pulpa, para evaporarlos, sin embargo, la mayor parte se infiltran en el suelo debido a su característica areno arcillosa, para luego desplazarse por percolación hasta los almacenamientos de agua subterránea contaminándolos.

Figura 2. Fosa para vertimiento de lixiviados



En algunas fincas construyen pozos similares a los utilizados para la cría de peces Figura 3, en este caso son usados para almacenar las aguas residuales del beneficio húmedo, y funcionan de forma similar a las fosas, pero con un mayor tamaño; en la parte superior se forma una capa conformada por sólidos suspendidos flotantes disminuyendo la evaporación,

Evapotranspiración en humedales con pasto elefante (*Pennisetum purpureum*) como tratamiento de aguas residuales del beneficio del café (escala piloto).

por lo tanto, durante el periodo entre cosechas se contamina el agua dentro del suelo.

Las personas tienen la creencia que al no ver el residuo se evita la contaminación en el ambiente, por ello realizan este manejo, además de ser una práctica promovida por quienes los asesoran para disminuir los efectos negativos producto del beneficio. La contaminación aumenta con la cantidad de café producido en las fincas y el tipo de manejo dado, el impacto depende del lugar donde se encuentre localizado el cultivo y el beneficiadero, siendo más alto cuando se encuentra próximo a fuentes de abastecimiento como quebradas y embalses.

1.2. Propiedades de los residuos

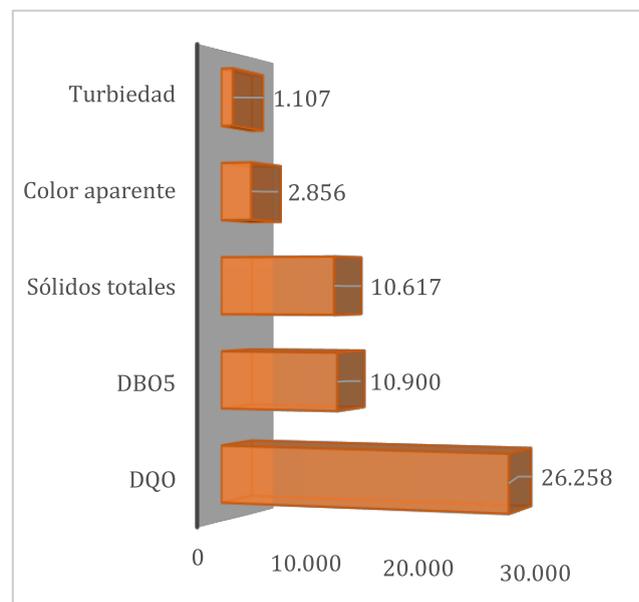
Los caficultores preocupados por preservar la calidad de los recursos naturales implementan sistemas de tratamiento de diferentes tipos, algunos promovidos por Cenicafé, como el sistema modular de tratamiento anaerobio [SMTA], utilizado para el caso de las fincas con beneficio por lavado después de fermentación, conocido como tradicional. El sistema requiere de la inoculación de los reactores metanogénicos, la estabilización de pH, y un correcto manejo para garantizar su eficiente operación, lo cual se dificulta por falta de disponibilidad de tiempo o por la mínima capacitación en la forma de utilizar el sistema. Una de las principales falencias ocurre al no retirar los sólidos que se acumulan en la tanquilla reguladora, los cuales deben ser retirados de forma periódica para garantizar el funcionamiento.

Figura 3. Pozo para almacenamiento de agua residual



En la Figura 4 se presentan indicadores físicos y químicos del agua residual después de retirar parte de los sólidos en el separador hidráulico de mucílago desarrollado en la Universidad Libre en el Socorro según (Vega Serrano, 2009), como parte del proyecto "Manejo de los subproductos del beneficio ecológico del café" conocido como [MaSBK], para reducir los efectos negativos en el ambiente en la finca Majavita, productora de café orgánico propiedad de la Universidad. Como se observa, las concentraciones son muy elevadas comparadas con las aguas residuales domésticas. El pH del agua residual es en promedio 3.5, siendo ácido y perjudicial para el suelo y agua donde entra en contacto el agua residual.

Figura 4. Características agua residual del separador (Cadena Meneses, Gutiérrez Argüello, & Vega Serrano, 2013)



Las condiciones propias de la cosecha de café y de las características de las aguas residuales del beneficio requieren de sistemas de tratamiento acordes para lograr mitigar los elevados efectos negativos en el ambiente.

1.3. Tratamiento de aguas residuales del beneficio del café

El tratamiento de las aguas residuales del beneficio del café mediante desmucilagador mecánico puede ser realizado con un tren de cargas sencillo partiendo de mantener separadas la pulpa y las aguas mieles durante el beneficio, haciendo una modificación en el módulo Becolsub. La pulpa es transportada a las composteras y las aguas mieles a los separadores de mucílago para retirar el 50% de los sólidos presentes, el agua se deposita en tanques construidos en

Evapotranspiración en humedales con pasto elefante (*Pennisetum purpureum*) como tratamiento de aguas residuales del beneficio del café (escala piloto).

mampostería reforzada donde se realizan varios procesos, homogeneización de las características, estabilización del pH con la adición de cal apagada y con esto generar sedimentación de otra parte de los sólidos, para luego pasar a la siguiente fase donde se propone utilizar humedales con pasto y mediante evapotranspiración del agua residual evitar contaminar y producir alimento para el ganado. Este último elemento del tratamiento debe ser evaluado. Los humedales evaporativos son sistemas de flujo subsuperficial, modificados con el fin de hacerlos cero descargas. En estos sistemas el balance hídrico se modifica para aumentar la tasa de evapotranspiración, entendiendo esta como un proceso conformado por dos componentes diferentes: evaporación y transpiración (Brix, 2004)

1.4. Antecedentes

En Pereira, Colombia (Valencia Quintero, 2014) evaluó sistemas evaporativos utilizando cuatro especies de plantas: *Typha latifolia*, *Phragmites australis*, *Juncus effusus* y *Heliconia psittacorum* para el pos tratamiento de aguas residuales domésticas, con el objetivo de determinar las tasas de evapotranspiración efectiva (ET_e) y la evapotranspiración de referencia (ET_o) bajo condiciones climáticas locales. Obteniendo como resultado que el *phragmites australis* mostró las más altas tasas de evapotranspiración, alcanzando una tasa promedio de 16.1 mm/d, por tanto, el estudio sugirió la posibilidad de usar los humedales evaporativos como una alternativa de post tratamiento.

El desempeño de los humedales evaporativos puede verse afectado por numerosas variables que incluyen parámetros climáticos locales como: radiación solar, temperatura, humedad del aire, y velocidad del viento. También las propiedades de la vegetación en el humedal como: altura, rugosidad, resistencia del dosel, resistencia de los estomas, índice de área foliar, cobertura del suelo, desarrollo radicular, y manejo de cultivo, juegan un papel determinante en el funcionamiento de los mismos (Arias & Brix, 2007). Para medir la evapotranspiración de los cultivos de mini clavel en la Sabana de Bogotá se realizó un modelo físico para la obtención de datos de la evapotranspiración mediante lisímetros de pesada, esta información fue comparada con los diferentes modelos matemáticos utilizados para medir la evapotranspiración determinando que los modelos matemáticos generan resultados muy diferentes a los obtenidos con la medición directa del lisímetro (Lavao Pastrana, 2016).

Buscando evaluar la relación existente entre la evapotranspiración potencial calculada mediante

diferentes modelos matemáticos y la registrada en estaciones climatológicas de los departamentos de Cundinamarca y Valle del Cauca, en este estudio se utilizaron seis modelos matemáticos en los cuales se encontró una tendencia a sobreestimar el valor de la evapotranspiración potencial comparadas a las registradas en las estaciones, sin embargo, se encontró que las ecuaciones con variables como radiación solar, insolación, temperatura, velocidad del viento y humedad relativa presentaban un mejor comportamiento en los resultados (Marín, 2010).

Para realizar un análisis del comportamiento de la evapotranspiración real en la cuenca del río La Antigua en el Golfo de México, se tomó como escenario base el periodo 1960 – 1990 y se proyectó el comportamiento de esta variable a escenarios futuros del 2020 y 2050, para esto se utilizó la información de estaciones climáticas con registros mínimos de 15 años, evidenciando en los resultados cambios marcados en la evapotranspiración y al aplicar el modelo matemático para los escenarios futuros se presenta un aumento en la evapotranspiración real con respecto al escenario base (Cruz, 2011).

El tratamiento de las aguas residuales del beneficio del café mediante humedales de evapotranspiración brinda la posibilidad de darle una utilidad al agua y al tratamiento como tal, al tener un valor agregado al producir pasto, caña brava, bambú u otro tipo de material vegetal para uso en la finca de una forma sencilla, económica y acorde con las características propias de la cosecha de café en un corto periodo del año, brindando un paisaje agradable a la vista.

1.5. Objetivo General

Evaluar el tratamiento de aguas residuales del beneficio de café mediante humedales de evapotranspiración con pasto elefante.

1.6. Objetivos Específicos

- Definir las características de operación del dispositivo hidráulico para construir los humedales.
- Determinar la biomasa producida respecto del consumo de agua residual y la carga contaminante en el humedal.
- Identificar la relación entre evaporación potencial, temperatura y radiación solar.

2. METODOLOGÍA

El proyecto de investigación se realizó en el Socorro Santander Colombia. La clasificación del tipo de investigación se hizo según (Hernández Sampieri, Fernández Collado, & Baptista Lucio, 2006) siendo de carácter cuantitativo al realizar recopilación de datos mediante la medición de las variaciones de nivel y tamaño de las plantas. En la ejecución de la investigación, la técnica estadística utilizada fue cuantitativa de tipo muestreo, para determinar el consumo de agua y crecimiento de las plantas, se utilizó el análisis de varianza con la aplicación *MegaStat* y las figuras *box plot* se hicieron con *InfoStat*.

El dispositivo hidráulico para medir evaporación, consta de un recipiente plástico, un depósito para el agua en tubo PVC de 1½" con piezómetro y regla metálica para medir la diferencia de nivel, una válvula de control, un piezómetro para controlar el nivel en el recipiente y tapones en tapas de botella plástica para ingresar (azul) y retirar (rojo) el agua como se parecía en la Figura 5.

2.1. Procedimiento

Se inició con el desarrollo de los dispositivos hidráulicos para medir la evaporación y construcción de los humedales. Se elaboraron tres, utilizando recipientes plásticos de cuatro litros de forma cilíndrica con un diámetro de 17.2 cm y 25 cm de profundidad, el sistema de suministro se elaboró con un tubo PVC de 1¼" con accesorios y una manguera traslúcida unida a una regla metálica graduada en milímetros para definir la variación de nivel y así calcular el volumen de agua consumido.

Con los dispositivos se inició el monitoreo diario para verificar el funcionamiento y similitud entre los resultados. Luego se sembraron cinco plantas en dos de los dispositivos para conformar los humedales de evapotranspiración con una densidad de siembra es de 215 plantas por metro cuadrado. Se esperó el brote de los tallos suministrando agua de forma permanente, luego se midieron las alturas de cada una de las plantas para tener los valores iniciales y se inició el monitoreo diario del consumo de agua residual en los humedales y la evaporación durante 60 días entre mediados de julio hasta septiembre del año 2016. Con un total de cinco plantas en cada humedal.

Luego se podaron las plantas y se permitió el crecimiento de todos los brotes de las plantas en el humedal para cuantificar la biomasa producida. Se realizó el seguimiento al consumo y transcurridos dos meses, se podaron de nuevo las plantas. El proceso

se repitió otras dos veces más para un total de cuatro brotes. En el tercero se aplicó abono líquido para suministrar nutrientes a las plantas.

2.2. Población y muestra

Se utilizaron tres dispositivos hidráulicos, en uno se sembró pasto elefante morado, en otro elefante verde y el tercero se usó para medir la evaporación potencial. En cada humedal se colocaron cinco estacas del pasto. El consumo de agua se estableció a partir de 30 datos recopilados durante un periodo de 45 días transcurridos dos meses del brote de las plantas. El crecimiento se evaluó durante dos meses con siete mediciones realizadas cada 10 días.

3. RESULTADOS

Los resultados se presentan en orden según los objetivos específicos, en la primera parte, el funcionamiento de los medidores de evaporación potencial desarrollados durante la investigación siendo una innovación en la forma de determinar la cantidad de agua evaporada. Posteriormente, los consumos de agua por cada especie de pasto y el rendimiento, por último, la relación de la ET con la radiación solar durante el transcurso del día.

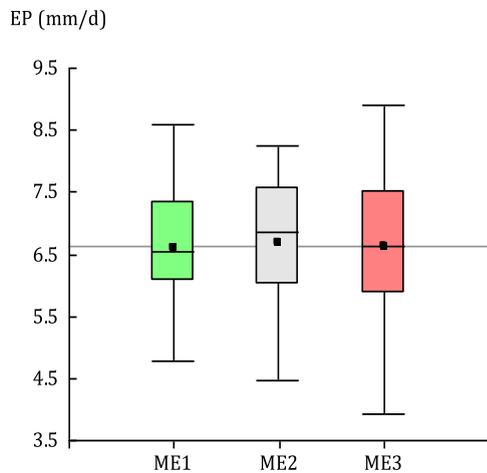
3.1. Medidores de Evaporación

Realizadas las pruebas con los tres medidores de evapotranspiración de nivel constante mediante el suministro de agua por consumo y luego del seguimiento en un periodo de 42 días, durante los cuales se realizaron mediciones de evaporación en 30, se obtuvo el comportamiento mostrado en la Figura 6 con valores promedio e intervalos similares para los tres. Los valores promedios de evaporación para los tres medidores fueron 6.6 ± 1.0 , 6.7 ± 1.1 y 6.6 ± 1.1 respectivamente con coeficientes de variación entre 15.2 y 17.0, siendo los datos uniformes. Los valores medios son muy similares, notándose una mayor distribución de los datos en el medidor número 3.

Figura 5. Dispositivo hidráulico desarrollado para medir evaporación



Figura 6. Análisis descriptivo medidores de evaporación



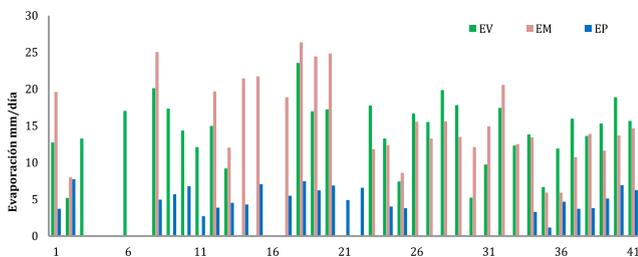
El análisis de varianza dio un *p-value* de 0.974, estableciendo un comportamiento equivalente en los tres equipos, requisito necesario para poder continuar con la siguiente fase. Los valores medidos de acuerdo a los diámetros del dispensador y el evaporador permiten una aproximación en la medida de ± 0.1 mm/d en los datos recopilados.

Culminadas las mediciones en los humedales, se continuó con el análisis de los datos obtenidos para identificar las variaciones en los consumos de agua por cada humedal, comparando con la evaporación potencial.

3.2. Consumo de agua

En la Figura 7 se presentan los consumos de agua de los dos humedales y la evaporación potencial medidos con los dispositivos hidráulicos de suministro continuo, en total se midió en 32 días; los mayores valores fueron para el pasto elefante morado, se observa la diferencia amplia entre los consumos de las plantas respecto de la evaporación, siendo en promedio 3.4 veces mayor en el caso del pasto elefante morado

Figura 7. Evapotranspiración en los humedales y evaporación potencial



En la figura 8 se presentan el *box plot* para la evaporación diaria para los dos humedales y la evaporación potencial, se aprecia una mayor dispersión de los datos en el caso del pasto EM, la diferencia entre la evaporación y los consumos en los dos humedales es apreciable, los promedios y medianas para los dos pastos son similares, por ello se realizó un análisis de variancia entre los dos humedales, el resultado es el de la figura 9, ratificando la mínima variación, obteniendo un *p-value* de 0.68, por tanto no existe diferencia significativa entre el consumo de agua de los dos humedales..

Figura 8. Comparativo evapotranspiración humedales

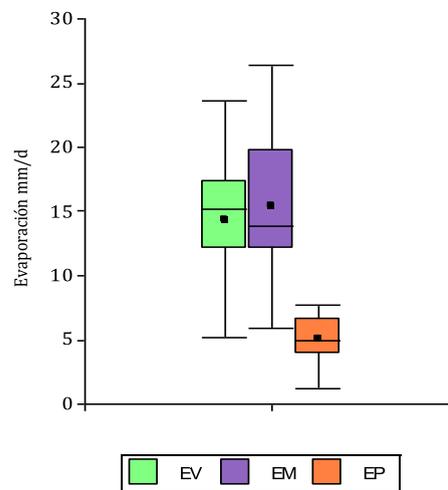
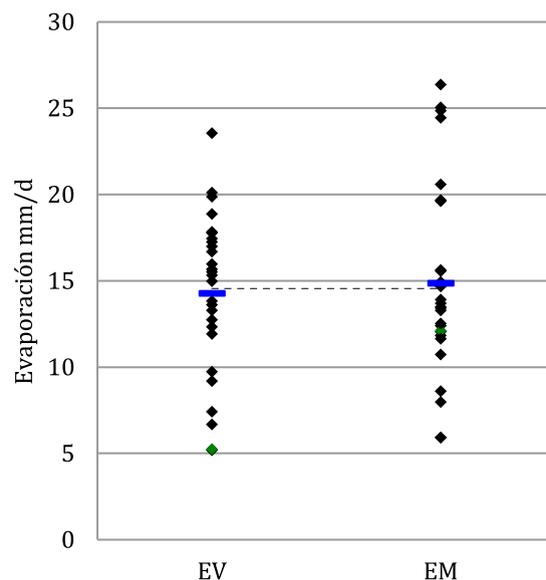


Figura 9. Análisis de variancia para los humedales



En la tabla 1 se presentan los resultados del análisis estadístico del consumo de agua para los dos pastos en litros por metro cuadrado por día, incluyendo el intervalo de confianza con un 95% de confiabilidad, siendo más amplio para el pasto elefante al tener los valores de ET dispersos según el coeficiente de variación y como se aprecia en las figuras 8 y 9.

Tabla 1. Evapotranspiración humedales en l/m²/d (mm/d)

| Pasto | EV | EM |
|-------------------------------|------|------|
| Promedio | 14.3 | 15.4 |
| Mediana | 15.2 | 13.8 |
| Desviación estándar | 4.4 | 5.6 |
| Coefficiente Variación % | 30 | 37 |
| Máximo | 23.6 | 26.4 |
| Mínimo | 5.2 | 5.9 |
| Intervalo de confianza al 95% | | |
| Límite inferior | 12.4 | 12.6 |
| Límite superior | 16.1 | 17.1 |

Los valores obtenidos son similares a los encontrados por (Valencia Quintero, 2014), teniendo presente la diferencia en el tipo de pasto utilizado.

3.3. Crecimiento plantas

Otro elemento evaluado fue el crecimiento diario de las plantas; para identificarlo se medía la altura desde la base hasta el último nudo de cada planta una vez a la semana y se estimaba el crecimiento promedio dividiendo por el número de días entre mediciones. En la Figura 10 se observa el tamaño promedio de las plantas en cada humedal y las líneas de tendencia

Figura 10. Crecimiento plantas

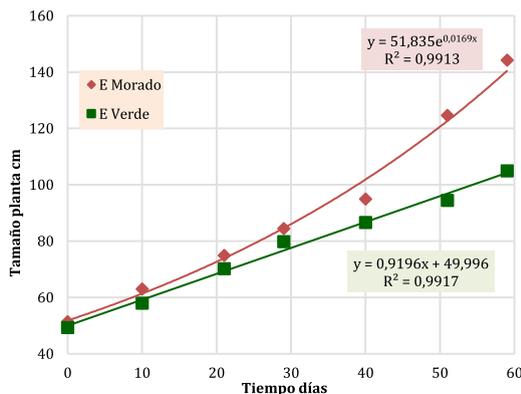
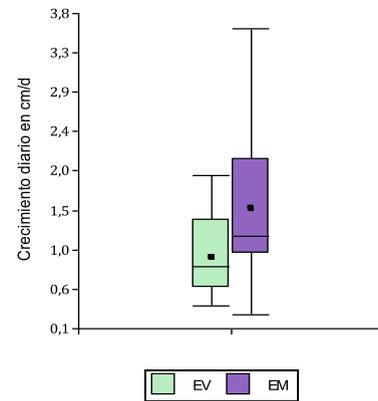


Figura 11. Variación del crecimiento



Hasta el día 30 de mediciones se observa un incremento similar en el tamaño para los dos tipos de pastos, luego se presenta un crecimiento mayor para el caso del pasto EM, con una tendencia exponencial, mientras en el EV se mantiene lineal durante todos los días evaluados.

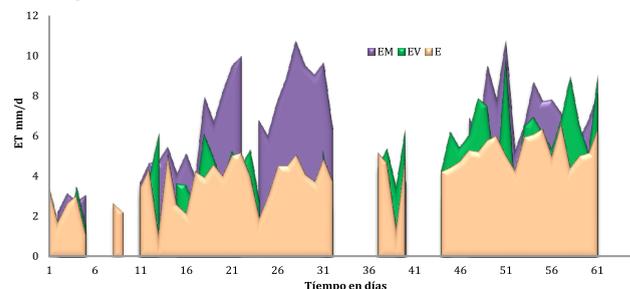
Mediante el diagrama *box plot* y el análisis de varianza mostrados en las figuras 11 y 14 se estableció la diferencia significativa con un *p-value* de 0.0015 entre el crecimiento diario de los dos tipos de pastos, siendo mayor el promedio y la mediana para el EM, como también tiene los datos más dispersos con un coeficiente de variación del 44%, luego son datos heterogéneos por ser el primer crecimiento.

El pasto EM alcanzó una altura promedio de 1.44 m y el EV un tamaño de 1.05 m. Los resultados en el crecimiento generaron diferencia entre el peso total de biomasa con valor de 3.0 N para el EV y 4.6 N en el caso del EM, mostrando con ello la ventaja de utilizar este tipo de paso en los humedales.

El consumo de agua para el pasto elefante morado se estima en 2.1 litros por mes en cada planta y para el elefante verde en 2.0 siendo similares.

En el segundo brote los resultados fueron diferentes como se observa en la Figura 12. Los mayores consumos fueron para el elefante morado, pero se presentó una disminución respecto del primer brote..

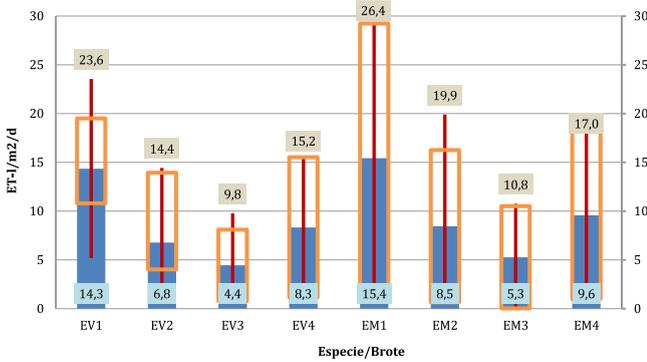
Figura 12. Evapotranspiración y evaporación en el segundo brote



Se aprecia como en los primeros 30 días los mayores consumos corresponden al pasto elefante morado, para la segunda parte los valores son similares, los espacios son por momentos en los cuales los datos no fueron recopilados por estar fuera del sitio de monitoreo.

En la Figura 13 se presentan los resultados de los cuatro brotes evaluados con valores promedio representados en las columnas azules, los máximos y mínimos con las líneas centrales y las desviación estándar en los recuadros naranjas.

Figura 13. Evapotranspiración en los dos humedales en los cuatro brotes



Se aprecia la disminución del consumo de agua residual en los brotes del uno al tres para las dos especies, puede ser por la disminución de los nutrientes necesarios para la planta y la disminución del espacio disponible para expandir las raíces, sin embargo, para el último se incrementó la cantidad de biomasa y también el consumo por la adición de abono líquido con nutrientes.

El pasto elefante verde consumió un promedio de 7.5 ± 6.2 y el pasto elefante morado 8.4 ± 7.5 litros por metro cuadrado día, siendo equivalentes a 226 y 251 litros por metro cuadrado mes respectivamente.

Figura 14. ANOVA Incremento en el tamaño

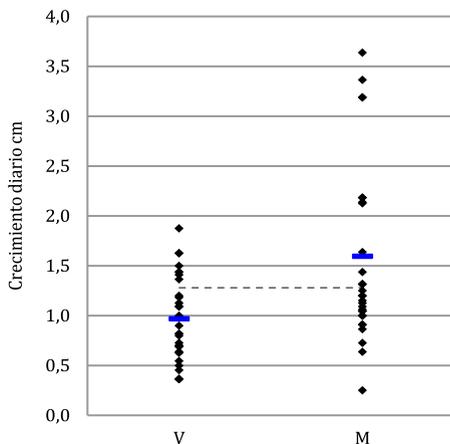
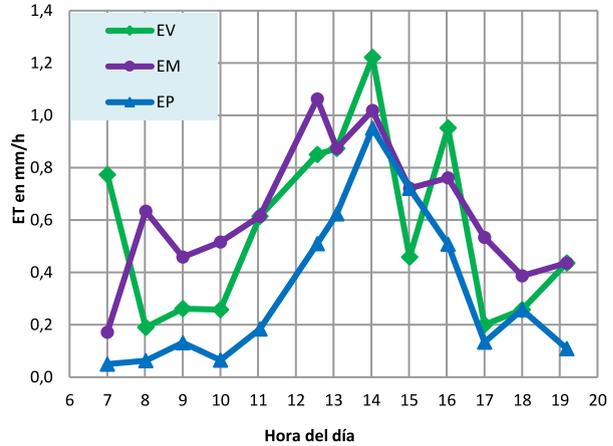
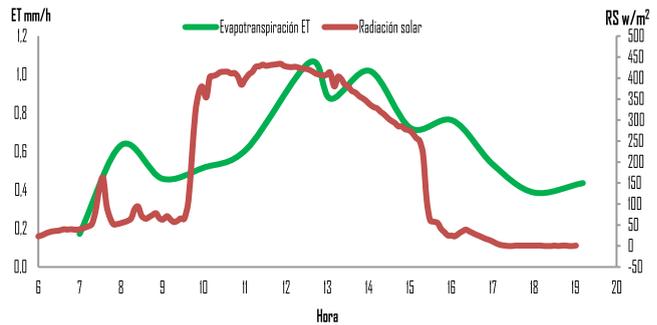


Figura 15. Variación de la evaporación durante el día



En la Figura 15 se aprecia el comportamiento de la evapotranspiración de los dos humedales y la evaporación medida cada hora durante un día desde las 7 am hasta las 7 pm, se observa los mayores valores a las dos de la tarde, con un máximo de 1.2 mm/h para el pasto elefante verde.

Figura 16. Comparación entre evapotranspiración y la radiación solar



Los valores de evaporación horaria del pasto elefante morado se compararon con la radiación solar medida en la Estación Majavita (Isantand27) como se aprecia en la Figura 16, observando la similitud en el comportamiento entre las dos curvas, demostrando lo dicho por (Arias & Brix, 2007), la evapotranspiración es directamente proporcional a la radiación solar, con valores máximos al medio día y mínimos en la mañana y en el atardecer. En los lugares donde se utilice el sistema para tratamiento se deben tener en lo posible mediciones de la radiación solar para poder hacer el diseño de los humedales de ET, de lo contrario, se deberán hacer estimados.

Figura 17. Materia seca producida en los Humedales

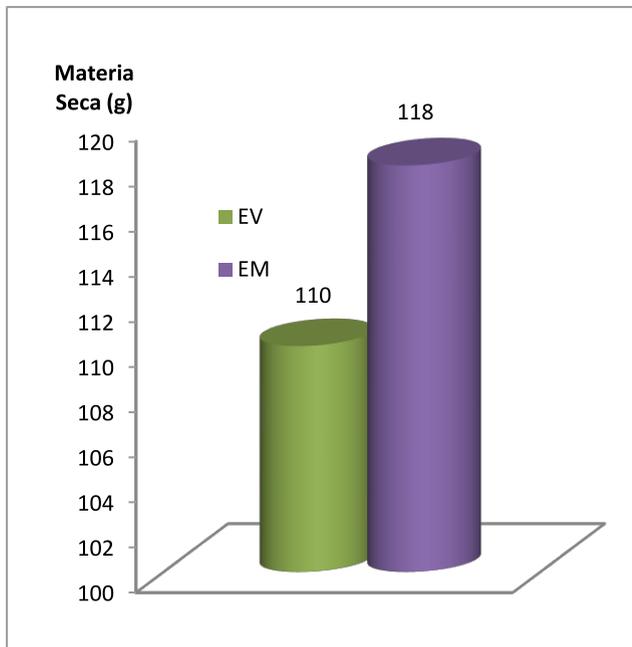
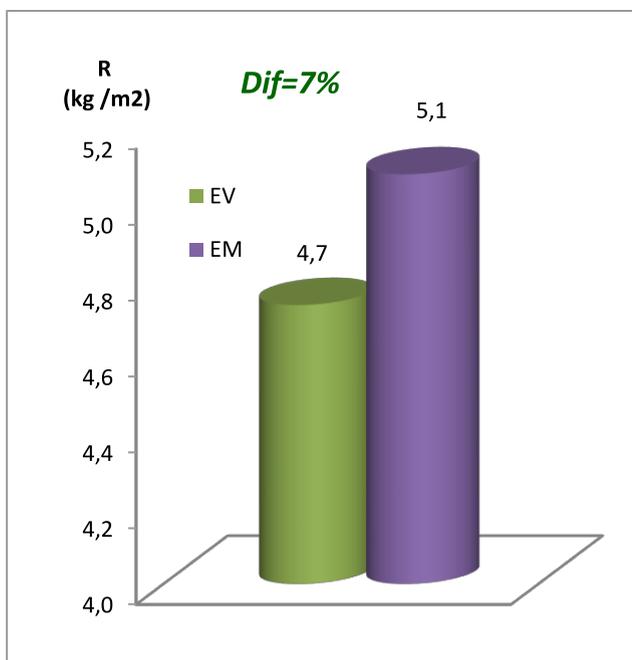


Figura 18. Rendimiento en la producción de biomasa



Respecto a materia seca, el pasto elefante morado produjo 118 gramos con las cinco plantas del humedal siendo un 7% mayor cantidad respecto del elefante verde, obteniendo un rendimiento de 5.1 kg/m² como se observa en las figuras 17 y 18, respectivamente.

3.4. Evaluación de otras especies

El pasto elefante puede ser una alternativa para el tratamiento, no obstante, se deben identificar otras especies con las cuales sea posible implementar los humedales de ET, por ello se evaluaron la caña brava (*Gynerium sagittatum*) y la caña castilla (*Arundo donax*). Esta última, según (Valencia Quintero, 2014) presentó los mayores valores de ET en su evaluación. Las dos especies fueron recolectadas en la quebrada Santa Rosa en el sitio conocido como El Raizado en Simacota Santander. Las dos plantas se han adaptado a las condiciones de humedad en el suelo presentes en dicho lugar.

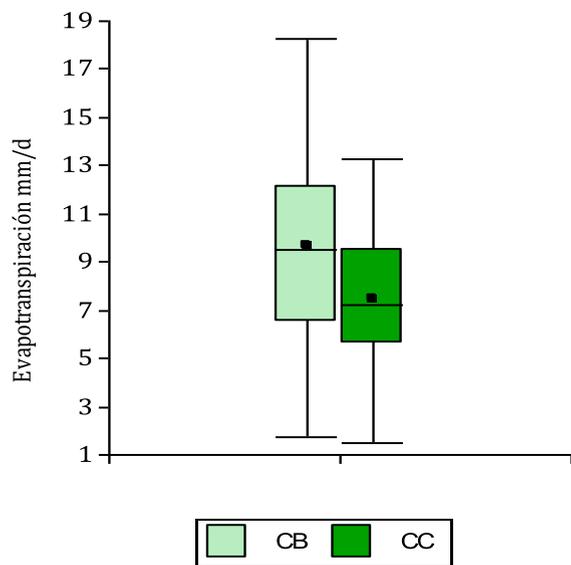
Las plantas fueron propagadas por estaca en los recipientes adaptados como humedales realizando el seguimiento del consumo de agua residual, logrando asimilar las condiciones de saturación en el suelo y a las características del residuo líquido. En la Figura 19 se muestran los humedales ET de caña brava (CB) y de caña castilla (CC) y en la Figura 20 se aprecia el *boxplot* para las dos cañas siendo mayor el consumo de agua para la caña brava, debido a la diferencia en el tamaño de las plantas.

Figura 19. Humedales ET caña brava y caña castilla



Evapotranspiración en humedales con pasto elefante (*Pennisetum purpureum*) como tratamiento de aguas residuales del beneficio del café (escala piloto).

Figura 20. ET en caña brava y caña castilla



El periodo de medición fue de tres meses, en los cuales se obtuvo 51 datos para la caña brava y 48 para la caña castilla, con valores promedios de 8.8 y 7.8 mm/d y desviaciones estándar de 8.8 y 6.9, respectivamente. Las dos especies pueden ser utilizadas para el tratamiento al adaptarse al agua residual.

3.5. Condiciones de diseño

En la hacienda Majavita se producen aproximadamente 50,000 litros de agua residual en la cosecha, el proceso de evaporación se puede dar durante un periodo de diez (10) meses, con el valor promedio de ET de 8.4 mm/d, siendo necesarios 20 m² de humedales, construyendo cuatro unidades de 1.2x4.1 m con pasto elefante con una densidad de siembra de 215 plantas por metro cuadrado, sería posible tratar el agua sin generar vertimiento.

4. CONCLUSIONES

La evapotranspiración de los pastos elefante verde y morado evaluados es similar, no existe diferencia significativa entre los datos, se presenta diferencia entre la ET y evaporación potencial con un promedio de 3.4 veces mayor con un coeficiente de variación del 38%, siendo incrementada por la transpiración de las plantas y la evaporación del agua desde el suelo. Existe diferencia entre los dos pastos en el crecimiento, al presentar mayor tamaño el pasto elefante morado con una diferencia significativa en el crecimiento diario, siendo también mayor la cantidad de biomasa producida.

El consumo promedio de agua por cada planta es similar en los dos casos, al presentar una mayor conversión de consumo de agua a biomasa se identifica el pasto morado con la mayor eficiencia para ser usado en los humedales.

De acuerdo a los resultados, es posible utilizar los humedales de evapotranspiración para el tratamiento de las aguas residuales del café, sacando provecho a la duración de la producción durante un periodo de tres meses en el año, disponiendo de seis o siete meses entre cosechas para tratar el agua y preparar el sistema. Es necesario mantener separados la pulpa y las aguas mieles, para luego mediante el separador hidráulico de mucílago retirar parte de los sólidos y regular el potencial de hidrógeno con cal apagada.

Se deben establecer las relaciones entre producción de biomasa con agua consumida y biomasa respecto de la carga tratada en los humedales. La eficiencia del sistema estará dada por los mayores valores de las relaciones anteriores, para garantizar un uso eficiente del agua se debe disminuir la evaporación limitando el humedal a la transpiración de las plantas. Es necesario suministrar abonos con nutrientes a los humedales para garantizar el crecimiento de los pastos y de esta forma lograr mayores valores de consumo de agua para lograr humedales de menor tamaño.

5. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.

- Arias, C. A., & Brix, H. (2007). Sistemas evaporativos. En: Seminario Internacional Fundamentos y diseño de humedales artificiales para el tratamiento de aguas residuales. Universidad Tecnológica de Pereira, Pereira.
- Brix, H. (2004). Danish guidelines for small-scale constructed wetland systems for onsite treatment of domestic sewage. Proceedings of the 9th International Conference on Wetland Systems for Water Pollution Control, (págs. 1 - 8). Avignon, France.
- Cadena Meneses, E. G., Gutiérrez Argüello, E. J., & Vega Serrano, H. A. (2013). Determinación de la eficiencia del sistema de tratamiento Majavita-Cenicafé para la remoción de carga contaminante de las aguas residuales del beneficio del café con desmicilaginador. Trabajo de grado, Universidad Libre, Ingeniería Ambiental, Socorro.
- Cruz, D. G. (2011). Estimación de la evapotranspiración real (ETR) para la cuenca del río La Antigua, Veracruz: estado actual y ante escenarios de cambio climático. Tesis de Grado, Universidad Veracruzana, Veracruz.
- Díaz Chaparro, S. X., Vesga Buenahora, E. R., & Vega Serrano, H. A. (2013). Identificación del manejo de subproductos del beneficio del café en las fincas localizadas en la parte alta de la microcuenca la sancotea, vereda Alto de Reinas, Socorro-Santander. *El Centauro*(8), 41 - 56.
- Hernández Sampieri, R., Fernández Collado, C., & Baptista Lucio, P. (2006). Metodología de la Investigación (4 ed.). Mc Graw Hill.
- Lavao Pastrana, S. A. (2016). Medición y modelamiento de la evapotranspiración real del cultivo de clavel en invernadero en la sabana de Bogotá. Universidad Nacional de Colombia, Departamento de Ingeniería Civil y Agrícola. Bogotá: Universidad Nacional. Obtenido de <http://www.bdigital.unal.edu.co/52512/1/lavaopastranasergioandres.2016.pdf>
- Marín, V. (2010). Evaluación de la relación entre la evapotranspiración potencial teórica y evaporación registrada en los departamentos de Cundinamarca y Valle del Cauca. doi:<https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004>
- Valencia Quintero, J. (2014). Evaluación de humedales evaporativos para el post tratamiento de aguas residuales domésticas. Maestría en Ecotecnología, Universidad Tecnológica de Pereira, Facultad de Ciencias Ambientales, Pereira.
- Vega Serrano, H. A. (2009). Alternativa de manejo para los subproductos del beneficio ecológico del café MaSBEK. *El Centauro: Expresión Libre Comunera*(2), 7 - 18.

