

EVALUAR LA EFICIENCIA DE UN SISTEMA DE TRATAMIENTO CON
HUMEDALES CONSTRUIDOS DE FLUJO SUBSUPERFICIAL HORIZONTAL
PARA LA DEPURACIÓN DE AGUAS RESIDUALES DEL BENEFICIO HÚMEDO
DEL CAFÉ

PAOLA ANDREA URREA ORDOÑEZ
CLAUDIA VANESA SOLARTE VILLAMARIN
Estudiantes de Ingeniería Ambiental



UNIVERSIDAD DEL CAUCA
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL
PROGRAMA DE INGENIERÍA AMBIENTAL
POPAYÁN-CAUCA
NOVIEMBRE 2016

EVALUAR LA EFICIENCIA DE UN SISTEMA DE TRATAMIENTO CON
HUMEDALES CONSTRUIDOS DE FLUJO SUBSUPERFICIAL HORIZONTAL
PARA LA DEPURACIÓN DE AGUAS RESIDUALES DEL BENEFICIO HÚMEDO
DEL CAFÉ

PAOLA ANDREA URREA ORDOÑEZ

49092151

CLAUDIA VANESA SOLARTE VILLAMARIN

104911010605

Estudiantes de Ingeniería Ambiental

INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO MODALIDAD INVESTIGACIÓN
COMO REQUISITO PARCIAL
PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERAS AMBIENTALES

Director

Ph.D. Juan Carlos Casas

Director Grupo de Investigación GCISA

Universidad del Cauca

Codirectores

Ph.D Carlos Arias

Aarhus University- Dinamarca

Ing. Yina Jiménez

Universidad del Cauca

M. Sc. Ever Sandoval

Federación Nacional de Cafeteros

UNIVERSIDAD DEL CAUCA
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL
PROGRAMA DE INGENIERÍA AMBIENTAL
POPAYÁN-CAUCA
NOVIEMBRE 2016

Nota de aceptación

Director: _____
PhD.Juan Carlos Casas Zapata

Jurado

Jurado

Popayán, _____ Noviembre, 2016

DEDICATORIA

Agradezco a Dios por haberme otorgado una familia maravillosa, quienes han creído en mí siempre, dándome ejemplo de superación, humildad y sacrificio; a mi madre Piedad Villamarin quien siempre me apoyo y me dio fortaleza en los momentos en los que sentía desfallecer, a mi padre Leonardo Solarte por ser mi seguridad y mi protector, quien siempre ha estado ahí para mí. A mi amiga Andrea Urrea por su gran esfuerzo y entrega para poder terminar con éxito este trabajo.

Vanesa Solarte

A mis padres, Fernando y Victoria, por ser el pilar fundamental en todo lo que soy, por su amor y apoyo incondicional. A mi hermano Daniel, por ser mi fuente de motivación e inspiración para alcanzar mis sueños. A Mauricio, por brindarme seguridad en los momentos más difíciles, por su amor y comprensión. A mi amiga Vanesa por su dedicación, paciencia y motivarme a seguir adelante. A Pinky por ser mi dulce compañía.

Andrea Urrea

AGRADECIMIENTOS

A nuestras familias por su apoyo y amor incondicional.

Al Ph. D. Juan Carlos Casas por su valiosa colaboración para la realización de esta investigación.

Al Ph. D. Carlos Arias por compartir su valioso conocimiento y estar siempre atento a resolver nuestras inquietudes.

Al M. Sc. Ever Marino Sandoval por creer en nosotras y por facilitar la ejecución de este trabajo.

A la Ing. Yina Jimenes por ser quien nos apoyó incondicionalmente en todo el transcurso del desarrollo de esta investigación.

Al Ing. Mauricio Iriarte por sus aportes y colaboración en el desarrollo de esta investigación.

A los M. Sc. Edwin Rengifo y Mauricio Aguirre por sus asesorías e interés mostrado en este trabajo.

A nuestros familiares Fernando Ordoñez y Leonardo Solarte por su valiosa colaboración en la etapa de construcción del humedal.

A la familia Pupiales por abrirnos la puerta de su hogar, brindarnos su cariño, y permitirnos desarrollar este proyecto.

Al Comité Departamental de Cafeteros del Cauca por su financiamiento y colaboración en este trabajo.

A todas aquellas personas que contribuyeron de alguna manera al desarrollo de esta investigación

CONTENIDO

	pág.
INTRODUCCIÓN	11
1. ANTECEDENTES	12
2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	13
3. JUSTIFICACIÓN	15
4. OBJETIVOS	17
4.1 OBJETIVO GENERAL	17
4.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	17
5. MARCO REFERENCIAL	18
5.1 PROCESO DEL CAFÉ	18
5.1.1 Generalidades del proceso de beneficiado del café	18
5.2 HUMEDALES CONSTRUIDOS	19
5.2.1 Tipos de humedales construidos	20
5.2.1.1 Componentes de los humedales	20
5.2.2 Mecanismos Básicos de Depuración en un Humedal Artificial	24
5.2.3 Consideraciones en el Diseño de un Humedal	25
5.3 REUSO DE LAS AGUAS RESIDUALES	26
6. METODOLOGÍA	28
6.1 LOCALIZACIÓN	28
6.2 DISEÑO DEL HUMEDAL	30
6.3 CALCULOS PARA EL DISEÑO DEL HUMEDAL CONSTRUIDO	31
6.4 Planta	40
6.5 VARIABLES RESPUESTA	41
6.6 ANALISIS ESTADISTICO	41
7. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	43
7.1 PRESENTACIÓN VALORES VARIABLES FISICO QUÍMICAS	43
7.2 COMPORTAMIENTO DEL pH	44
7.3 EFICIENCIAS DE REMOCION	46

7.3.1 Demanda Bioquímica de Oxígeno	46
7.3.2 Demanda Química de Oxígeno	49
7.3.3 Sólidos Suspendidos Totales	52
7.3.4 Fosfatos.....	55
7.3.5 Nitritos	58
7.4 COMPORTAMIENTO DE LA <i>PHRAGMITES AUSTRALIS</i>	61
7.5 REÚSO	61
8. CONCLUSIONES	64
9. RECOMENDACIONES.....	66
BIBLIOGRAFÍA.....	67
ANEXOS.....	75

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Caracterización de los contaminantes típicos en las aguas residuales del beneficio del café.	19
Tabla 2. Especies emergentes más utilizadas en depuración de aguas residuales.	22
Tabla 3. Mecanismos básicos de remoción.....	24
Tabla 4. Materiales empleados en el diseño y construcción de humedales construidos.....	26
Tabla 5. Cálculos para el dimensionamiento del humedal construido.	33
Tabla 6. Métodos para la determinación de las variables fisicoquímicas.	41
Tabla 7. Variables fisicoquímicas de entrada	43
Tabla 8. Variables fisicoquímicas de salida.....	43
Tabla 9. Datos estadísticos para el pH a la entrada y salida del humedal construido	44
Tabla 10. Datos estadísticos para DBO ₅ a la entrada y salida del humedal construido	46
Tabla 11. Datos estadísticos para DQO a la entrada y salida del humedal construido	49
Tabla 12. Datos estadísticos para SST a la entrada y salida del humedal.....	52
Tabla 13. Datos estadísticos para fosfatos a la entrada y salida del humedal	55
Tabla 14. Datos estadísticos para Nitritos a la entrada y salida del humedal.....	58
Tabla 15. Valores límites máximos permisibles para el reuso del agua	62

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Zona de Estudio	28
Figura 2. Construcción del humedal horizontal	34
Figura 3. Vista en planta y perfil del humedal construido	37
Figura 4. Detalles de construcción del humedal.....	38
Figura 5. Vista en 3D del humedal construido.....	39
Figura 6. Humedal construido de flujo subsuperficial horizontal	39
Figura 7. Aclimatación y siembra de plantas.....	40
Figura 8. Comportamiento del pH en la entrada y la salida del humedal	44
Figura 9. Comportamiento del porcentaje de remoción de DBO ₅	46
Figura 10. Comportamiento DBO ₅ en la entrada y salida del humedal	47
Figura 11. Comportamiento del porcentaje de remoción de DQO	50
Figura 12. Comportamiento DQO en la entrada y salida del humedal	50
Figura 13. Comportamiento del porcentaje de remoción de SST.....	52
Figura 14. Comportamiento SST en la entrada y salida del humedal	53
Figura 15. Evolución de la concentración de materia en suspensión (MES) a lo largo de un humedal de flujo horizontal Adaptada de García y Corzo (2008).....	54
Figura 16. Comportamiento del porcentaje de remoción de Fosfatos.....	55
Figura 17. Comportamiento de Fosfatos en la entrada y salida del humedal	56
Figura 18. Comportamiento del porcentaje de remoción de Nitritos	58
Figura 19. Comportamiento de Nitritos en la entrada y salida del humedal	59
Figura 20. Promedios de porcentaje de remoción de las diferentes variables	60

ÍNDICE DE ANEXOS

Anexo 1. Resultados fisicoquímicos iniciales	75
Anexo 2. Resultados Fisicoquímicos muestra 1.....	76
Anexo 3 Resultados Fisicoquímicos muestra 2.....	77
Anexo 4 Resultados Fisicoquímicos muestra 3.....	78
Anexo 5 Resultados Fisicoquímicos muestra 4.....	79
Anexo 6 Resultados Fisicoquímicos muestra 5.....	80
Anexo 7 Resultados Fisicoquímicos muestra 6.....	81

INTRODUCCIÓN

El cultivo y procesado del café es una de las actividades agroindustriales más importantes en varios países de Latinoamérica; sin embargo, dicha actividad conlleva grandes impactos ambientales, debido a que genera aguas residuales con alta carga contaminante. La peligrosidad ecológica de estos vertidos ha potenciado la búsqueda de alternativas para su tratamiento y disposición final (del Real Olvera *et al.*, 2010).

En Colombia y otros países latinoamericanos, el café arábico se recolecta manualmente, se procesa o beneficia por vía húmeda; por tanto, en los países donde esto ocurre se produce la calidad de café denominado, café suave. En Colombia el proceso de beneficio comienza con la recolección manual de cerezas maduras, característica que genera una calidad de café muy estimada por los consumidores, pero puede llegar a generar una alta contaminación del agua y del ambiente (FNC, 1999). Dicho beneficio requiere el empleo de volúmenes importantes de agua; con los métodos de beneficio tradicional se estima el uso de entre 40 y 60 litros de agua para la obtención de 1 kg de café pergamino seco en las actividades de transporte, despulpado, fermentación, clasificación y lavado, en el caso del beneficio húmedo ecológico la relación disminuye a un litro de agua por kilogramo procesado de café pergamino seco.

En relación con el uso del agua hay dos problemas ambientales. El primero de ellos se relaciona con la planificación de los recursos hidráulicos en las zonas cafeteras, y el segundo con la descarga de las aguas residuales del beneficio a las corrientes de agua, contaminándolas (Salazar, 2008).

El uso de humedales construidos para depurar aguas se ha incrementado durante los últimos veinte años, y actualmente son una opción de tratamiento de aguas residuales reconocida y recomendada. Se ha demostrado que son efectivos en la reducción de la materia orgánica, para transformar, asimilar nutrientes, retener y/o eliminar sustancias tóxicas que de otra manera serían vertidas sin tratamiento alguno al ambiente (Arias, 2003).

Los humedales subsuperficiales de flujo horizontal, son sistemas muy utilizados, el diseño de estos, por lo general consiste en un lecho, ya sea de tierra o arena y grava, plantado con macrófitas acuáticas. Toda el lecho es recubierto por una membrana impermeable para evitar filtraciones en el suelo (Delgadillo *et al.*, 2010).

Teniendo en cuenta la compleja composición de las aguas residuales del café, el bajo nivel de eficiencias de tratamientos convencionales, y el conocimiento limitado en el comportamiento de los humedales construidos para el tratamiento de estas; con el presente trabajo se pretende determinar la eficiencia de un sistema para tratar aguas mieles del café, utilizando un humedal de flujo subsuperficial horizontal como tratamiento secundario.

1. ANTECEDENTES

Históricamente, la primera investigación sobre la posibilidad de tratar aguas residuales en humedales artificiales fue realizada por la doctora Seidel en 1952 en el Instituto Max Planck de Plön, Alemania (Seidel, 1965). El humedal construido específicamente para tratar aguas residuales entró en operación en 1974 en Othofresen (Vymazal et al., 1998), expandiéndose principalmente a partir de esta fecha a escala piloto o real en países Europeos y Estados Unidos (Kadlec, 1999). En la actualidad han sido acogidos en regiones de Latinoamérica, África y Asia (Mosquera y Lara, 2012).

Los humedales han sido utilizados principalmente para el tratamiento de aguas residuales domésticas. No obstante, en la actualidad sus usos son variables, depuración de drenaje de minas, los tratamientos de escorrentía pluvial, urbana y agrícola, el tratamiento de lodos y lixiviados de rellenos sanitarios (Yalcuk y Ugurlu, 2009).

Varios métodos, particularmente anaeróbicos, se han propuesto para el tratamiento de las aguas residuales del café. Sin embargo, los estudios sobre el tratamiento de estas son escasos (Selvamurugan *et al.*, 2010) y en general el efluente resultante no cumple con los requisitos ambientales para la descarga en cuerpos de agua. Recientemente, los humedales construidos han sido propuestos para el tratamiento de las aguas residuales del café y para el post-tratamiento de efluentes (Fia *et al.*, 2010).

Según estudios realizados por Caselles *et al.* (2007) la presencia de plantas en un humedal construido de flujo subsuperficial horizontal, tiene un impacto significativo en la eficiencia de remoción de DQO, debido al transporte convectivo de oxígeno, o indirectamente por la evapotranspiración, lo que aumentará las fluctuaciones en los niveles del agua, y por lo tanto la creación de un ambiente más aeróbico.

Varias especies de plantas, especialmente aquellas adaptadas naturalmente a inundaciones, se han utilizado en humedales construidos (Delgadillo *et al.*, 2010),

incluyendo espadaña (*T. latifolia*), caña. (*Phragmites australis Trin ex Steudel*), juncos. (*Juncus effusus*) y *Alternanthera*. (*Phloxeroides Alternanthera*). Sin embargo, la baja eficiencia de algunas de estas plantas en el tratamiento de las aguas residuales del café y la estacionalidad de recolección y procesamiento de frutos del café ha dado lugar a la evaluación de los pastos de invierno, incluyendo raigrás. (*Lolium multiflorum*) y *avena negro*. (*Avena strigosa*) (Fia *et al.*, 2010).

Los Humedales construidos de flujo sub-superficial y superficial, constituyen la principal aplicación tecnológica para la matriz agua, basada en un tipo de plantas cuyas características principales son la hiperacumulación de sustancias tóxicas, y transformación de dichos compuestos gracias a sus propiedades biológicas. Recientemente, se han estudiado el empleo de especies nativas como el caso de las Heliconias y otras especies no nativas como el papiro enano. Los estudios realizados con *Heliconia psittacorum* y *Cyperus papyrus* para evaluar su potencial fitorremediador han logrado demostrar que estas especies presentan características adecuadas a las condiciones en los humedales construidos para el tratamiento de aguas residuales, a partir de su capacidad de eliminación de DBO₅, DQO y SST, por encima del 70 % de remoción sin detrimento de sus propiedades fisiológicas (Salamanca *et al.*, 2013).

2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

La descarga directa y sin ningún tipo de tratamiento a las fuentes hídricas se ha convertido en una de las actuales problemáticas ambientales más críticas y crecientes en Colombia, en la actualidad las aguas residuales no tratadas y dispuestas de manera inadecuada son responsables del 80% de la mortalidad en los países en vía de desarrollo, esta situación se encuentra estrechamente relacionada con las bajas coberturas en el sistema de alcantarillado y el inadecuado tratamiento y disposición final de las aguas residuales, teniendo en cuenta que en el país la infraestructura disponible en materia de tratamiento de aguas residuales tiene únicamente un cubrimiento efectivo del 8% de la población (Ministerio del Medio Ambiente, 2002).

La industria del café es una de las principales fuentes de contaminación de los países latinoamericanos, por medio de los beneficios de café, y a menor escala de las fábricas de café soluble. En los beneficios de café se implementan sistemas nuevos para reducir los consumos de agua y en consecuencia una disminución en la generación de aguas residuales, las cuales tienen una concentración superior a 2.000 ppm de DQO, y en algunos casos se produce una miel semipastosa (García, 2002).

En Colombia, el proceso de beneficio del café se realiza tradicionalmente por vía húmeda, siendo éste uno de los factores a los cuales se debe la excelente calidad del café. No obstante, en este proceso, se consumen grandes volúmenes de agua limpia y se contaminan cantidades equivalentes. De acuerdo con el manual del cafetero colombiano, en las labores de lavado y clasificación se consumen 20 litros de agua limpia por kilogramo de café pergamino seco y un volumen igual en el proceso de despulpado y transporte hidráulico de la pulpa y del café en baba. (Zuluaga *et al*, 1993).

Las aguas mieles (aguas residuales del café) que se producen durante el proceso de beneficio húmedo del fruto del café, son biodegradables, aunque poseen características fisicoquímicas particularmente agresivas con el ambiente: pH bajos y concentraciones de materia orgánica elevadas, correspondientes a contaminantes 60 veces superiores a las aguas residuales domésticas (Zambrano y Rodríguez, 2008).

El primer contaminante, es el agua de despulpado en el beneficiado húmedo convencional y según investigaciones se ha estimado que contaminan 16000 mg/L de Demanda Química de Oxígeno (DQO) y 10000 mg/L de Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO₅) por kilogramo de café. El segundo contaminante es el agua de lavado de las mieles que rodean la semilla del café, operación previa al secado; las aguas de lavado aportan 17000 mg/L de DQO y 12000 mg/L de DBO₅ por kilogramo de café. El tercer contaminante es el vertido de la pulpa o de fracciones de ellas a las fuentes de agua (Martínez, 2014).

Las investigaciones desarrolladas por Cenicafé (Centro Nacional de Investigaciones del Café) han permitido calcular que la pulpa y el mucílago, cuando no son utilizados en forma adecuada, representan el 72% y el 28%, respectivamente, del problema de contaminación generado en el proceso de beneficio húmedo del café, lo que indica que la contaminación generada por cada kilogramo de fruto beneficiado equivale a la generada en aguas negras por un habitante en el día. (FNC, 2011).

El Departamento del Cauca tiene 32 municipios cafeteros que por sus condiciones ambientales y de suelos de origen volcánico, producen café con características especiales de sabor, aroma, cuerpo y tamaño. El porcentaje de participación en la producción nacional es del 7% representado en 7.800.000 kg/ año de café pergamino seco, razón por la cual el café toma gran importancia en el desempeño agrícola del departamento (FNC, 2007), no obstante, la contaminación generada

por la actividad cafetera es una preocupación que lleva a la búsqueda continua de soluciones viables y eficientes para este problema.

3. JUSTIFICACIÓN

El incremento en la generación de aguas residuales ha obligado a la ingeniería a buscar, encontrar y aplicar alternativas de tratamiento de depuración eficiente, autónomo y económicamente viable. Entre las soluciones más atractivas se encuentran los tratamientos que emulan los fenómenos que ocurren espontáneamente en la naturaleza. Estos sistemas se denominan tratamientos naturales de aguas residuales y cada día es más frecuente el uso de estos, debido a que producen efluentes de buena calidad, al mismo tiempo que presentan bajos costos de inversión, operación y mantenimiento y no requieren personal altamente capacitado (Arias, 2003).

En la búsqueda de nuevas tecnologías para intentar solventar este problema se tiene cada vez más en cuenta la sostenibilidad con el ambiente. Entre estas tecnologías, los humedales construidos se postulan como sistemas secundarios, y en muchos casos terciarios, para la depuración de aguas residuales. Estos sistemas emulan los procesos de depuración de aguas llevados a cabo por la naturaleza y son capaces de producir efluentes aptos para ser vertidos o reutilizados (Martínez, 2014).

Las aguas residuales del procesamiento de café son altamente variables, dependiendo de las características de las frutas procesadas, y el tipo de procesamiento aplicado. Las aguas residuales del café son ricas en materia orgánica (DBO_5) y nutrientes (como el nitrógeno y el fósforo) y valores bajos de pH. Debido a estas características, al aplicar los tratamientos biológicos, la adición de nutrientes y la corrección del pH es necesario para garantizar una mayor eficiencia de degradación de la materia orgánica (Fia *et al.*, 2007).

En la temática de tratamiento de las aguas residuales del café, Cenicafé ha desarrollado los Sistemas Modulares de Tratamiento Anaerobio (SMTA), que permiten cumplir con lo dispuesto en el Decreto 1594 de 1984. Los SMTA se construyen utilizando tanques de polietileno como reactores, y trozos de botellas plásticas no retornables de polietilentereftalato (PET), como medio de soporte de microorganismos (FNC, 2011). Sin embargo dichos sistemas presentan desventajas en cuanto a su operación y mantenimiento, lo que conlleva a la búsqueda de nuevas alternativas para el tratamiento de aguas residuales del café.

El departamento del Cauca tiene gran potencial para producir café de alta calidad. Cuenta con una oferta ambiental inmejorable que sumada al compromiso por la actividad de más de 87 mil familias cafeteras que cultivan cerca de 74 mil hectáreas de café, garantiza un importante aporte al desarrollo económico del departamento y la industria nacional (FNC, 2011), sin embargo es importante mencionar que el Cauca a pesar de ser el cuarto departamento a nivel Nacional de producción de café, no es ajeno a la problemática generada por las aguas residuales del café, debido a que el acceso a sistemas convencionales para el tratamiento de estas es limitado, por tal motivo se hace necesario el desarrollo de sistemas no convencionales y sostenibles con el ambiente.

4. OBJETIVOS

4.1 OBJETIVO GENERAL

Evaluar la eficiencia de un humedal construido de flujo subsuperficial horizontal, en términos de remoción de materia orgánica y nutrientes, para el tratamiento de las aguas residuales del café.

4.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Determinar y evaluar los parámetros fisicoquímicos a la entrada y salida del humedal construido de flujo subsuperficial horizontal como tratamiento para las aguas residuales del café.
- Evaluar el comportamiento y adaptabilidad de *Phragmites australis* en el humedal construido.
- Estudiar el efluente proveniente del sistema de tratamiento para reutilizarlo como agua de riego en cultivos.

5. MARCO REFERENCIAL

5.1 PROCESO DEL CAFÉ

5.1.1 Generalidades del proceso de beneficiado del café

El procesado del café puede realizarse a través de dos rutas, por un lado está el procesado húmedo, y por el otro el procesado húmedo ecológico; para este caso, se consumen aproximadamente 1 litro de agua por kilogramo de café (del Real Olvera *et al.*, 2009). Las etapas involucradas en el proceso húmedo son: recolección, lavado, selección, despulpado y secado del café. Aquí, el lavado y despulpado son las operaciones unitarias que mayor cantidad de agua emplean, siendo el despulpado la fase que introduce una considerable cantidad de compuestos orgánicos al vertido (Islas, 2008).

- **Beneficiado húmedo**

EL beneficiado húmedo es más costoso y requiere más instalaciones, equipos, maquinaria y conocimientos que el método seco; pero el producto que se obtiene por este método es de alta calidad. Su principal requerimiento es un abundante abastecimiento de agua y de preferencia el beneficio se instala en un nivel tan bajo como sea conveniente a fin de eliminar el costo del bombeo del agua.

Aproximadamente un 30% del agua utilizada en un día se emplea en despulpar el fruto y en transportarlo, el 70% restante se emplea en el lavado del café fermentado (agua de lavado), y resulta cargado de las sustancias provenientes de la degradación de la pectina, principalmente el mucílago.

Las etapas del beneficiado húmedo de café son:

- a) Despulpe
- b) Fermentación o desmucilaginado
- c) Secado
- d) Trilla
- e) Clasificación
- f) Escogida
- g) Agua residual del café (aguas mieles)

(Molina y Villatoro 2006)

- **Beneficio húmedo ecológico**

El beneficio ecológico del café, por vía húmeda, consta de varias etapas para transformar la cereza del café en café pergamino seco, obteniendo la misma calidad de café, pero utilizando mínimas cantidades de agua, y aprovechando los subproductos (miel y pulpa) para evitar la contaminación de las aguas. En las etapas que se puede suprimir o reducir el gasto de agua son:

- En el recibo de las cerezas, utilizando tolvas secas, o recirculando aguas en el caso de tolvas húmedas.
- El despulpado sin agua.
- Transporte del café en baba, por gravedad o por tornillo sinfín desde la despulpadora hasta la zaranda o desmucilagador.
- En el transporte de la pulpa, ya sea por gravedad o mecánicamente.
- Clasificado del café en baba o en seco (CENICAFÉ, 2009).

Tabla 1. Caracterización de los contaminantes típicos en las aguas residuales del beneficio del café.

PARAMETRO DETERMINADO	AGUA DE DESPULPE DEL PROCESO	AGUA DE LAVADO DE FERMENTACIÓN	AGUA DE LAVADO MECÁNICAMENTE
DQO mg/L	12410-16200	8100-13200	15200-21100
DBO ₅ mg/L	3450-9420	5300-7100	9520-12100
Sólidos Totales mg/L	6200-8600	4100-5200	7920-10300
Sólidos Volátiles	4620-6050	2980-4050	5300-7610
N_NH ₃ mg/L	14-20	11-17	18-27
Fosforo Total mg/L	20-25	13-19	21-30
Fenoles mg/L	18-55	ND	ND
pH	3,5-4,5	4,2-5,0	4,1-4,7

Fuente: Instituto Superior de Ciencia y Tecnología de La Habana, 2008.

5.2 HUMEDALES CONSTRUIDOS

Los humedales construidos se pueden definir como sistemas biológicos confinados mediante algún tipo de impermeabilización, que surgen a partir de la simulación de los mecanismos propios de los humedales naturales, donde se combinan procesos físicos, químicos y biológicos que ocurren al interactuar las aguas con el suelo, las plantas, los microorganismos y la atmósfera, dando lugar a la aparición de procesos de sedimentación, filtración, adsorción, degradación

biológica, fotosíntesis, fotooxidación y toma de nutrientes por parte de la vegetación y que tienen las siguientes características:

Se basan en tratamientos físicos, químicos y biológicos naturales, que no requieren aporte extra de reactivos químicos.

En lo que respecta a su funcionamiento como tratamiento biológico, se opera en condiciones anaerobias, facultativas y/o aerobias en las que el oxígeno se aporta de forma espontánea por transporte desde la atmósfera, lo que representa un ahorro importante de energía por prescindir de aireación con procedimientos mecánicos (Mena, 2006).

5.2.1 Tipos de humedales construidos

Los sistemas de humedales construidos se describen típicamente por la posición de la superficie del agua y/o el tipo de vegetación presente (EPA, 2000). De esta manera se han clasificado como humedales de flujo superficial o flujo libre y humedales de flujo subsuperficial, que a su vez se dividen en humedales horizontales y verticales.

Los humedales construidos se construyen como canales estrechos e impermeables de gran longitud, con lechos poco profundos, baja velocidad de desplazamiento de la masa de agua y bajo el régimen de flujo de pistón. El agua fluye con la lámina de agua por encima del lecho y entre los tallos de las especies emergentes. En los humedales de flujo subsuperficial, se construyen lechos filtrantes a través de los cuales se hace pasar el agua residual sin que la altura de la lámina de agua sobrepase la superficie del material de relleno. La profundidad del lecho es función de la penetración de las raíces y generalmente varía entre 30 y 90 cms, dependiendo del tipo del flujo del humedal (Sanabria, 2006).

5.2.1.1 Componentes de los humedales

Plantas

El papel de la vegetación en los humedales está determinado fundamentalmente por las raíces y rizomas enterrados. Las plantas son organismos fotoautótrofos, es decir que recogen energía solar para transformar el carbono inorgánico en carbono orgánico. Tienen la habilidad de transferir oxígeno desde la atmósfera a través de hojas y tallos hasta las raíces. Este oxígeno crea regiones aerobias donde los microorganismos utilizan el oxígeno disponible para producir diversas reacciones de degradación de materia orgánica y nitrificación (Arias, 2004).

De acuerdo a Lara (1999), las plantas emergentes contribuyen al tratamiento del agua residual y escorrentía de varias maneras:

- Estabilizan el sustrato y limitan la canalización del flujo.
- Dan lugar a velocidades de agua bajas y permiten que los materiales suspendidos se depositen.
- Toman el carbono, nutrientes y elementos traza y los incorporan a los tejidos de la planta.
- Transfieren gases entre la atmósfera y los sedimentos.
- El escape de oxígeno desde las estructuras subsuperficiales de las plantas, oxigena otros espacios dentro del sustrato.
- El tallo y los sistemas de la raíz dan lugar a sitios para la fijación de microorganismos.

Vegetación estudiada

Phragmites australis

Phragmites australis (Carrizo) es una planta acuática perteneciente a la familia de las gramíneas (Poaceae), cuyas características morfológicas recuerdan a la caña común *Arundo donax*, que es una planta terrestre muy conocida. La diferencia más notable entre ambas es la de la condición de planta acuática helófito del carrizo. El carrizo crece en zonas inundadas con el sistema radicular arraigado en fango o fondo del humedal, y desarrolla una estructura vegetativa emergente por encima de la lámina de agua. Según algunos autores el carrizo es la especie vegetal de mayor distribución conocida a nivel mundial de entre todas las plantas superiores. Se encuentra en todos los continentes, excepto en la Antártida, siendo muy común en cursos de agua, ya sea como acuática o como marginal, formando típicamente cinturones continuos a lo largo del cauce; también es muy corriente en humedales, marismas, y otros espacios inundados, pudiendo vivir en medios muy alterados, tanto alcalinos como ácidos.

Es una planta herbácea perenne, rígida, robusta, que puede alcanzar más de 3 m de altura, de hábito es similar al de la caña común y los bambús. En la parte subterránea de la planta se desarrollan rizomas leñosos, escamosos y nudosos, y largos estolones. El tallo aéreo del carrizo es generalmente simple, y como en todas las gramíneas, está formado por una sucesión de nudos y entrenudos

perfectamente diferenciados que conforman la ‘caña’ de la planta. Sin embargo, estos nudos no son visibles ya que están cubiertos por las vainas de las hojas (Fernández, 2003).

Los sistemas que utilizan carrizo pueden ser más eficaces en la transferencia de oxígeno porque los rizomas penetran verticalmente y más profundamente que otras especies. Son muy usados para humedales artificiales porque presentan la ventaja de que tienen un bajo valor alimenticio y, por tanto, no se ven atacadas por animales como otros tipos de plantas. Adicionalmente la resistencia de la planta a rangos de pH bajos (característica de las aguas residuales del café), constituye el criterio principal para la selección de la vegetación de estudio (Lara, 1999).

Tabla 2. Especies emergentes más utilizadas en depuración de aguas residuales.

Especies emergentes más utilizadas en depuración de aguas residuales						
Familia	Nombre latino	Nombres comunes más usuales	Temperatura Deseable Germinación de la semilla		Máxima salinidad tolerable, ppt	Rango efectivo de pH
Ciperáceas	<i>Carex sp.</i>	Junco de la laguna	14-32		20	5-7,5
	<i>Eleocharis sp.</i> <i>Sárpus lacustris L.</i> (*)		18-27			4-9
Gramineas	<i>Glyceria fiuitans (L.)</i>	Hierba del mana.	12-23	10-30	45	2-8
	<i>R. Br. Phragmites australis (cav) Trin. Ex. Esteudel (*)</i>	Carrizo				
Iridáceas	<i>Iris pseudacorus L.</i>	Lirio amarillo, espadaña fina				
Juncáceas	<i>Juncos sp.</i>	Juncos	16-26		20	5-7,5
Tifáceas	<i>Thypha sp.</i> (*)	Eneas Aneas espadañas	10-30	12-24	30	4-10

Fuente: Lara (1999).

Lecho filtrante

En los humedales, el sustrato está formado por: arena, grava, roca, sedimentos y restos de vegetación que se acumulan en el humedal debido al crecimiento biológico.

La principal característica del medio es que debe tener la conductividad hidráulica suficiente para permitir el paso del agua a través de él. Esto obliga a utilizar suelos de tipo granular. Principalmente grava seleccionada con un diámetro de 5 mm aproximadamente.

El sustrato, sedimentos y los restos de vegetación en los humedales artificiales son importantes por varias razones:

- Soportan a muchos de los organismos en el humedal.
- La permeabilidad del sustrato afecta el movimiento del agua a través del humedal.
- Muchas transformaciones químicas y biológicas (sobre todo microbianas) tienen lugar dentro del sustrato.
- Proporciona almacenamiento para muchos contaminantes.
- La acumulación de restos de vegetación aumenta la cantidad de materia orgánica en el humedal. La materia orgánica da lugar al intercambio de materia, fijación de microorganismos y es una fuente de carbono que es a la vez, la fuente de energía para algunas de las más importantes reacciones biológicas en el humedal (Lara, 1999).

Microorganismos

Los microorganismos se encargan de realizar el tratamiento biológico. En la zona superior del humedal, donde predomina el oxígeno liberado por las raíces de las plantas y el oxígeno proveniente de la atmósfera, se desarrollan colonias de microorganismos aerobios. Los principales procesos que llevan a cabo los microorganismos son la degradación de la materia orgánica, la eliminación de nutrientes y elementos traza y la desinfección (Arias, 2004).

Los principales microorganismos presentes en la biopelícula de los humedales son: bacterias, levaduras, hongos y protozoarios. La biomasa microbiana consume gran parte del carbono y muchos nutrientes. La actividad microbiana tiene la función de transformar un gran número de sustancias orgánicas e inorgánicas en sustancias inocuas e insolubles y alterar las condiciones de potencial de reducción y oxidación del sustrato afectando así a la capacidad del proceso del humedal. Así mismo, gracias a la actividad biológica, muchas de las sustancias contaminantes se convierten en gases que son liberados a la atmósfera (Lara, 1999).

5.2.2 Mecanismos básicos de depuración en un humedal construido

Los humedales pueden tratar con efectividad altos niveles de Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO₅), Sólidos Suspendidos (SS), y nitrógeno, así como niveles significativos de metales, compuestos orgánicos traza y patógenos. La eliminación de fósforo es mínima debido a las limitadas oportunidades de contacto del agua residual con el suelo. Los mecanismos básicos de tratamiento son tamizaje, sedimentación, precipitación química, adsorción y degradación microbiana de la DBO₅ y del nitrógeno, así como la captación por parte de la vegetación. Si no se practica la poda, se encuentra una fracción de la vegetación que se descompone y que permanece como materia orgánica refractaria, que termina formando turba en el humedal (Mena, 2006).

En la tabla 3, se presentan los principales procesos que se llevan a cabo en un humedal y que permiten la depuración del agua residual.

Tabla 3. Mecanismos básicos de remoción.

CONTAMINANTES	MECANISMOS DE ELIMINACIÓN
Sólidos suspendidos	<ul style="list-style-type: none"> ● Sedimentación ● Filtración
Materia Orgánica	<ul style="list-style-type: none"> ● Degradación microbiana aerobia ● Degradación microbiana anaerobia
Nitrógeno	<ul style="list-style-type: none"> ● Amonificación seguido por nitrificación microbiana y desnitrificación
Fósforo	<ul style="list-style-type: none"> ● Adsorción por parte del lecho ● Asimilación por parte de las plantas
Metales	<ul style="list-style-type: none"> ● Asimilación por parte de las plantas ● Intercambio Iónico

CONTAMINANTES	MECANISMOS DE ELIMINACIÓN
Patógenos	<ul style="list-style-type: none"> ● Sedimentación ● Filtración ● Muerte natural ● Irradiación ultravioleta

Fuente: Mena, 2006

5.2.3 Consideraciones en el Diseño de un Humedal

Las principales características que se debe tener en cuenta para la localización y diseño preliminar del proyecto de sistemas de humedales construidos incluyen la calidad del agua a tratar, la topografía, la ubicación geográfica, el suelo, el uso actual de los terrenos y la selección de la especie. (Metcalf y Eddy, 1996).

Topografía

Se debe procurar que la topografía para la instalación de un sistema de humedales construidos sea uniforme horizontal o en ligera pendiente. Ello se debe a que los sistemas de flujo subsuperficial se suelen diseñar y construir con pendientes del 1% e inferiores al 5% (Metcalf y Eddy, 1996).

Suelo

Un aspecto importante de los procesos que tienen lugar en la rizósfera es la interacción entre las raíces y la matriz del suelo. El suelo es el principal material de apoyo para el crecimiento de las plantas y las películas microbianas. Además es importante destacar que la matriz del suelo tiene una influencia decisiva en los procesos hidráulicos (Stottmeister *et al.*, 2003)

Selección de la especie vegetal

Es de vital importancia establecer la vegetación con la densidad apropiada. Lo ideal es utilizar plantas locales que estén adaptadas a las condiciones del sitio. Aunque la siembra se puede hacer a partir de semillas, este método requiere bastante tiempo y control estricto del agua (Lara, 1999).

Porosidad y Conductividad Hidráulica

La obstrucción en los humedales puede estar acompañada por una disminución en el rendimiento del tratamiento o el mal funcionamiento hidráulico presentándose unas especies de charcos de agua residual en la superficie del sistema las cuales no son tratadas. La Obstrucción avanzada puede llegar a

interrumpir los medios de comunicación para que se lleven a cabo los procesos adecuados en la depuración de las aguas residuales, lo que limita la vida útil del sistema (Caselles *et al.*, 2007)

Tabla 4. Materiales empleados en el diseño y construcción de humedales construidos.

Tipo de medio	Tamaño efectivo D ₁₀ (mm)*	Porosidad, n (%)	Conductividad hidráulica, k _s (pie ³ /pie ² /d)*
Arena gruesa	2	28 a 32	300 a 3,000
Arena con grava	8	30 a 35	1,600 a 16,000
Grava fina	16	35 a 38	3,000 a 32,000
Grava mediana	32	36 a 40	32,000 a 160,000
Roca triturada	128	38 a 45	16 x 10 ⁴ a 82 x 10 ⁴

Fuente EPA, 2010

5.3 REUSO DE LAS AGUAS RESIDUALES

El reúso de aguas residuales está definido como su aprovechamiento en actividades diferentes a las cuales fueron originadas (Ministerio del Medio Ambiente, 2001). Los tipos y aplicaciones se clasifican de acuerdo con el sector o infraestructura que recibe el beneficio, siendo los principales: el urbano, que incluye irrigación de parques públicos, campos de atletismo, áreas residenciales y campos de golf; el industrial, en el que ha sido muy empleado durante los últimos años, especialmente en los sistemas de refrigeración de las industrias, y el agrícola, en la irrigación de cultivos. Este último es el principal uso (Gutiérrez, 2003).

La agricultura requiere mayor cantidad de agua que otros usos como el doméstico o el industrial; sin embargo, para el uso de aguas residuales debe considerarse aspectos de calidad con el fin de evitar riesgos a la salud pública, principalmente en lo que se refiere a sus características microbiológicas. Ésta es considerada la principal razón para el establecimiento de guías y regulaciones para el reúso seguro de estas aguas en diferentes aplicaciones (Metcalf y Eddy, 2003).

A nivel mundial y nacional existen experiencias del reúso agrícola que muestran las bondades de esta aplicación y las consideraciones sobre el tipo o nivel de tratamiento aplicado al agua residual antes del reúso. En América Latina, sin embargo, un aspecto negativo del reúso agrícola de las aguas residuales, en

especial de las aguas residuales sin tratar, es que está muy poco documentado (Cepis, 2003).

Las principales guías que regulan el reúso del agua, son las directrices de la Organización Mundial de la Salud (OMS), sobre calidad microbiológica de aguas residuales para irrigación, clasificadas en tres categorías, según sus niveles de parásitos y coliformes fecales, indicadores de la presencia de patógenos (virus, bacterias, protozoos y helmintos) en las aguas residuales domésticas y las físico-químicas para calidad de las aguas de riego.

Los criterios de calidad para la irrigación con aguas residuales en la agricultura dependen también del tipo de cultivo: cuando el reúso agrícola se realiza en cultivos que se consumen crudos y no se procesan comercialmente, como es el caso de las hortalizas frescas, el riego es restringido; cuando se aplica en cultivos que se consumen y se procesan comercialmente, como es el caso del tomate enlatado, y en cultivos que no se consumen por el hombre, como pastos, el riego no es restringido (Silva *et al.*, 2008)

En Colombia, la resolución 1207 de 2014 del ministerio de ambiente y desarrollo sostenible regula el uso de aguas residuales tratadas, considerando: “Que el reúso de agua residual constituye una solución ambientalmente amigable, capaz de reducir los impactos negativos asociados con la extracción y descarga a cuerpos de agua naturales” (ministerio de ambiente y desarrollo sostenible, 2014).

6. METODOLOGÍA

6.1 LOCALIZACIÓN

Esta investigación se llevó a cabo en la finca El Pomorroso, la cual se encuentra ubicada en la vereda El Carmen, del Municipio de Sotará-Cauca, donde se presenta una temperatura anual promedio de 15°C.

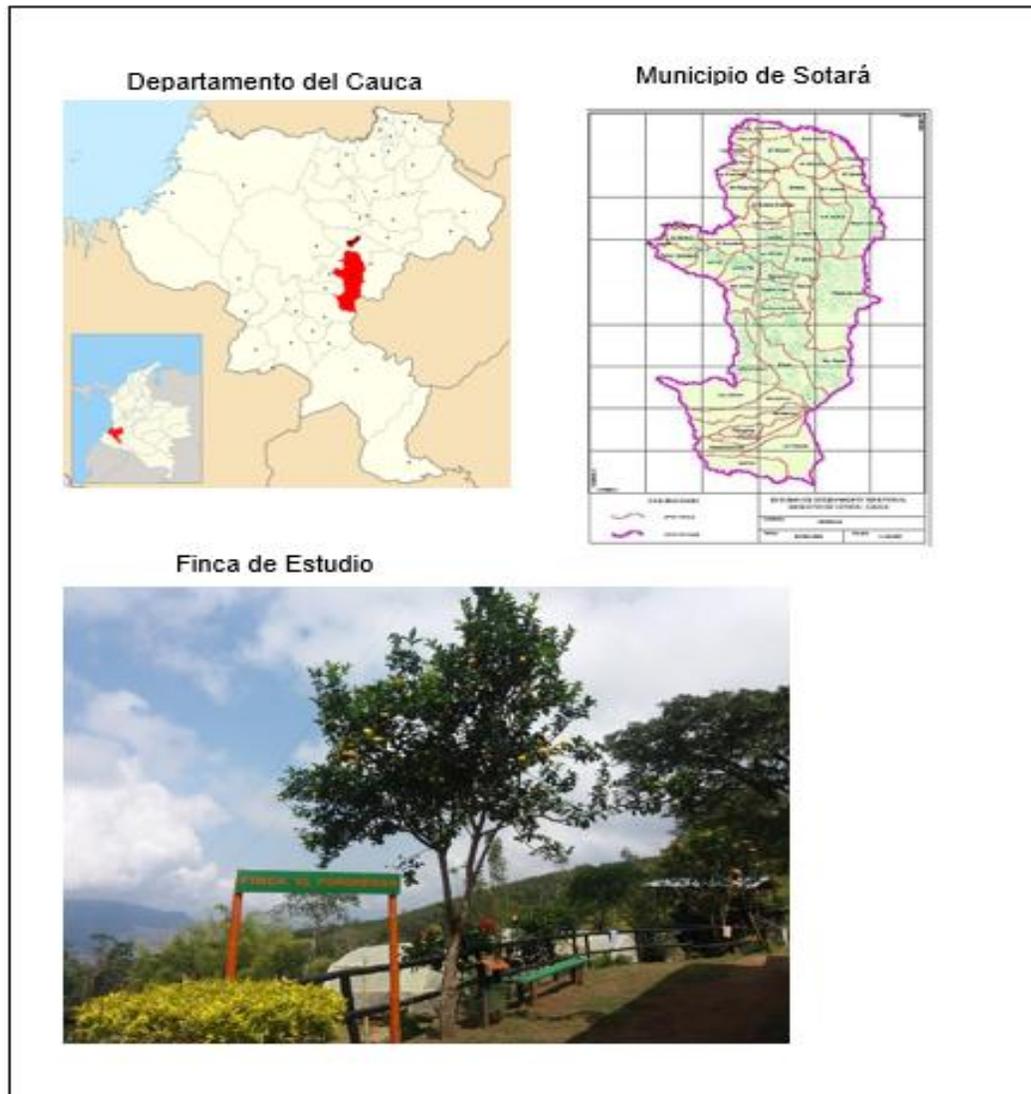


Figura 1. Zona de Estudio

La Finca el Pomorroso ubicada en la vereda El Carmen, es una finca familiar dedicada desde hace varios años a la actividad cafetera, donde cuentan con aproximadamente 4000 árboles de café, en esta finca tienen un procesador de pulpa, el cual cuenta con un tanque tina y fosas de almacenamiento techadas (beneficio tradicional), los cuales son considerados como practicas ambientalmente sostenibles (CENICAFE, 2011).

Según los registros de la finca de estudio, el promedio de la semana de mayor producción es de 80 arrobas de café, valor que se presentó en el mes de mayo del año pasado.

6.2 PRETRATAMIENTO PARA EL HUMEDAL CONSTRUIDO

Para el tratamiento de las aguas mieles del café en la finca el Pomorroso, se cuenta con un pre-tratamiento el cual consta de una trampa pulpa, (cuya función principal es retener la pulpa del fruto y los sólidos de mayor tamaño), como tratamiento primario se pondrá en funcionamiento una laguna acidogénica (cuyo objetivo primordial es la reducción del contenido de sólidos y materia orgánica) y como tratamiento secundario el humedal de flujo subsuperficial horizontal propuesto en esta investigación.



Figura 2 Tratamiento preliminar y primario para el beneficio húmedo del café

6.3 DISEÑO DEL HUMEDAL

Para el dimensionamiento del humedal de flujo subsuperficial horizontal se decide trabajar con la metodología de diseño para humedales construidos denominada “modelo P-k-C*”.

Se trata de un modelo de primer orden, que actualmente es reconocido como una de las metodologías más avanzadas en la simulación del complejo funcionamiento de los humedales.

Los métodos k-C* y P-k-C*, propuestos en Kadlec y Knight y Kadlec y Wallace, respectivamente, se basan en un modelo de primer orden, principalmente desarrollado para el cálculo del tamaño de humedales construidos de flujo subsuperficial; Conceptualmente, el método es un modelo que asume el flujo del sistema como un reactor de flujo a pistón (modelo k-C*) en donde el tiempo medio de permanencia de las partículas que entran al humedal, es el mismo; o una combinación de éste y un sistema de un número aparente de tanques en serie (TIS) (modelo P-k-C*), donde los tiempos de detención y la distribución de los valores de la constante cinética de transformación del contaminante (k) son cambiantes en el tiempo. Este último surge como la actualización al modelo k-C* debido al indefinido comportamiento de los humedales construidos en diferentes partes del mundo (Kadlec y Wallace, 2009).

En la ecuación 1 se muestra el modelo matemático que representa al método P-k-C*, que será usado para el diseño del humedal de la presente investigación:

$$\left(\frac{C - C^*}{C_i - C^*} \right) = \frac{1}{\left(1 + \frac{K}{Pq} \right)^P} \quad (1)$$

Dónde:

- C = Concentración de salida, mg/L
- C_i = Concentración de entrada, mg/L
- C* = Concentración en fondo del humedal, mg/L
- P = Número aparente de TIS (Tanques en serie)
- K = Constante cinética de primer orden, m/d
- q = Carga hidráulica, m/d

La ecuación 1 es función de variables que pueden ser suministradas con análisis simples, excepto la concentración de fondo (C*) y la constante cinética k. La concentración de fondo es dependiente de la concentración de entrada del

contaminante, mientras que la constante k , puede ser determinada a través de estudios o por informe de la literatura consultada.

La ecuación (1) no muestra claramente cómo dimensionar el humedal. En consecuencia, se conoce que la carga hidráulica (q) es función del caudal de entrada al sistema, por unidad de área, lo que permite expresar la ecuación (1) de otra forma, facilitando el cálculo del área superficial del humedal, de la siguiente manera, ecuación (2):

$$A = \frac{\left[\left(\frac{C_i - C^*}{C - C^*} \right)^{\frac{1}{P}} - 1 \right] PQ}{K} \quad (2)$$

Dónde:

- A= Área superficial, (m²).
- C_i= Concentración de entrada, (mg/L).
- C* = Concentración de fondo, (mg/L).
- C = Concentración de salida, (mg/L).
- P = Número aparente de tanques en serie, (adimensional).
- Q = Caudal de agua, (m³/día).
- K = Constante cinética de primer orden, (m/día).

6.4 CALCULOS PARA EL DISEÑO DEL HUMEDAL CONSTRUIDO

Datos:

Para el cálculo del caudal máximo pico que entra al humedal, se realizó el siguiente procedimiento, basado en las investigaciones realizadas por CENICAFE, 2011

Para estimar dicho caudal es necesario conocer la producción anual (arobas de café pergamino seco) o el valor del café cereza recolectado en el día de máxima producción, y el porcentaje de café pergamino seco obtenido en el día pico, que para el caso del departamento del Cauca se tiene un valor promedio establecido de 0.035(3.5%) según estudios realizados por el Comité Departamental de Cafeteros del Cauca (CENICAFE, 2011).

En la finca de estudio, la producción de café máxima registrada el año pasado fue 80 arrobas de café pergamino seco.

El agua utilizada en el sistema por año es: Agua utilizada por 1kg de café pergamino seco = 5litros (Zambrano *et al.*, 2006)

Entonces:

$$Q = 80 \frac{\text{arroba}}{\text{día}} \times 5 \frac{\text{litros}}{\text{Kg}} \times 12,5 \frac{\text{Kg}}{\text{arroba}} \times 0,035 = 175 \frac{\text{L}}{\text{día}} = 0,175 \frac{\text{m}^3}{\text{día}}$$

La carga de entrada al humedal es de acuerdo al resultado del análisis de DBO₅ de la muestra que se tomó en la Finca El Pomorroso.

Ce= 3780 mg/L

De acuerdo a (Kadlec y Wallace, 2009), para un Sistema súper (cargas de entrada > 200mg/l) se tienen las siguientes variables:

Concentración de fondo C*=20mg/l

N=43, P= N/2= 21.5

K=30 años-1 = 0.082 días-1

Cs= 400 mg/L según resolución 0631 de 2015

A continuación se presentan los cálculos realizados para el dimensionamiento del humedal construido:

Tabla 5. Cálculos para el dimensionamiento del humedal construido.

	FORMULA	RESULTADO	OBSERVACIONES
Área Superficial	$A = \frac{\left(\frac{C_e - C^*}{C_s - C^*} \right)^{\frac{1}{p}} - 1}{K} * PQ$	$A = 5.15 \text{m}^2 = 6 \text{m}^2$	Para facilidades en la construcción del humedal, se decide aproximar el área a 6m^2
Ancho: Largo	Relación 2:1	Ancho: 1.5m Largo: 4m	Por criterios de diseño Altura Lámina de agua: 0.6 m Altura medio de soporte(grava): 0.8 m Borde libre: 0.2 m Altura total del humedal: 1 m
Carga de Entrada	$C_e * Q$	$3780 \text{ mg/l} * 0.175 \text{ m}^3/\text{día} = 661 \text{ g/día}$	
Carga Superficial	$\frac{C_e}{\text{Area Superficial}}$	$\frac{661 \text{ g/día}}{6 \text{m}^2} = 110.25 \text{ g/m}^2 \cdot \text{día}$	
Carga Transversal	$\frac{C_e}{\text{Ancho} * h}$	$\frac{661 \text{ g/día}}{1.5 \text{m} * 0.8 \text{m}} = 551.25 \text{ g/m}^2 \cdot \text{día}$	

Fuente: Elaboración Propia

Para la construcción del humedal se asume flujo continuo, donde se utilizó en la entrada y en la salida tubería tipo flauta para garantizar una distribución homogénea del flujo, a la cual se le realizaron orificios de $\frac{1}{2}$ " , con una separación recomendada de 5 cm entre cada uno de ellos (Arias y Brix, 2003). Se instalaron 6 piezómetros ubicados a 50cm de la entrada y de la salida del humedal, distribuidos en forma de espina, es decir 3 pares de piezómetros. Todas las

instalaciones hidráulicas del sistema se trabajaron en tubería de tipo PVC de 2" de diámetro.

El medio de soporte utilizado fue grava media y grava gruesa con tamaños efectivos D_{10} de 32mm y 128 mm respectivamente, con una porosidad teórica del 40%, se dispuso una capa de grava de 0.8 metros previamente lavada.

Para la impermeabilización del humedal, se utilizó una geomembrana de polietileno de alta densidad (HDPE) calibre 40, tipo lisa, la cual ayuda a impedir que se presenten filtraciones no deseadas al suelo, luego se utilizó un geotextil con el fin de proteger la geomembrana.

La relación largo-ancho para el humedal construido tiene una gran influencia en el régimen hidráulico y en la resistencia al flujo del sistema, debido a esto se decide una relación largo-ancho para el sistema de 2:1, debido a que grandes relaciones 10:1 o mayores tienen el inconveniente de que en la parte alta se desborden debido al incremento en la resistencia al flujo causado por la acumulación de residuos de vegetación, principalmente en sistemas de flujo libre, Por tanto, relaciones de 1:1 hasta aproximadamente 3:1 o 4:1 son aceptables (Lara 1999).



Figura 3. Construcción del humedal horizontal

El tiempo de retención hidráulica en el humedal se calcula con la siguiente expresión (Reed, 1998):

$$t = \frac{LWyn}{Q}$$

Dónde:

L: Largo de la celda del humedal, m

W: Ancho de la celda del humedal, m

y: Profundidad de la celda del humedal, m

n: porosidad, o espacio disponible para el flujo del agua a través del humedal. La porosidad es un porcentaje expresado como decimal.

Q: Caudal medio a través del humedal, m³/d

Obteniendo un tiempo de retención hidráulica para el humedal de:

$$t = \frac{4 \times 1.5 \times 0.8 \times 0.4}{0.375} = 10.97 \approx 11 \text{ dias}$$

Debido a las altas cargas contaminantes que entran al humedal, se propone instalar un sistema de lavado, con el fin de evitar obstrucciones y/o taponamientos, debido a que la acumulación de sólidos en el medio filtrante puede ocasionar zonas muertas o corto circuitos a lo largo del sistema, influyendo en la calidad de agua del efluente, de esta manera el sistema de lavado permite limpiar y lograr prolongar la vida útil del humedal (Donado, 2006; Pedescoll *et al.*, 2009).

La tubería de lavado al igual que la tubería de entrada y de salida del sistema tiene perforación de ½" con una separación entre ellas de 5 cm.

La velocidad de lavado se calculó de la siguiente manera:

Carga hidráulica: 0.6m = 23,6"

*Diametro*_{orificio} = 0,0127m = ½"

N° de orificios en el sistema de lavado = 80

Según las guías de laboratorio de hidráulica de la Universidad del Cauca, se tiene que:

Coeficiente de descarga = $cd = 0,621$

Entonces:

Fórmula para el cálculo del caudal de un orificio

$$Q = cd \times Area_{orificio} \times \sqrt{2gH}$$

$$Q = 0,621 \times 1,27 * 10^{-4} m^2 \times \sqrt{2 \times 9,81 \frac{m}{s^2} \times 0,6m} = 2,70 * 10^{-4} \frac{m^3}{s}$$

$$Q = 2,70 * 10^{-4} \frac{m^3}{s} \times 80_{orificios} = 0,022 \frac{m^3}{s} = 1,23 \frac{m^3}{h}$$

$$V = \frac{Q}{A_{humedal}} = \frac{1,23 \frac{m^3}{h}}{6m^2} = 0,21 \frac{m}{h}$$

A continuación se presenta la vista en planta y en perfil del diseño del humedal construido de flujo subsuperficial horizontal para la presente investigación:

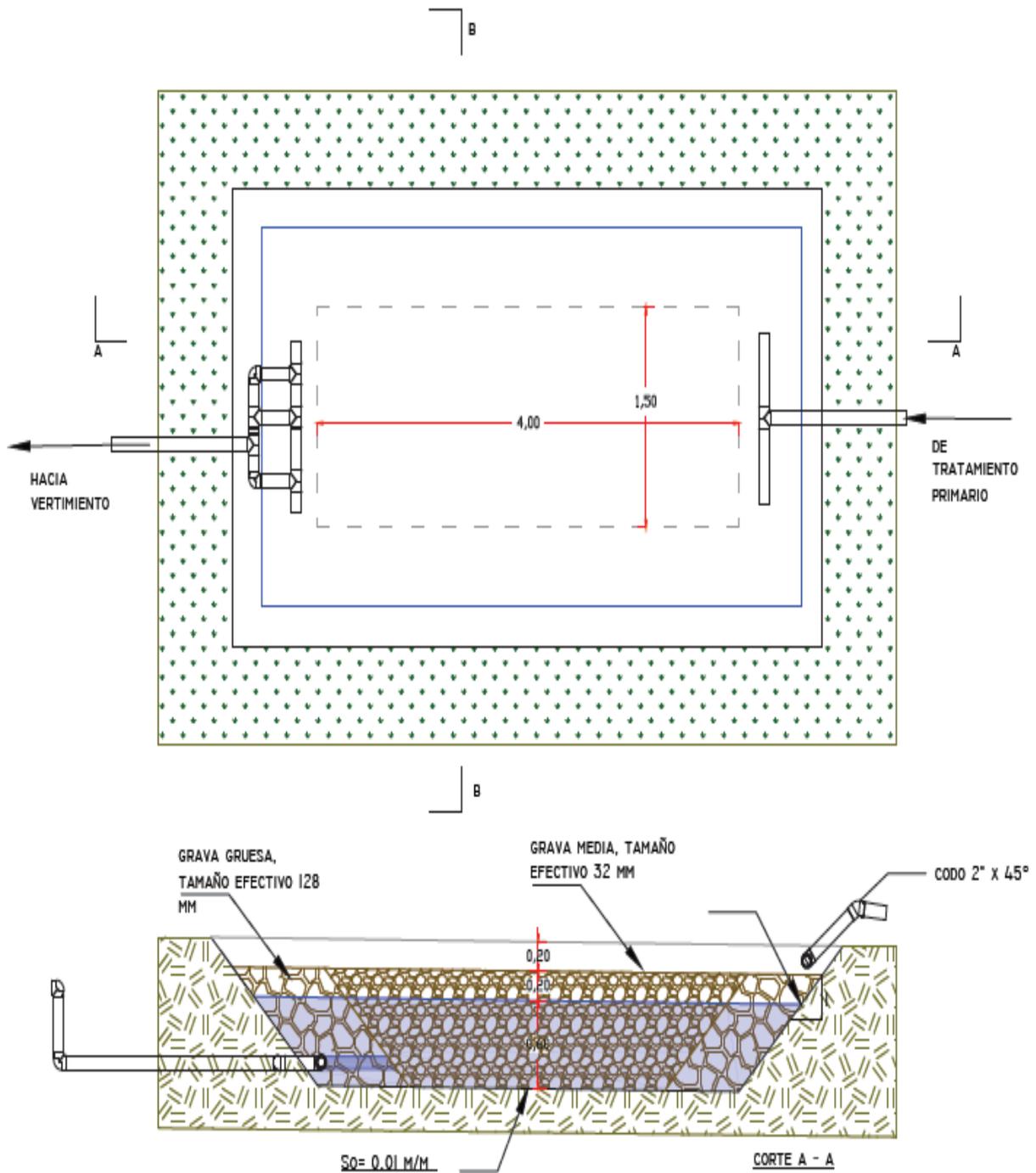


Figura 4. Vista en planta y perfil del humedal construido

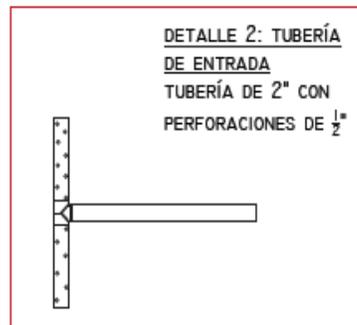
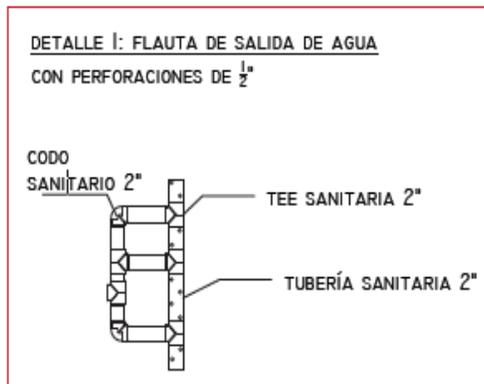
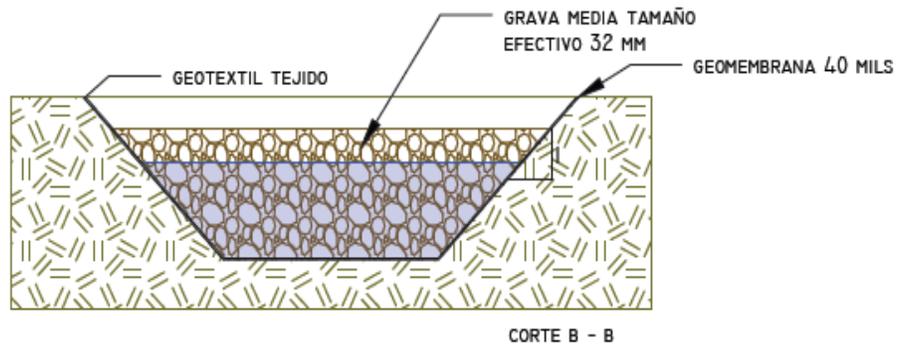


Figura 5. Detalles de construcción del humedal

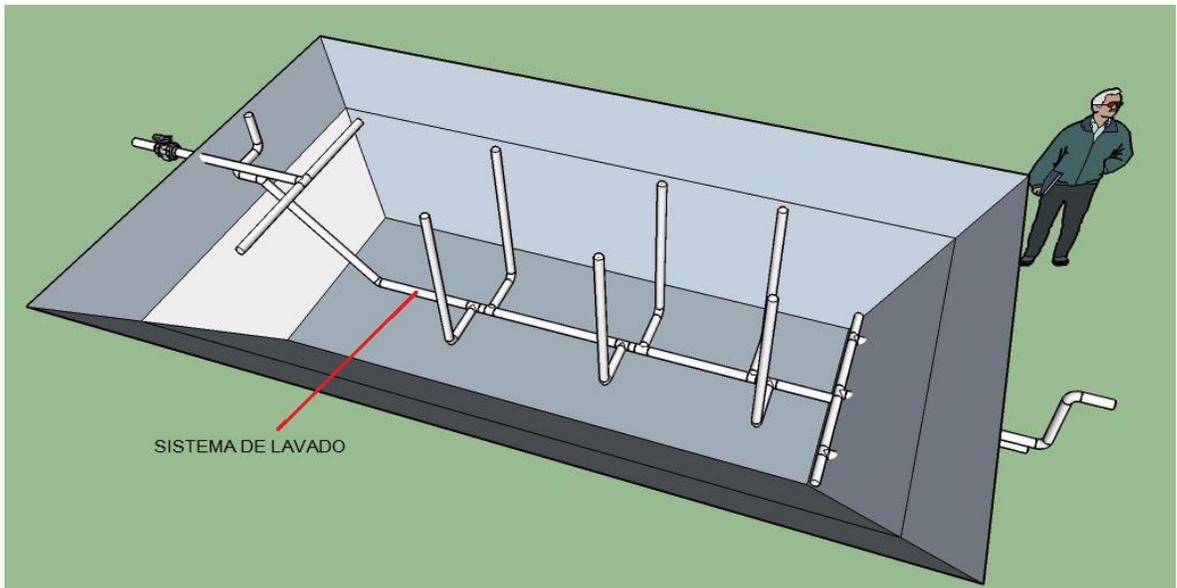


Figura 6. Vista en 3D del humedal construido



Figura 7. Humedal construido de flujo subsuperficial horizontal

6.5 Planta

La especie empleada para el desarrollo de esta investigación fue *Phragmites australis* (carrizo), esta especie vegetal se seleccionó teniendo en cuenta su alta capacidad de adaptación a diferentes condiciones y desarrollo en medios inundados (Fernandez, 2003), además su resistencia a pH bajos la hace idónea para el medio en el que se desarrollara (Lara, 1999), debido a que una de las principales características de la aguas residuales del café, es su acidez.

Las plantas fueron compradas en un vivero de la ciudad de Popayán, se sembraron en bolsas plásticas con un porcentaje 50/50 de tierra grava, con el fin de generar mayor estrés y mejor adaptabilidad al medio, al momento de ser trasplantadas en el sistema. Posteriormente estas fueron regadas con pequeñas dosis variadas de agua miel durante un periodo de 2 meses, finalmente se sembraron en el humedal sometido a un proceso de aclimatación bajo condiciones batch durante un tiempo considerado de un mes.

La especie vegetal se sembró con una densidad de 6 plantas por m^2 , para un número total de 40 plantas.



Figura 8. Aclimatación y siembra de plantas

6.6 VARIABLES RESPUESTA

Las variables fisicoquímicas analizadas en esta investigación, se seleccionaron de acuerdo a las características más relevantes de las aguas residuales en estudio, como lo son los parámetros DQO, DBO y pH, por otra parte es importante estudiar el aporte de sólidos suspendidos totales, la presencia de fosforo y nitrógeno como lo establece la resolución 0631 del 2015. Para el caso del beneficio húmedo del café, este se encuentra dentro del sector de actividades productivas de agroindustria y ganadería establecidas en esta resolución.

Se tomaron 4 muestras a la entrada del humedal y 6 a la salida de este, con una frecuencia de muestreo de quince días durante un periodo de 3 meses (de julio a septiembre del 2016). Las cuales fueron enviadas al laboratorio CINARA de la universidad del Valle, en la ciudad de Cali para realizar los estudios de las variables ya mencionadas bajo los siguientes métodos presentados en la tabla 6:

Tabla 6. Métodos para la determinación de las variables fisicoquímicas.

VARIABLE	METODO/EQUIPO
DQO(mg/L)	Reflujo cerrado
pH(unidades de pH)	Potenciometrico
DBO5(mg/L)	Winkler
Sólidos Suspendidos Totales(mg/L)	Gravimétrico
Fosfatos(mg/L)	Espectrofotométrico
Nitritos(mg/L)	Espectrofotométrico

Fuente: Elaboración propia

6.7 ANALISIS ESTADISTICO

La unidad experimental de esta investigación es un humedal construido de flujo subsuperficial horizontal, donde las variables de respuesta fueron DBO₅, DQO, SST, nitritos, fosfatos y pH; la planta utilizada para evaluar este sistema fue *Phragmites australis* (carrizo).

El experimento realizado fue de medidas repetidas, es decir se tomaron varias muestras a cada parámetro analizado (4 muestras de entrada, 6 muestras de salida), ya que esto permite examinar y comparar las tendencias en el tiempo de las respuestas del comportamiento de cada variable en el sistema (Correa, 2004)

Para las variables respuesta del sistema se realizó un análisis estadístico descriptivo y exploratorio, mediante Microsoft office Excel 2013 y el software estadístico statgraphics centurion. No se hace necesario hacer pruebas

estadísticas rigurosas, debido a que las diferencias entre la entrada y la salida del humedal de las diferentes variables analizadas son significativas, además como la unidad experimental es un solo sistema, no se hace necesario hacer pruebas de T ni de varianza.

7. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

7.1 PRESENTACIÓN VALORES VARIABLES FISICO QUÍMICAS

En las tablas 7 y 8 se presentan los resultados obtenidos de las variables respuestas a la entrada y a la salida del humedal respectivamente:

Tabla 7. Variables Fisicoquímicas de Entrada

MUESTRAS DE ENTRADA						
	VARIABLES FISICOQUIMICAS					
MUESTREOS	DBO ₅ (mg/L)	DQO (mg/L)	SST (mg/L)	pH	FOSFATOS (mg/L)	NITRITOS (mg/L)
1 MUESTRA 9/02/16	3780	11300				
2 MUESTRA 9/09/16	9000	19300	2080	3,55	18,60	5,50
3 MUESTRA 22/08/16	1450	5200	196	4,01	3,80	0,48
4 MUESTRA 2/09/16	1100	2200	93	4,32	3,50	0,19
6 MUESTRA 22/09/16	6000	13500	690	3,85	17,00	1,65

Tabla 8. Variables Fisicoquímicas de Salida

MUESTRAS DE SALIDA						
	VARIABLES FISICOQUIMICAS					
FECHA	DBO ₅ (mg/L)	DQO (mg/L)	SST (mg/L)	pH	FOSFATOS (mg/L)	NITRITOS (mg/L)
1 MUESTRA 25/07/16	2200	4325	200	4,52	4,40	0,034
2 MUESTRA 9/08/16	1450	3200	104	4,57	1,80	0,10
3 MUESTRA 22/08/16	800	1600	120	4,85	2,30	0,09
4 MUESTRA 2/09/16	500	1000	91	4,99	1,20	0,10
5 MUESTRA 13/09/16	2000	4500	8	6,84	3,20	0,10
6 MUESTRA 22/09/16	1300	2800	5	7,29	3,00	0,10

7.2 COMPORTAMIENTO DEL pH

En la tabla 9 se presentan los parámetros estadísticos obtenidos para la variable pH:

Tabla 9. Datos Estadísticos para el pH a la entrada y salida del humedal construido

Muestras	pH	
	Entrada	Salida
2	3,55	4,57
3	4,01	4,85
4	4,32	4,99
6	3,85	7,29
PROMEDIO	3,93	5,42
DESVIACIÓN ESTANDAR	0,32	1,25
COEFICIENTE DE VARIACION	8,20%	23,10%
MEDIANA	3,93	4,92
COEFICIENTE DE ASIMETRIA	0,042	1,88
MÁXIMO DE ENTRADA	4,32	
MINIMO DE SALIDA		4,57
DIFERENCIA DE PROMEDIOS ENTRADA Y SALIDA	1,49	

Fuente: Elaboración Propia

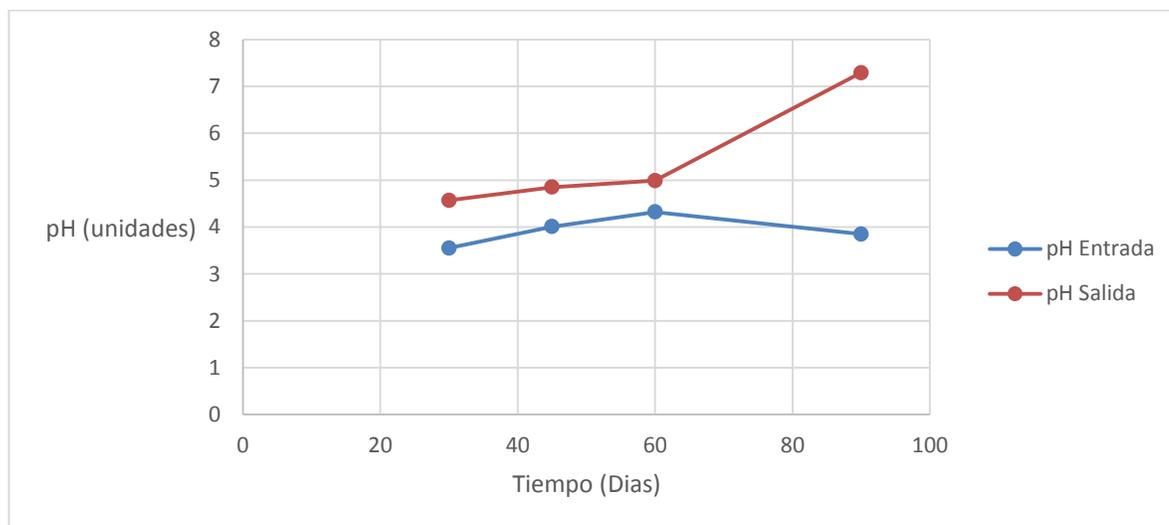


Figura 9. Comportamiento del pH en la entrada y la salida del humedal

En la figura 8 se ilustra el comportamiento del pH a la entrada y a la salida del humedal construido, evidenciándose que los valores de salida tienen una ligera tendencia a aumentar, resaltando que el valor de salida del pH siempre es mayor al que entra, atribuyendo esto a lo investigado por Arias (2004) que menciona que los humedales de flujo subsuperficial, al igual que los de flujo superficial, tienen la capacidad de amortiguar las variaciones de pH del agua residual entrante, dicha capacidad de amortiguación se deba probablemente a las interacciones entre el sustrato y la biopelícula.

Sin embargo todos los datos se encuentran en un rango de 5.35-7.29 U de pH, con un promedio de entrada de 3.93 U de pH y un promedio de salida de 5.42 U de pH, generando un medio ácido para el sistema, coincidiendo con lo reportado por Arias (2004) que indica que los humedales construidos utilizados para el tratamiento de aguas residuales normalmente tienen un pH próximo al neutro o ligeramente ácidos.

Del mismo modo Selvamurugan *et al.* (2010), encontraron que el pH de las características de las aguas residuales de procesamiento de café (CPWW) se encontraron en un rango de 3,88 U hasta 4,11 U, concluyendo que el pH se hizo ácido por la fermentación de los azúcares presentes en el CPWW que se convierten en alcohol y CO₂.

El pH de las aguas del procesamiento del café se encuentra en los rangos de acidez reportados por Claass (2003). Esto se puede atribuir, a los ácidos orgánicos que se generan en el fermento y puede ser uno de los factores limitantes para el desarrollo bacteriano y el buen funcionamiento del sistema, ya que en los humedales los aspectos químicos y físicos del agua se ven afectados por el pH, muchas bacterias no pueden sobrevivir fuera de un rango de pH. Las bacterias desnitrificantes tienen su mejor rendimiento entre el rango $6,5 < \text{pH} < 7,5$ y las que realizan la nitrificación prefieren $\text{pH} = 7,2$ y superiores (Arias, 2004), de acuerdo a lo anterior, durante los primeros meses de funcionamiento del humedal, estos procesos pudieron haber sido afectados por esta condición de acidez, aunque es de resaltar la tendencia de aumento de los valores de salida de pH, con lo que es posible que estos procesos se puedan realizar bajo condiciones más óptimas.

Según la resolución 0631 de 2015, el promedio de los valores de pH de salida (5.42U) están dentro del rango definido para la actividad del procesamiento del café por beneficio tradicional que es de 5-9 U de pH.

7.3 EFICIENCIAS DE REMOCION

7.3.1 Demanda Bioquímica de Oxigeno

En la tabla 10 se presentan los parámetros estadísticos para la variable DBO₅

Tabla 10. Datos estadísticos para DBO₅ a la entrada y salida del humedal construido

Muestras	DBO ₅ (mg/l)		Remoción %
	Entrada	Salida	
1	3780	2200	41,79
2	9000	1450	83,88
3	1450	800	44,82
4	1100	500	54,54
6	6000	1300	78,33
PROMEDIO	4266	1250	60,67
DESVIACION ESTANDAR	3301,78	653,83	19,33
COEFICIENTE DE VARIACION	77,40%	52,30%	31,90%
MEDIANA	3780	1300	54,54
COEFICIENTE DE ASIMETRIA	0,66	0,525	0,40
MAXIMO DE ENTRADA	9000		
MINIMO DE SALIDA		500	
DIFERENCIA DE PROMEDIOS ENTRADA Y SALIDA	3016		

Fuente: Elaboración Propia

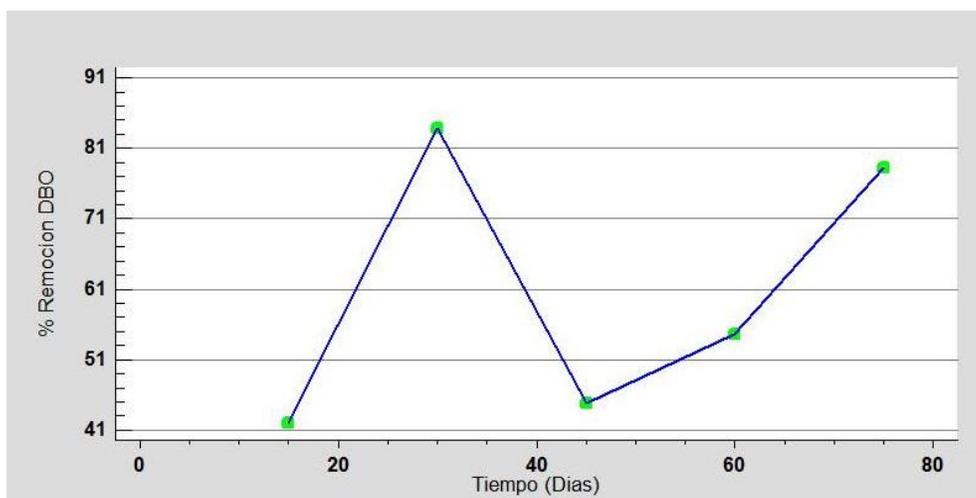


Figura 10. Comportamiento del porcentaje de remoción de DBO₅

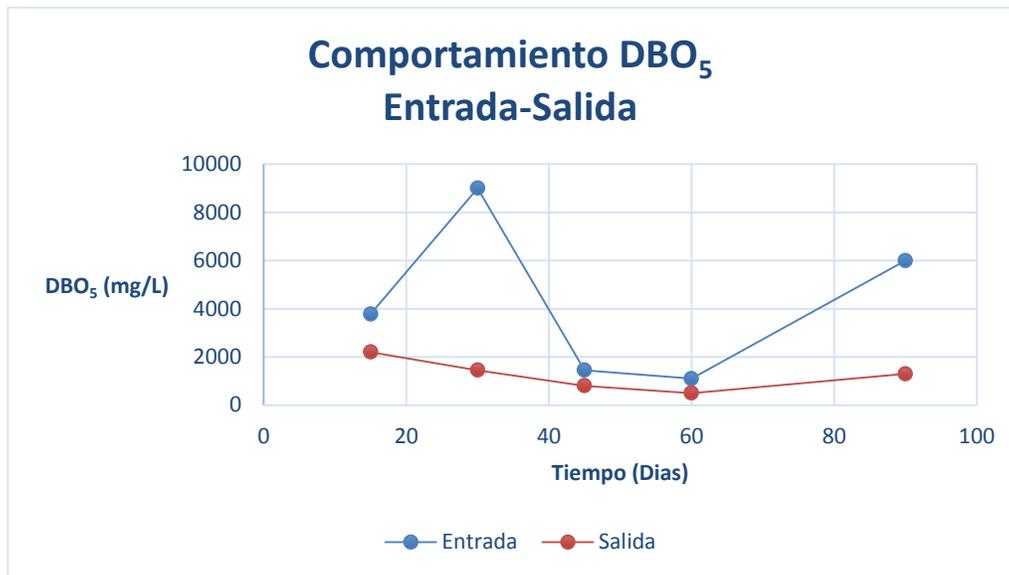


Figura 11. Comportamiento DBO₅ en la entrada y salida del humedal

En la figura 11 se puede observar el comportamiento de los valores de entrada y salida de DBO₅ al sistema, es evidente que en los datos de entrada existe una gran variación en las características del afluente, comprobando esto con el coeficiente de variación (el cual indica la variabilidad de los datos en relación con la media), que presenta un valor del 77,4%. Dicha fluctuación u oscilación podría atribuirse a que en los dos muestreos que arrojan los mayores valores de entrada (muestreo 2 con 9000mg/L y muestreo 6 con 6000mg/L), la cantidad de café lavado en la finca el Pomorroso fue menor a la habitual, por lo tanto se lava 1 o 2 veces el café y no 3 veces que es lo recomendado, generando que el agua miel proveniente de este lavado este más concentrada, ya que según Porres *et al.*(2000) el agua de despulpado y el agua del primer lavado son las más contaminadas y concentradas.

En la figura 10 se muestra el comportamiento del porcentaje de remoción de DBO₅, se puede observar que dichas eficiencias varían durante cada muestreo sin indicar una tendencia muy clara, sin embargo en los últimos 2 muestreos se puede apreciar que las eficiencias de remoción tienden a aumentar, lo que podría indicar que el sistema se está empezando a estabilizar (Bernal *et al.*, 2003). Por otra parte estas variaciones de remoción en el humedal se podrían atribuir al hecho, de que en algunas etapas del funcionamiento de este tipo de sistemas, el material de la planta muerta (detritus) y/o el posible desprendimiento de la biopelícula formada alrededor de los rizomas se degraden en el medio y se acumulen en la superficie,

provocando un incremento en compuestos orgánicos e inorgánicos que aumentan la concentración de la materia orgánica (Quipuzco, 2002; Llagas *et al.*, 2006).

Es de resaltar que el valor medio de las eficiencias para DBO₅ encontradas en esta investigación (54.54%), coincide con lo estudiado por Patiño *et al.* (2015) que reporta en su trabajo que el sistema a escala piloto sembrado con *Phragmites australis* para tratar aguas domesticas removió este parámetro con porcentajes mayores al 50%. Este valor también está muy cercano a lo descrito por Karathanasis *et al.* (2003); Ascúntar & Toro (2007), que concluyeron que la eficiencia de remoción en cuanto a materia orgánica está entre un rango de (60-80%) para la especie en estudio.

En la tabla 10 se observa que el valor promedio de las remociones de DBO₅ fue de 60,67% y el valor de la mediana de 54,54%,(tomando este último dato como referencia de promedio de este parámetro ya que es más resistente a valores tan dispersos), con un coeficiente de variación no despreciable de 31,90% el cual indica que existe variabilidad en los valores de remoción en el tiempo, y aunque estadísticamente el resultado de la asimetría apunta a que la tendencia de los valores sean menores al promedio de las remociones, se espera que estos resultados sigan una tendencia de crecimiento, ya que cuando las plantas (*Phragmites australis*) logren su madurez y sus raíces estén más fuertes y penetradas en el medio, las velocidades en el sistema disminuirán, favoreciendo procesos como filtración, floculación y sedimentación de la materia orgánica que se encuentra en forma suspendida. Además los sólidos orgánicos removidos por sedimentación y filtración, así como la vegetación muerta ejercerán una demanda de oxígeno. Como resultado de lo anterior, la DBO₅ afluente al humedal se remueve a medida que el agua avanza en el sistema (Silva, 2002).

La Environmental Protection Agency (2000) reporta que la eliminación de la DBO₅ particulada ocurre por sedimentación y filtración de partículas en los espacios entre la grava y las raíces en este tipo de sistemas. La DBO₅ soluble es eliminada por los microorganismos que crecen en la superficie de la grava, raíces y rizomas de las plantas, pero en el resto del lecho sumergido, ocurre por vías anaerobias: fermentación metánica y sulfato reducción.

La sulfato-reducción es una vía muy importante de degradación de la materia orgánica en humedales horizontales (Aguirre *et al.*, 2005). Según lo observado por Baptista *et al.*(2003) en los humedales horizontales las bacterias sulfato-reductoras y las metanogénicas pueden competir por el sustrato, y en presencia

de sulfato y alta carga orgánica las bacterias sulfato-reductoras crecen con más éxito.

A pesar de que el comportamiento de remoción de DBO₅ en el sistema fue variable, se obtuvieron buenos resultados, no obstante, dichos valores deben seguir la tendencia a mejorar para poder cumplir con lo estipulado en la resolución 0631 de 2015, que establece para la actividad del café procesado por beneficio tradicional, un valor máximo permisible de 400 mg/L en términos de DBO₅.

7.3.2 Demanda Química de Oxígeno

En la tabla 11 se presentan los parámetros estadísticos para la variable DQO

Tabla 11. Datos estadísticos para DQO a la entrada y salida del humedal construido

Muestras	DQO (mg/l)		Remoción %
	Entrada	Salida	
1	11300	4325	61,72
2	19300	3200	83,41
3	5200	1600	69,23
4	2200	1000	54,54
6	13500	2800	79,25
PROMEDIO	10300	2585	69,63
DESVIACION ESTANDAR	6779,74	1316,67	11,96
COEFICIENTE DE VARIACIÓN	65,80%	50,90%	17,20%
MEDIANA	11300	2800	69,23
COEFICIENTE DE ASIMETRIA	0,13	0,10	-0,10
MAXIMO DE ENTRADA	19300		
MINIMO DE SALIDA		1000	
DIFERENCIA DE PROMEDIOS ENTRADA Y SALIDA	7715		

Fuente: Elaboración Propia

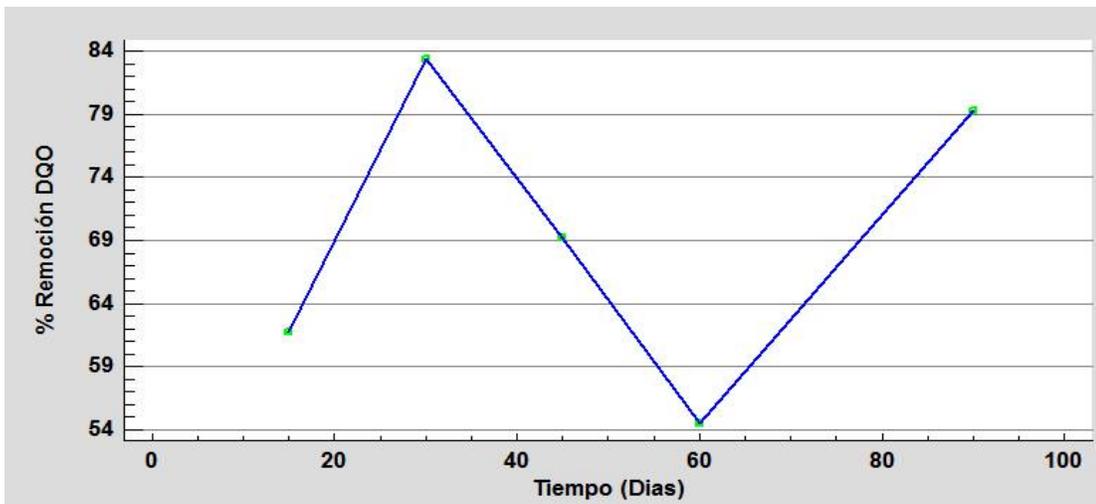


Figura 12. Comportamiento del porcentaje de remoción de DQO

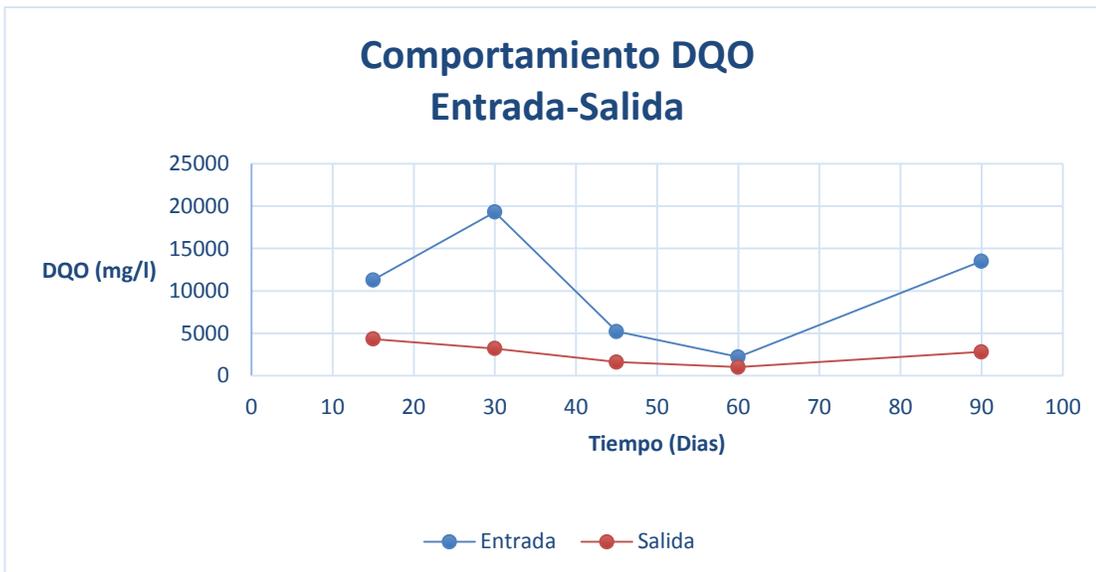


Figura 13. Comportamiento DQO en la entrada y salida del humedal

En la tabla 11 se puede observar que el porcentaje promedio de remoción en el sistema para la DQO es de 69,63% con una variabilidad de 17,2% la cual es aceptable e indica que el sistema está más estable para remociones de este parámetro, presentándose una asimetría negativa -0,10 la cual tiene una leve tendencia a valores mayores de remoción.

Las concentraciones resultantes de DQO en este trabajo son similares a las reportadas por (Romero *et al.*, 2009), quienes encontraron eficiencias de remoción para este parámetro entre el 50% y 70%, para aguas residuales domesticas

utilizando dos especies vegetales, *Phragmites australis* y *Typha dominguensis*, en humedales construidos de flujo horizontal a escala piloto, además estudios realizados por (Zarate *et al.*, 2008), quienes trabajaron con humedales a escala de laboratorio utilizando agua residual sintética, demuestran que humedales sembrados con este tipo de planta presentan mayores remociones en términos de DQO que aquellos sistemas que no tienen planta.

En los humedales construidos, la capacidad de remoción se atribuye principalmente a los efectos combinados entre el tiempo de retención hidráulica, la acción filtrante del sustrato para retener sólidos suspendidos del agua y la actividad biológica del sistema (Rodríguez y Durán, 2006). Otro parámetro importante que afecta la remoción de DQO es el posible aporte de oxígeno por las raíces de las plantas a la rizósfera. La absorción de materia orgánica por las plantas es insignificante comparada con la degradación biológica.

En la figura 12 se aprecia el comportamiento de los valores de entrada y salida del sistema para DQO, donde se puede observar que los valores de entrada no presentan una tendencia definida, esto se puede atribuir a los diferentes tipos de lavado que se le hicieron al café durante la toma de las muestras, es decir en el muestro 2 el café fue lavado 1 o 2 veces, de lo cual resulta un agua residual más contaminada (19300 mg/L), en comparación con el comportamiento de salida se puede apreciar una tendencia más estable, la disminución en la concentración de salida de la DQO presentada en el sistema, probablemente se debe al metabolismo de los macro y microorganismos heterótrofos aerobios y anaerobios, que utilizan los compuestos orgánicos del agua para la producción de biomasa, aunque en el sistema también se generan reacciones químicas, principalmente de óxido–reducción (Kadlec *et al.*, 2000).

A pesar de que los resultados para el comportamiento de DQO no cumplen con lo estipulado en la resolución 0631 de 2015, la cual establece que el valor máximo permisible para esta variable en el beneficio tradicional de café es de 650 mg/L, se espera que el comportamiento de la DQO a la salida del humedal construido se estabilice con el tiempo, es decir cuando el sistema llegue a su maduración, esperando cumplir con lo establecido en dicha resolución.

7.3.3 Sólidos Suspendidos Totales

En la tabla 12 se presentan los parámetros estadísticos para la variable SST

Tabla 12. Datos estadísticos para SST a la entrada y salida del humedal

Muestras	SST (mg/l)		
	Entrada	Salida	Remoción %
2	2080	104	95,00
3	196	120	38,77
4	93	91	2,15
6	690	5	99,27
PROMEDIO	764,75	80	58,80
DESVIACIÓN ESTANDAR	914,73	51,38	46,75
COEFICIENTE DE VARIACIÓN	119,60%	64,20%	79,50%
MEDIANA	443	97,50	66,88
COEFICIENTE DE ASIMETRIA	1,55	-1,68	-0,49
MÁXIMOS	2080		
MÍNIMOS		5	
DIFERENCIA DE PROMEDIOS ENTRADA Y SALIDA	684,75		

Fuente: Elaboración Propia

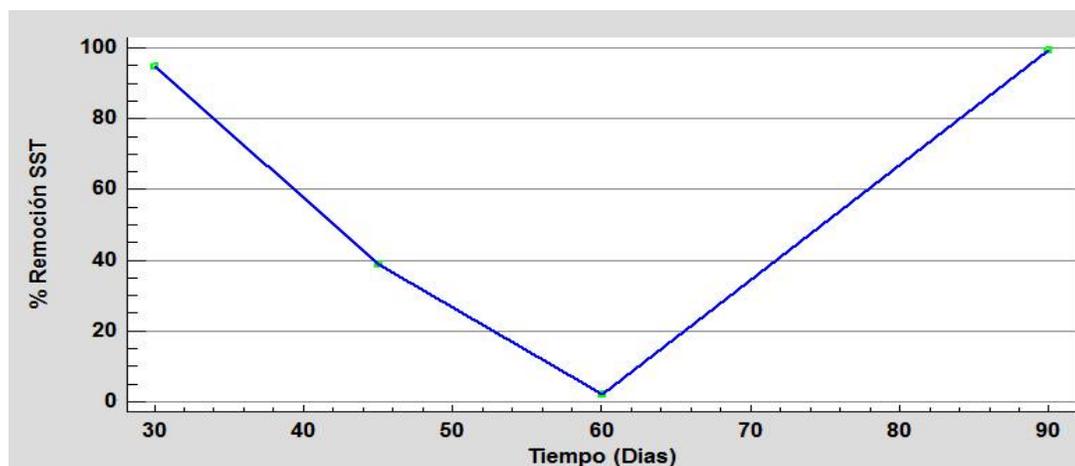


Figura 14. Comportamiento del porcentaje de remoción de SST

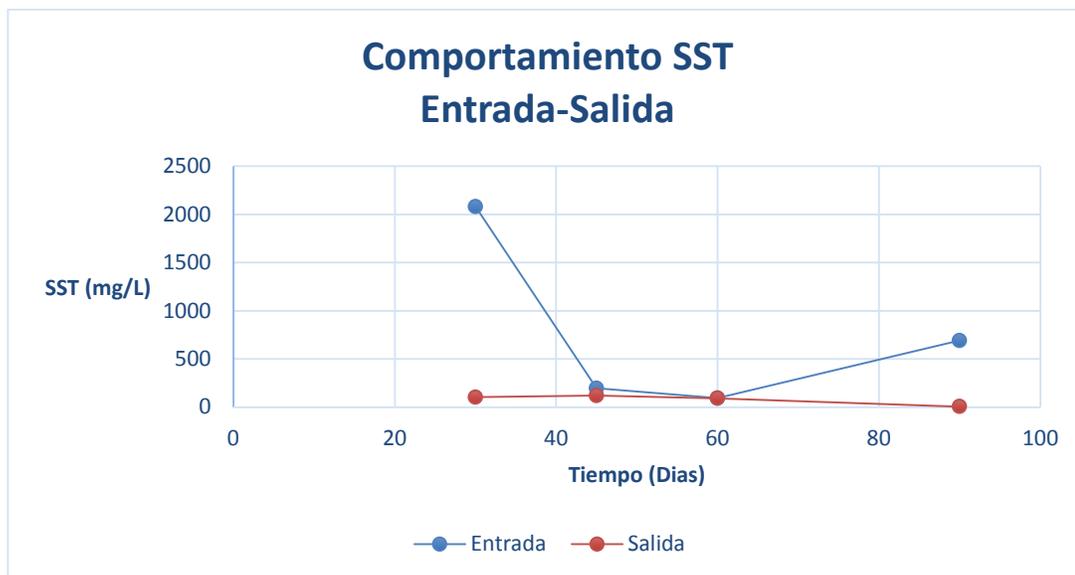


Figura 15. Comportamiento SST en la entrada y salida del humedal

En la figura 14 se observa que el comportamiento de los valores de entrada al humedal en cuanto a sólidos suspendidos totales no siguen una tendencia clara, lo que se puede asociar con el hecho explicado anteriormente de que la concentración de las aguas residuales en estudio dependen del número de lavados que se le realicen al café, ya que el agua resultante del primer lavado es la más contaminada y concentrada. En cuanto a los valores de salida se aprecia una tendencia más homogénea y descendiente con el paso del tiempo.

En la tabla 12 se presentan los valores para los parámetros estadísticos en términos de SST, obteniendo un valor promedio para la remoción de esta variable de 58.80% y una mediana de 66.88%, tomando este último dato como referencia del promedio de remoción, ya que para datos tan atípicos este parámetro resulta ser más resistente. Por otra parte el coeficiente de asimetría (-0.49) señala una leve tendencia a valores mayores de remoción, por lo que se esperaría que se siga presentando porcentajes altos en cuanto a remoción del material suspendido.

En términos generales, la remoción de SST obtenida en el sistema arrojó valores muy favorables, lo que lleva a pensar que cuando el sistema alcance su grado de maduración en términos de sustrato y vegetación, los resultados seguirán una tendencia más estable y eficiente para la remoción de este parámetro (García, 2009). Los resultados encontrados en esta investigación en cuanto a este tipo de remoción, son similares a los reportados por Vyzamal *et al.* (2008), que hallaron

eficiencias de remoción de este parámetro en un rango de (65-85%), utilizando humedales construidos a escala real para tratar aguas residuales domésticas, sembrados con *Phragmites australis*.

Dicha remoción podría asociarse al hecho de que en humedales construidos, la materia en suspensión (MES) queda retenida en estos sistemas mediante la combinación de diferentes fenómenos de tipo físico que en su conjunto se denominan “filtración del medio granular”. Entre estos fenómenos cabe destacar la sedimentación debida a la baja velocidad de circulación del agua y el tamizado que sucede a nivel de los espacios intersticiales del medio granular. Estos fenómenos se ven potenciados por las fuerzas de adhesión que ocurren entre los sólidos y que tienden a promover la formación de partículas de mayor tamaño (García y Corzo, 2008).

Según lo reportado por García y Corzo (2008) en los humedales horizontales la mayor parte de la eliminación de la materia en suspensión sucede cerca de la zona de entrada y su concentración va disminuyendo de forma aproximadamente exponencial a lo largo del lecho (Figura 15). En general, casi toda la eliminación de la materia en suspensión podría suceder en 1/4 - 1/3 de la longitud total del sistema.

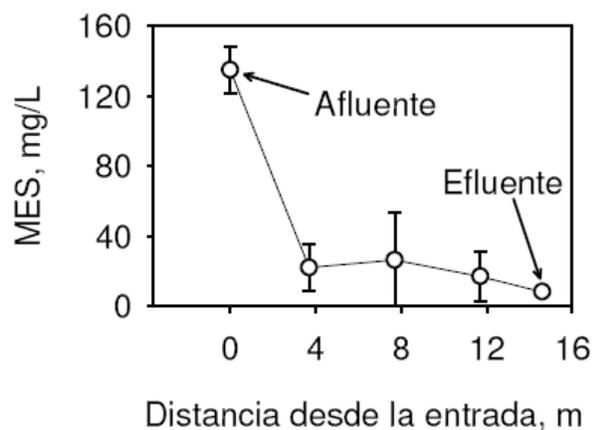


Figura 16. Evolución de la concentración de materia en suspensión (MES) a lo largo de un humedal de flujo horizontal tomada de García y Corzo (2008).

Por otra parte, en la tabla 12 también se puede observar que los valores de salida del sistema en cuanto a SST, se encuentran en un rango de (5-120mg/L), con un promedio de 80 mg/L, el cual cumple con lo establecido en la resolución 0631 de

2015 que tiene como valor máximo permisible para esta variable de 400mg/L para la actividad agroindustrial del procesamiento del café por beneficio tradicional.

7.3.4 Fosfatos

En la tabla 13 se presentan los parámetros estadísticos para la variable fosfatos

Tabla 13. Datos estadísticos para fosfatos a la entrada y salida del humedal

Muestras	Fosfatos (mg/l)		Remoción %
	Entrada	Salida	
2	18,60	1,80	90,32
3	3,80	2,30	39,47
4	3,50	1,20	65,71
6	17	3	82,35
PROMEDIO	10,72	2,07	69,46
DESVIACION ESTANDAR	8,19	0,76	22,46
COEFICIENTE DE VARIACIÓN	76,40%	36,80%	32,30%
MEDIANA	10,40	2,05	74,03
COEFICIENTE DE ASIMETRIA	0,031	0,16	-0,92
MAXIMO DE ENTRADA	18,60		
MINIMO DE SALIDA		1,20	
DIFERENCIA DE PROMEDIOS ENTRADA Y SALIDA	8,65		

Fuente: Elaboración Propia

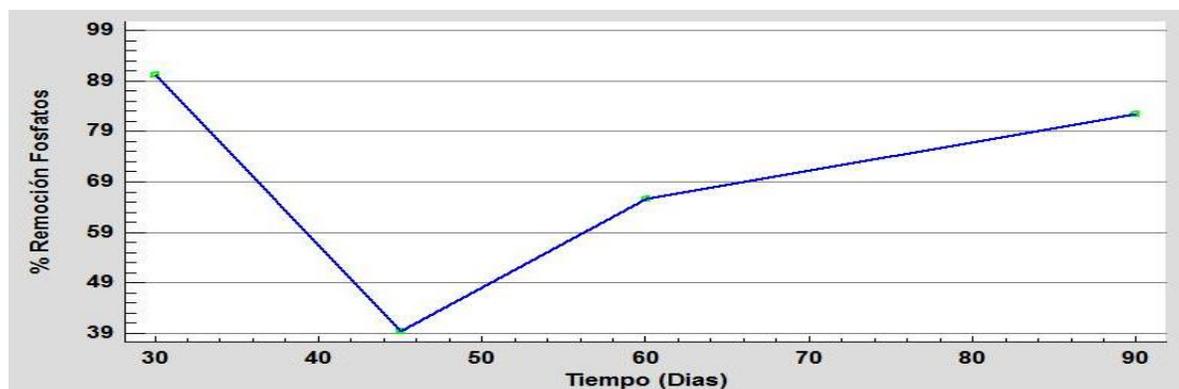


Figura 17. Comportamiento del porcentaje de remoción de fosfatos

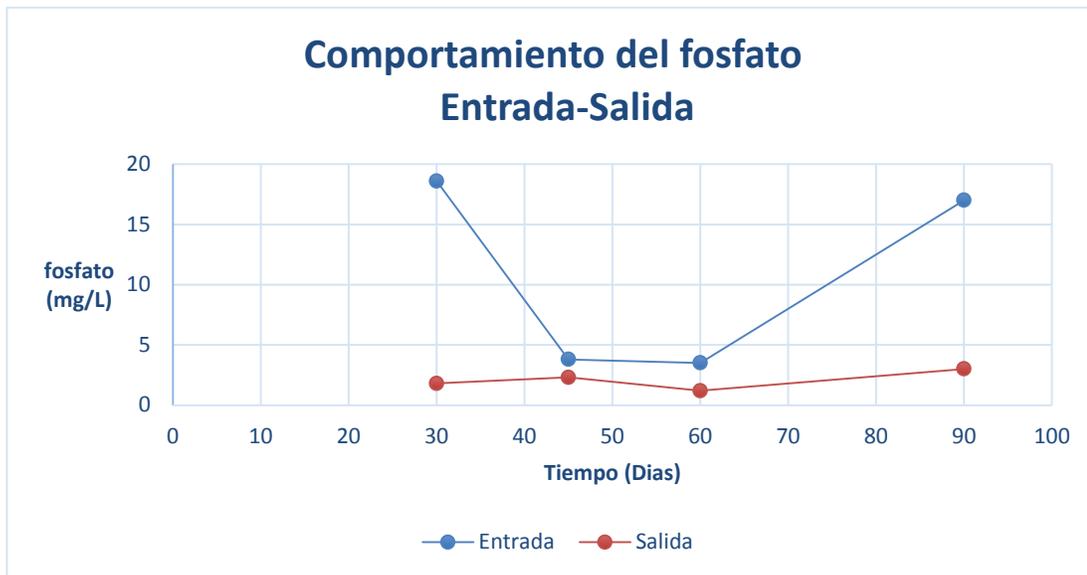


Figura 18. Comportamiento de fosfatos en la entrada y salida del humedal

En la figura 17 se presenta el porcentaje de remoción para el fosfato, donde se puede observar que en los últimos muestreos tiende a mejorar, es decir se estabiliza su comportamiento, lo cual se puede corroborar con el coeficiente de asimetría presentado en la tabla 13 de -0,92 que representa una leve tendencia de valores mayores de remoción, es decir que con el tiempo, cuando el sistema esté más estable estos valores probablemente tiendan a aumentar; además el coeficiente de variación a pesar de no estar en los rangos recomendables (<20%), no está muy lejano de estos, reportando un valor de 32,3%.

El fósforo esta normalmente presente en aguas residuales en forma de ortofosfatos, polifosfatos y fósforo orgánico. La oxidación biológica da como resultado que la mayoría del fósforo sea convertido a ortofosfatos, dentro de los cuales se encuentra el fosfato (Otálora, 2011).

La remoción de ortofosfatos ocurre principalmente como una consecuencia de la adsorción, complejización y reacciones de precipitación con aluminio, hierro, calcio y materiales arcillosos en la matriz del sustrato. El consumo de fósforo por la planta puede ser considerado como insignificante comparado con los efectos de adsorción, dependiendo del valor de pH dentro del sustrato, el fósforo está presente en la forma de sal soluble o minerales insolubles, lo cual significa que el fósforo puede ser transferido dentro del humedal construido. Debido al contenido

de óxidos metálicos en el sustrato, la fijación de fósforo como fosfatos por medio de la adsorción varía (Delgadillo *et al.*, 2010).

En la figura 18 se aprecia el comportamiento de entrada y salida para el fosfato en el humedal construido, donde se puede observar que los valores de entrada varían notablemente a diferencia de los valores de salida, lo cual se puede atribuir a que el medio de soporte (grava) que se utilizó es nuevo, y las plantas aún se encuentran en fase de crecimiento, es decir que se tiene una alta capacidad de adsorción (Silva, 2002)

Según el estudio realizado por Zarate *et al.* (2007) reportaron altas remociones de fosforo para humedales construidos a escala de laboratorio, alimentados con agua residual sintética, con y sin planta *Phragmites australis*, 93,2% y 86,4% respectivamente, similar a las obtenidas en esta investigación.

Los mecanismos de eliminación del fósforo pueden ser de tipo biótico y abiótico. Los bióticos incluyen la asimilación por parte de las plantas y los microorganismos. Los abióticos abarcan fundamentalmente la adsorción por el medio granular. En muchos estudios se ha observado que después de la puesta en marcha de humedales se obtiene una buena eficiencia de eliminación del fósforo para después reducirse en poco tiempo. Es posible que esto suceda debido a que el medio granular limpio tiene alta capacidad de adsorción, pero esta se va perdiendo a medida que aumenta el tiempo de operación del sistema (García y Corzo, 2008).

Por otro lado, la normatividad ambiental vigente (resolución 0631 de 2015) no establece un valor máximo permisible en cuanto a fosfatos para el beneficio tradicional de café, sin embargo según la resolución 2115 de 2007 el valor máximo permisible para agua potable de este parámetro es 0,5 mg/L; lo cual sugiere que el valor promedio de salida reportado en la tabla 13 de 2,05 mg/L de fosfato es un valor bajo, ya que se trata de un agua residual con altas cargas contaminantes.

7.3.5 Nitritos

En la tabla 14 se presentan los parámetros estadísticos para la variable nitritos

Tabla 14. Datos estadísticos para nitritos a la entrada y salida del humedal

Muestras	nitritos (mg/l)		Remoción %
	Entrada	Salida	
2	5,50	0,10	98,18
3	0,48	0,09	81,25
4	0,19	0,10	47,36
6	1,65	0,10	93,93
PROMEDIO	1,95	0,097	80,18
DESVIACION ESTANDAR	2,44	0,005	23,02
COEFICIENTE DE VARIACIÓN	125,10%	5,10%	28,70%
MEDIANA	1,065	0,10	87,59
COEFICIENTE DE ASIMETRIA	1,63	-2	-1,46
MAXIMO DE ENTRADA	5,50		
MINIMO DE SALIDA		0,09	
DIFERENCIA DE PROMEDIOS ENTRADA Y SALIDA	1,85		

Fuente: Elaboración Propia

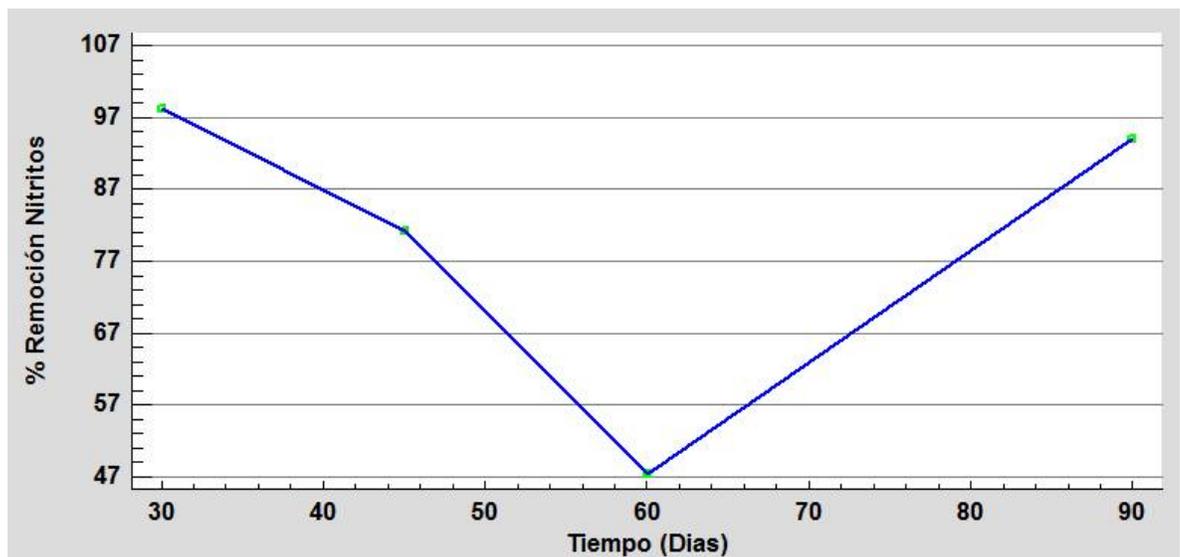


Figura 19. Comportamiento del porcentaje de remoción de nitritos

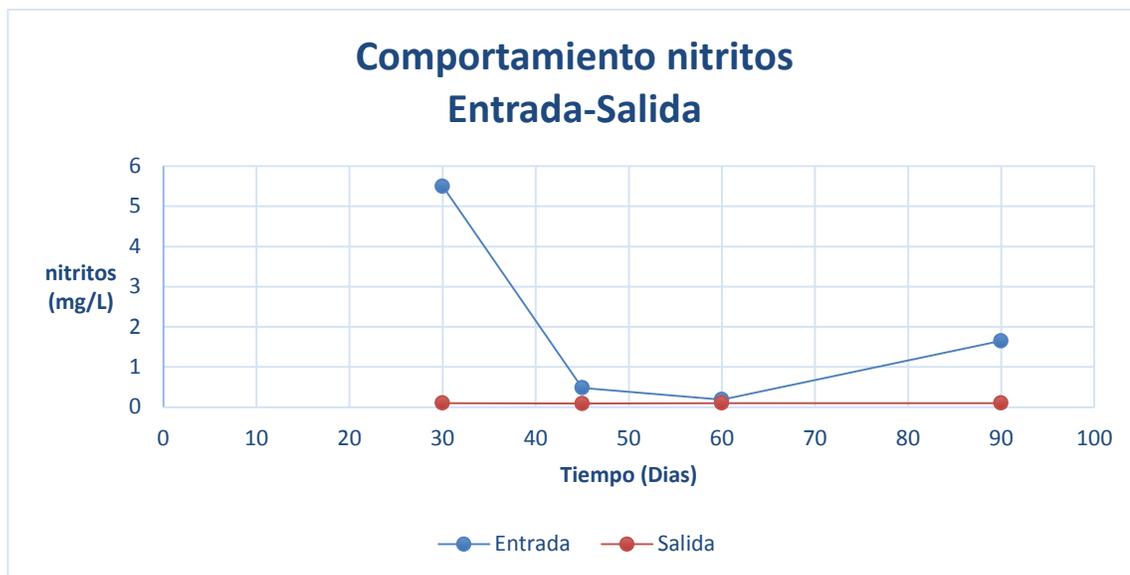


Figura 20. Comportamiento de Nitritos en la entrada y salida del humedal

En la figura 19 se aprecia el porcentaje de remoción para nitritos, donde se observa un comportamiento favorable para esta variable, confirmando esto con lo ilustrado en la tabla 14. Donde se tiene un promedio de remoción de 80,18% y una mediana de 87,59% tomando como base la mediana al ser un parámetro más resistente, es importante resaltar que la remoción más alta presentada por el sistema se da para esta variable, lo cual se puede corroborar con el coeficiente de asimetría de -1.46 que significa una tendencia acentuada a valores grandes de remoción, además el coeficiente de variación 28,7% es un valor aceptable, lo que permite inferir que el sistema es estable para la remoción de nitritos.

La remoción de nitritos se podría explicar al hecho de que en humedales construidos la eliminación de nitrógeno incluye diferentes mecanismos como: su utilización por los organismos del sistema (plantas y microorganismos), amonificación, nitrificación/denitrificación y adsorción en la matriz del sustrato. Estudios han demostrado que el mecanismo más importante de remoción es el proceso de nitrificación/denitrificación (Vymazal *et al.*, 2002). Sin embargo, según lo estudiado por Kadlec *et al.* (2000) en los humedales horizontales la nitrificación no es muy destacable, puesto que la transferencia de oxígeno es baja y hay pocas zonas aeróbicas.

Según lo descrito por Cervantes *et al.* (2000) los compuestos nitrogenados constituyen nutrimentos clave para el crecimiento de los seres vivos, así que el

nitrógeno puede ser eliminado del agua siempre que sea asimilado por microorganismos. Para las plantas, el nitrógeno es un nutrimento vital que utilizan en la síntesis de proteínas para su crecimiento.

Gómez & Segura (2008); & Li *et al.* (2009) concluyeron que las eliminaciones de nitrógeno amoniacal y de nitritos generalmente son altas en sistemas sembrados con *Phragmites australis.*, lo cual puede estar asociado a que las raíces de esta planta al ser más extensas y abundantes ofrecen una mayor área para la transferencia de oxígeno y formación de comunidades de microorganismos.

El comportamiento de entrada y salida al humedal respecto a los nitritos se aprecia en la figura 20. Donde se puede observar que la tendencia de los datos de entrada no es muy uniforme, debido a que los nitritos son muy inestables en agua residual y se oxidan fácilmente a nitratos (Montoya *et al.*, 2010). A diferencia de lo anterior los valores de salida presentan una tendencia más homogénea, donde se observa claramente que la concentración de estos disminuye, presentando un valor de salida en promedio de 0.09mg/L es decir se mantiene un nivel de nitritos muy bajo, tanto que está por debajo de los límites máximos permisibles por la resolución 2115 de 2007 en agua potable, el cual es de 0.1mg/L.

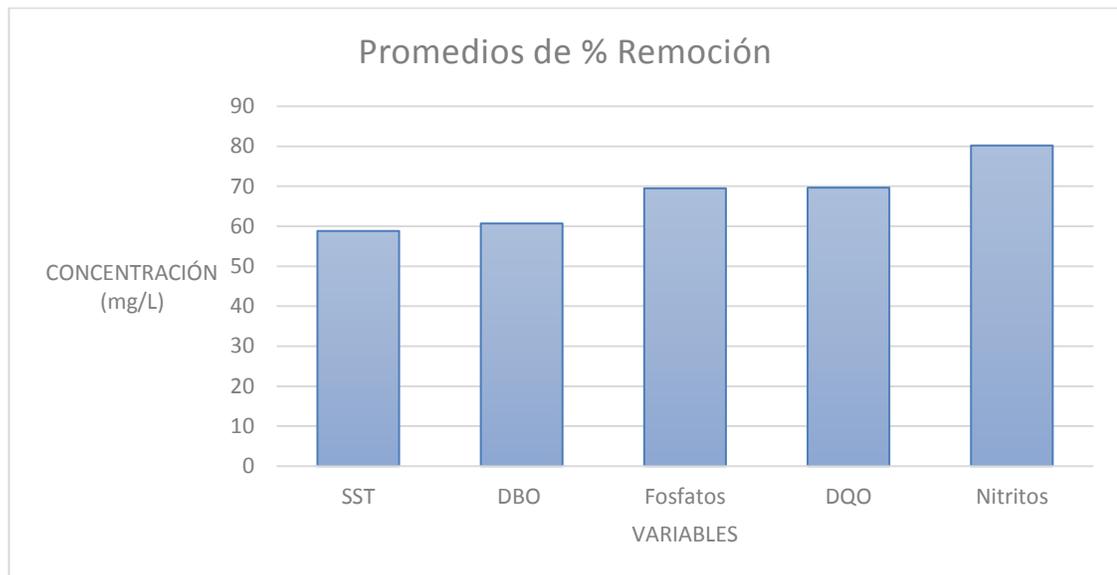


Figura 21. Promedios de porcentaje de remoción de las diferentes variables

7.4 COMPORTAMIENTO DE *PHRAGMITES AUSTRALIS*

Las plantas acuáticas desempeñan un papel muy importante en el tratamiento de aguas residuales en los humedales. La caña común (*Phragmites australis*) es una planta silvestre muy utilizada en la remoción y eliminación de sustancias que afectan los cuerpos de agua, ya que se propaga fácilmente de manera natural (Serna *et al.*, 2012). Gagnon *et al.* (2012) destacan la alta tasa de evapotranspiración de la planta al compararla con otras.

Considerando la alta carga contaminante y la acidez que presenta el afluente, en términos generales la adaptabilidad de *Phragmites australis* es aceptable, ya que de las 40 plantas sembradas, solo murieron 5 y aunque no se tuvo gran densidad foliar ni tampoco un crecimiento significativo de esquejes, se observó que los rizomas y las raíces penetraron profundamente en el lecho filtrante.

El papel de la vegetación en los humedales está determinado fundamentalmente por la penetración de las raíces y rizomas (hecho que ocurrido en esta investigación), lo que permite establecer la importancia de la presencia de la *Phragmites australis* en el humedal construido de flujo subsuperficial horizontal en cuanto a la remoción de materia orgánica y nutrientes, puesto que las plantas tienen la habilidad de transferir oxígeno desde la atmósfera a través de sus hojas y tallos hasta el medio donde se encuentran las raíces, dicho oxígeno crea regiones aerobias donde los microorganismos utilizan el oxígeno disponible para producir diversas reacciones de degradación de materia orgánica y procesos tales como la nitrificación/desnitrificación, además estabilizan el sustrato y dan lugar para la fijación de microorganismos (Arias, 2004).

7.5 REÚSO

Según la Resolución 1207 de 2014, se debe cumplir con los criterios de calidad con sus respectivos valores límites máximos permisibles, requeridos para el uso al que se va a destinar, para el uso agrícola el agua residual tratada deberá cumplir previamente los siguientes criterios de calidad, presentados en la tabla 15:

Tabla 15. Valores límites máximos permisibles para el reúso del agua

FÍSICOS		
pH	Unidades de pH	6,0-9,0
Conductividad	µS/cm	1.500,0
MICROBIOLÓGICOS		
Coliformes Termotolerantes	NMP/100 mL	1,0*E(+5)
Enterococos Fecales	NMP/100 mL	1,0*E(2)
Helmintos Parásitos Humanos	Huevos y Larvas/L	1,0
Protozoos Parásitos Humanos	Quistes/L	1,0
<i>Salmonella sp</i>	NMP/100 mL	1,0
QUÍMICOS		
Fenoles Totales	mg/L	1,5
Hidrocarburos Totales	mg/L	1,0
IONES		
Cianuro Libre	mg CN ⁻ /L	0,2
Cloruros	mg Cl ⁻ /L	300,0
Fluoruros	mg F ⁻ /L	1,0
Sulfatos	mg SO ₄ ²⁻ /L	500,0
METALES		
Aluminio	mg Al/L	5,0
Berilio	mg Be/L	0,1
Cadmio	mg Cd/L	0,01
Cinc	mg Zn/L	3,0
Cobalto	mg Co/L	0,05
Cobre	mg Cu/L	1,0
Cromo	mg Cr/L	0,1
Hierro	mg Fe/L	5,0
Mercurio	mg Hg/L	0,002
Litio	mg Li/L	2,5
Manganeso	mg Mn/L	0,2
Molibdeno	mg Mo/L	0,07
Níquel	mg Ni/L	0,2
Plomo	mg Pb/L	5,0
Sodio	mg Na/L	200,0
Vanadio	mg V/L	0,1
METALOIDES		
Arsénico	mg As/L	0,1
Boro	mg B/L	0,4
NO METALES		
Selenio	mg Se/L	0,02
OTROS PARÁMETROS		
Cloro Total Residual (con mínimo 30 minutos de contacto)	mg Cl ₂ /L	Menor a 1,0
Nitratos (NO ₃ -N)	mg/L	5,0

Fuente: resolución 1207 de 2014

Según los resultados arrojados por esta investigación, en promedio el pH del efluente proveniente del humedal construido es de 5,42U, el cual no se encuentra dentro del rango de valores permisibles según la tabla 15 para poder hacer un reúso de esta agua residual tratada.

En la tabla 15 se observa que se deben tener varios parámetros en cuenta para poder tomar una decisión acertada sobre el reúso o no del agua residual tratada, esta investigación no se centró en el reúso del efluente del humedal construido de flujo subsuperficial, por lo cual se recomienda realizar estudios de suelos y microbiológicos más afondo, ya que en la reutilización de aguas residuales, el factor que normalmente determina el grado de tratamiento necesario y el nivel de confianza deseado de los procesos y operaciones de tratamiento suele ser el uso para el que se destina el agua; en el caso del reúso agrícola, depende también de la permeabilidad y otras características del suelo y del tipo de cultivo (Gutiérrez, 2003).

Así mismo Madeiros, (2005), reporta que la presencia de ciertas formas de nutrientes en las aguas residuales beneficiaría más a algunos cultivos que a otros. Para la aplicación del reúso sobre un cultivo específico, se debe tener en cuenta aspectos como: la capacidad de asimilación de nutrientes, el consumo de agua, la presencia de iones tóxicos, la concentración relativa de sodio y el contenido de sales solubles, debido a que en ciertas condiciones climáticas puede salinizarse el suelo y modificarse la composición iónica, alterándole características como el desarrollo vegetativo y la productividad del mismo.

Por lo tanto no es posible asegurar que el agua residual tratada proveniente del humedal construido sea apta para ser reutilizada en el riego de cultivos, puesto que se requieren análisis más afondo tanto fisicoquímicos, microbiológicos y de suelo.

8. CONCLUSIONES

- El tratamiento secundario de efluentes provenientes del procesamiento del beneficio húmedo del café es viable realizarlo con humedales construidos de flujo subsuperficial horizontal, sembrados con la especie *Phragmites australis*, puesto que los porcentajes de remoción son aceptables, con tendencia a mejorar, además de los bajos costos de operación y mantenimiento requeridos por este tipo de sistema.
- El estudio realizado muestra que la *Phragmites australis* presenta valores altos de remoción en cuanto a materia orgánica (DQO 69,63% y DBO 54,54%), nutrientes (fosfatos 74.03% y nitritos 87.59%) y sólidos suspendidos totales (66.88%), los cuales pueden mejorar ya que la planta se encuentra en estado de crecimiento.
- Debido a que la planta utilizada en el sistema no se desarrolló completamente y la densidad foliar de esta no fue significativa, se espera que las eficiencias de remoción en las diferentes variables aumente con el tiempo, puesto que las raíces y rizomas de las plantas aun no penetran por completo en el medio, la biopelícula se encuentra en formación y su adherencia al medio granular no está bien establecida.
- Las remociones de las variables respuesta, se vieron afectadas debido a que el humedal construido no logró estabilizarse, atribuyendo lo anterior al corto tiempo de aclimatación del sistema.
- Con esta investigación no es posible asegurar que el efluente proveniente del humedal construido pueda ser utilizado en el riego de cultivos, ya que se necesitarían estudios más a fondo de variables fisicoquímicas, microbiológicas y de suelo.
- La intermitencia del afluente proveniente del beneficio húmedo del café, probablemente afecte el crecimiento de la especie vegetal utilizada y la biopelícula formada en el sistema, debido a que el humedal se diseñó para mantener un nivel de agua constante, además los tiempos de retención podrían variar.

- Las aguas residuales del lavado del café presentan una gran variabilidad en los valores del pH, explicado por la dinámica de formación de ácidos durante la etapa de fermentación, esta variación e inestabilidad del pH en el sistema es muy importante porque la actividad bacteriana es altamente vulnerable a los cambios de este, además de que en los humedales construidos este parámetro afecta los aspectos químicos y físicos del agua.
- Los valores de entrada al sistema en cuanto a materia orgánica y nutrientes mostro un comportamiento inestable, atribuyendo esto a los diferentes tipos de lavado que se le realizaron al café, mientras que en los valores de salida se observó un comportamiento más homogéneo y descendiente.

9. RECOMENDACIONES

- Se sugiere realizar estudios de tipo fisicoquímico, microbiológico y de suelos rigurosos y una investigación más a fondo para conocer si el efluente proveniente de este tipo de sistemas es apta o no para ser reutilizada en el riego de cultivos.
- Es importante realizar mediciones de las variables fisicoquímicas con mayor frecuencia y por un periodo de tiempo más prolongado (1 año), cuando el sistema haya alcanzado mayor estabilidad, de esta manera se tendrá más confiabilidad en los resultados obtenidos.
- Es importante que los tratamientos preliminares y primarios que preceden a un humedal construido presenten óptimas condiciones de diseño y funcionamiento, y así lograr las eficiencias esperadas con este tipo de sistemas
- Se debe realizar investigaciones complementarias como un estudio de trazadores, para estimar el tiempo de retención hidráulico real y el comportamiento del sistema, y de esta manera saber si existen afectaciones en la operación y puesta en marcha del humedal por estos factores
- Se recomienda tener en cuenta la evaluación de otros parámetros estipulados en la resolución 0631 de 2015 como grasas y aceites y color real; con el fin de determinar el comportamiento de dichos parámetros en este tiempo de sistemas.
- Se sugiere realizar análisis complementarios para determinar el comportamiento de la especie en estudio en cuanto a porcentajes de remoción de materia orgánica y nutrientes

BIBLIOGRAFÍA

- Arias S, Betancur M, Gómez G, Salazar J. Fitorremediación con humedales artificiales para el tratamiento de aguas residuales, Diciembre 2010. Informador Técnico (Colombia) Vol. 74, p 12 - 22.
- Arias C & Brix H. Humedales Artificiales para el tratamiento de aguas residuales. 3 de julio del año 2003. vol n° 13. Pags 17 – 24.
- Arias O. Estudio de la biodegradación de la materia orgánica en humedales construidos de flujo subsuperficial. Año 2004. Barcelona, España. Departamento de ingeniería hidráulica. N° Pág. 71. Universidad politécnica de Cataluña.
- Ascuntar R, Toro V. Estudios del comportamiento hidrodinámico de humedales de flujo subsuperficial para el tratamiento de aguas residuales domésticas. Universidad del Valle. Cali. Año 2007.
- Baptista, J.D.C., Donnelly, T., Rayne, D y Davenport, R. J. Microbial mechanisms of carbon removal in subsurface flow wetlands. Wat. Sci. febrero Del 2003. Tech. 48 (5), pp.127-134.
- Bernal F, Mosquera D, Maury H, Gonzales D, Guera R, Pomare A. Humedales Artificiales para el tratamiento de las aguas residuales en la corporación universitaria de la costa. Año 2003.
- Caselles- Osorio, A y García, J. Effect of physico-chemical pretreatment on the removal efficiency of horizontal subsurface-flow constructed wetlands. Environmental Pollution. Año 2007. Volumen 146(1) pag55-63.
- Cenicafé- Federación Nacional de Cafeteros. “Construyendo el modelo para la gestión integrada del recurso hídrico en la caficultura colombiana”. Chinchiná, Abril de 2011. Vol1 N°90.
- Cenicafé- Federación Nacional de Cafeteros. construya su tanque tina para la fermentación y lavado de café. Avances técnicos Cenicafé N° 408. Año 2011
- Cervantes- Carrillo F., Pérez J, Gómez J. Avances en la eliminación biológica del nitrógeno de las aguas residuales. Rev.Latinoam. Microbiol. 25 de abril del 2000. Tech. 42, pp.73-82

- Class M. Realización de una planta piloto de tratamiento descentralizada. Documentación e investigación de una pequeña planta técnico biológico para aguas residuales de la producción del café, desde la planeación hasta la optimización. Alemania. Año 2003
- Corporación Autónoma Regional del Cauca (CRC). Caracterización Ambiental Plan Departamental de Aguas y Saneamiento básico Departamento del Cauca. Popayán, Marzo de 2010. Vol1 N° pág. 159.
- Correa, G. Análisis de medidas repetidas, Medellín. Año 2004
- Dayna Y. Manual de Diseño: Humedal Construido para el Tratamiento de las Aguas Grises por Infiltración. Año 2005 Ciudad Santa Barbara. Vol. 2, N° pág 16.
- Del Real J & Islas J. Biodegradación anaerobia de las aguas generadas en el despulpa del café. Año 2010. Universidad Nacional de Colombia.
- Delgadillo O, Camacho A, Pérez L, Andrade M. Depuración de aguas residuales por medio de humedales artificiales. Centro Andino para la Gestión y Uso del Agua (Centro AGUA). Edición 1. Ciudad Cochabamba. Editorial: alfaEuropeaid. Año 2010. N° Pág. 115. ISBN: 978-99954-766-2-5.
- Donado, D, L. Estimación de la conductividad hidráulica de arenas por medio de la distribución de tamaños de poros. En: Seminario Nacional De Hidráulica E Hidrología. 2006, p. 213.
- EPA (Environmental Protection Agency). Folleto informativo de tecnología de aguas residuales- Humedales de flujo subsuperficial. 832-F-00-023. Año 2000.
- Federación Nacional de Cafeteros [FNC]. Aspectos de calidad del café para la industria torrefactora nacional. Colombia Bogotá. Año 2005. Vol 3, n° pág. 290.
- Federación Nacional de Cafeteros de Colombia. gerencia general. Informe del Gerente General al LI Congreso Nacional. Santafé de Bogotá, Año 1999. Vol2.
- FNC (Federación Nacional de Cafeteros). Características de la caficultura en el departamento del Cauca. Popayán.

- FNC (Federación Nacional de Cafeteros, Proyecto “Gestión Inteligente del Agua- GIA”. web map Centro nacional de Investigaciones de Café- CENICAFE. 8 de febrero del 2014.
- Fernández J, De Miguel E, De Miguel J, Fernández D. Manual de Fitodepuración. Filtros de Macrofitas en flotación. Edición 1. Ciudad de Madrid España. Editorial: Jesus Fernandez Gonzales catedratico de producción vegetal en la Universidad Politécnica de Madrid. Año 2008. N° Pág. 30.
- Gagnon, V.; Chazarenc, F.; Kõiv, M. and Brisson, J. (2012). "Effect of plant species on water quality at the outlet of a sludge treatment wetland". Water Research, vol. 46, No. 16 (October), pp. 5305-5315.
- García S. Mitigación del impacto ambiental que generan los residuos sólidos del beneficio de café a partir de la producción de abono orgánico. Año 2002 Guantanamo, país cuba. Unidad de Control y Gestión de Conocimiento (CATEDES).
- García J & Corzo A. Depuración con humedales construidos, Guía práctica de diseño, construcción y explotación de sistemas de humedales con flujo superficial. Edición N°1. País España. Noviembre 12 del 2008. Sujeto a licencia de Creative Commons. N° Pág. 108.
- García M, Cabezas A, Comí F. Utilización de humedales construidos de flujo superficial para el tratamiento de aguas residuales de origen urbano-industrial. Instituto pirenaico de ecología- CSIC. Zaragoza. Año 2009.
- Gómez C, Segura S. Estudio de humedales de flujo subsuperficial para el tratamiento de aguas residuales domésticas: Aplicación de modelos hidrodinámicos y macro cinéticos. Año 2008 Universidad del Valle. Cali.
- Gutiérrez, J. Reuso de agua y nutrientes. Centro de información, gestión y educación ambiental (Cigea). Año 2003.
- Islas, J. Tratamiento de aguas residuales provenientes del despulpado del café mediante fluido ruminal. Tesis profesional. Año 2008 Universidad Veracruzana, Xalapa, Veracruz. México.
- Kadlec R, Knight R, Vymazal J, Brix H, Cooper P, Haberl R. Constructed Wetlands for Pollution Control: Processes, Performance, Design and Operation. IWA. Specialist Group on use of Macrophytes in Water Pollution Control, IWA. Año 2000.

- Kadlec R & Wallace S. Treatment Wetlands. Boca Raton, Florida, Taylor & Francis Group Publishers. Año 2009.
- Karathanasis A, Potter C, Coyne M. Vegetation effects on fecal bacteria, BOD, and suspended solid removal in constructed wetlands treating domestic wastewater. University of Kentucky Ecology Engineering. 2003.
- Lara J. Depuración de aguas residuales municipales con humedales artificiales. Mayo de 1999. Trabajo final (Máster en Ingeniería y Gestión Ambiental). Instituto Catalán de Tecnología. Universidad Politécnica de Cataluña. Barcelona.
- Li T, Yang X, Lingli L, Ejazul I. Effects of zinc and cadmium interactions on root morphology and metal translocation in a hyperaccumulating species under hydroponic conditions. Año 2009 Journal of hazardous materials, 169.734-741.
- Llagas W & Guadalupe E. Diseño de humedales artificiales para el tratamiento de aguas residuales en la UNMSM. Año 2006. Revista del Instituto de Investigaciones FIGMMG Vol. 15, Nº 17, 85-96 (2006).
- Medeiros S, Soares P, Ferreira J, Neves A, De Mateos M. Utilización de agua residual de origen doméstico en agricultura: Estudio de alteraciones químicas. Revista brasileña de ingeniería agrícola y ambiental 9(4),603-612. Año 2005.
- Madera C, Silva J, Peña M. Sistemas combinados para el tratamiento de aguas residuales basados en tanque séptico - filtro anaerobio y humedales subsuperficiales. Año 2005 Instituto CINARA- universidad del Valle, Cali, Colombia.
- Martínez A. Evaluación y diseño de un humedal construido para la depuración de aguas residuales domésticas. Año 2014
- Metcalf & Eddy. Waste engineering: treatment and reuse. 4th ed. McGraw-Hill, Nueva York. 1819 p. Año 2003.
- Metcalf & Eddy, INC. Ingeniería de aguas residuales. Tratamiento, vertido y reutilización. Tercera edición. Volumen 2. México. Año 1996.
- Mena J. Depuración de aguas residuales con humedales artificiales: ventajas de los sistemas híbridos. Año 2006. Alquimia soluciones ambientales.
- MINAMBIENTE. Resolución 0631 de 2015, Por la cual se establecen los parámetros y los valores límites máximos permisibles en los vertimientos

puntuales a cuerpos de aguas superficiales y a los sistemas de alcantarillado público y se dictan otras disposiciones.

- MINAMBIENTE. Resolución 1207 de 2014, por la cual se adoptan disposiciones relacionadas con el uso de aguas residuales tratadas.
- MINAMBIENTE. Resolución 2115 de 2007. Por medio de la cual se señalan características, instrumentos básicos y frecuencias del sistema de control y vigilancia para la calidad de agua para consumo humano.
- Molina A & Villatoro R. Propuesta de tratamientos de aguas residuales en beneficios húmedos de café. (tesis de pregrado) Ciudad de Buenos Aires País Argentina. Universidad de Salvador. Facultad de ingeniería y arquitectura, escuela de ingeniería civil. Año 2006
- MOSQUERA, B y LARA, B. Tratamiento de lixiviados mediante humedales artificiales: revisión del estado del arte. Año 2012. Tumbaga.2012, n°, 7, p. 973-99. ISSN, 1909-4841.
- Montoya J, Ramirez J. Evaluación de la remoción de contaminantes en aguas residuales en humedales artificiales utilizando la Guadua Kunth. Universidad Tecnológica de Pereira. Facultad de Tecnología. Año 2010.
- Olvera J & Islas J. Biodegradación anaerobia de las aguas generadas en el despulpado del café. Año 2005. Revista Colombiana de Biotecnología.
- Osnaya Ruiz, M. Propuesta de diseño de un humedal artificial para el tratamiento de aguas residuales en la Universidad de la Sierra de Juárez. Ixtlán de Juárez. Trabajo de grado (Licenciado en Ciencias Ambientales). Universidad de la Sierra de Juárez. Año 2012.
- Otálora A. Evaluación del sistema de tratamiento de aguas residuales domésticas mediante humedales artificiales de alta tasa en la locación petrolera del caño Gandul. Universidad Nacional de Colombia. Año 2011. Bogotá.
- Pabón J, Sanz J, Oliveros C. Manejo del Café desmucilaginado Mecánicamente. Año 2009. Avances técnicos Cenicafé n°388.
- Patiño J, Zhinin F. Estudio comparativo de la capacidad depuradora de Pragmites Australis y Cyperus Papyrus en humedales artificiales para el

tratamiento de aguas residuales en el cantón santa Isabel. Universidad de Cuenca. Año 2015.

- Pedescoll, A; Uggetti, E; Llorens, E; Granés, F; Garcia, D; y Gracia, J. Practical method base don saturated hydraulic conductivity used to asses clogging in subsurface flow constructed wetlands, *Ecological Engineering*. 2009, p. 1216-1224.
- Porres C, Hagler M. Guia de prevención de la contaminación para el beneficio de café en el Salvador. *Environmental Pollution Prevention Project*. Año 2000.
- Puerta Q. Factores, procesos y controles en la fermentación del café. Año 2012. *Avances técnicos Cenicafé* N° 422.
- Quipuzco E. Evaluación del comportamiento de dos pantanos artificiales instalados en serie con *Phragmites Australis* para el tratamiento de aguas residuales domesticas. *Rev. Inst. Investig. Fac. Minas metal. Cienc. Geogr*, 5. 52-57. Año 2002.
- Reed S. *Natural Systems for Wastewater Treatment, Manual Of Practice FD-16*, Water Pollution Control Federation (WEF), Alexandria, Año1998.
- Rodríguez–Monroy J. y Durán de Bazúa C. Remoción de nitrógeno en un sistema de tratamiento de aguas residuales usando humedales artificiales de flujo vertical a escala de banco. Año 2006 *Tecnol. Ciencia Ed.* 21, 25–33.
- Romero M, Colín A, Sánchez E, Ortiz L. Tratamiento de aguas residuales por un sistema piloto de humedales artificiales: evaluación de la remoción de la carga orgánica. Año 2009 *Revista internacional de contaminación ambiental*, vol 23 n°3, México.
- Rossmanna M, Matos A, Abreu E, Silva F, Borges A. Effect of influent aeration on removal of organic matter from coffee processing wastewater in constructed wetlands. 2012. *Journal of Environmental Management* 128 (2012) 912-919.
- Rossmanna M, Matos A, Abreu E, Silva F, Borges A. Performance of constructed wetlands in the treatment of aerated coffee processing wastewater: Removal of nutrients and phenolic compounds. 2012. *Ecological Engineering* 49 (2012) 264-269.
- Salas A. Inventario de la situación actual de las aguas residuales domésticas en Colombia. *Sistemas integrados de tratamiento y uso de aguas residuales en*

América Latina: realidad y potencial. Lima Perú 2003. Cepis (Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente).

- Salazar M. Diagnóstico de la Sostenibilidad Ambiental de la Producción de Café en Colombia. Universidad de Manizales. Año 2008. Manizales- Caldas.
- Sanabria A. Alternativa innovadora de bajo costo para depurar aguas residuales en países en vía de desarrollo. Universidad Nacional de Colombia. Año 2006.
- Seidel K. New methods for groundwater recharge in Krefeld- Part 2: hydrobotanical treatment method, in German. 1965,p, 831-833.
- Selvamurugan M, Dorasaisamy M, Maheswari . An integrated treatment system for coffee processing wastewater using anaerobic and aerobic process. 2010 Ecological Engineering 36 (2010) 1686-1690.
- Serna J, Casas J, Peñuela G, Aguirre J. Respirimetria de *phragmites Australis* en presencia de materia orgánica disuelta y el xenobiótico clorotalonilo. Rev. EIA. Esc. Ing. Antioqui N° 18 Envigado. Año 2012.
- Silva J. Humedales construidos. Escuela de Ingeniería de Recursos Naturales y del Ambiente. Año 2000.
- Silva J, Torres P, Madera C. Reuso de aguas residuales doméstica en agricultuta. Una revisión. Agron. Colomb. Vol.26 N.2. Bogotá. Año 2008
- Stottmeiser U, Wiebner A , Kusch C. Effects of plants and microorganisms in constructed wetlands for wastewater treatment. Biotechnology Advances. 2003. Volumen 22(1-2), pag 93-117.
- Universidad del Cauca, Departamento de Hidraulica. Estudio y Patronamiento de orificios y boquillas. Practica III
- U.S. Environmental Protection Agency. Manual:Constructed Wetlands Treatment of Municipal Wastewater. 2000. EPA/525/R-99/010. US EPA Office of Research and Development.
- Vymazal J. The use of sub–surface constructed wetlands for wastewater treatment in the Czech Republic: 10 years experience. 2002. Ecol. Engin. 18, 633–646.

- Vymazal j, Brix h, Coope P, Green M, Haberl R. Constructed wetlands for wastewater treatment in Europe. Backhuys Publishers, Leiden, The Netherlands. 1998.
- Vyzamal J, Kropfelova L. Wastewater Treatment in Constructed Wetlands With Horizontal Sub-surface Flow. 1 ed. Springer. Dordrecht, Netherlands. 2008. pp 566
- Yalcuk, A. & Ugurlu A. Comparison of horizontal and vertical constructed wetland systems for landfill leachate treatment. 2009. Bioresource Technology., p.2521-26.
- Zambrano D & Rodríguez N. Los subproductos del café: fuente de energía renovable. Avances técnicos Cenicafé. Año 2010.
- Zambrano D, Rodríguez N, López U, Orozco P, Zambrano A. Tratamiento anaerobio de las aguas mieles del café. Boletín Técnico N° 29. Cenicafé. Año 2006.
- Zarate A, Duran C. Remoción de contaminantes en un sistema de humedales artificiales a escala de laboratorio. Año 2008 Tecnol Ciencia Ed. (IMIQ) 23(1): 15-22.
- Zarate A, Reyes L, Duran C. Remoción de fosforo en un sistema de humedales artificiales a escala de laboratorio. Facultad de Química, UNAM.. Año 2007
- Zayas P, Geissler G, Hernandez F. Chemical oxygen demand reduction in coffee wastewater through chemical flocculation and advanced oxidation processes. 2007. Journal of Environmental Sciences 19(2007) 300–305.
- Zuluaga J & Zambrano D. Manejo del Agua en el proceso de beneficio humedo del cafe para el control de la contaminación. *Avances técnicos CENICAFE N° 187*. Año 1993.

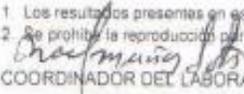
ANEXOS

Anexo 1. Resultados fisicoquímicos iniciales

 FACULTAD DE INGENIERIA LABORATORIO DE AGUAS DEL INSTITUTO CINARA		FORMATO	Versión: 1.0 Código: F-1. 3.03.01
Fecha de emisión: 09.09.2013		Título: INFORME DE RESULTADOS DE ENSAYOS	
Elaborado por: Edwin Fernando Benitez Barahona		Revisado por: Noel Muñoz Soto	Aprobado por: Director General
FECHA (dd.mm.aaaa): 09.02.2016		N° 0097	
Código interno de la muestra: FQ-ADI-0097-16		Fecha de recepción: 29.01.2016	
Fecha de muestreo: 29.01.2015	Hora de recepción: 10:04	Fecha realización de ensayos: 29.01.2016	
Muestreado por: Cliente	Lugar de muestreo: Vertimientos	Dirección:	
Empresa: Comité Departamental de Cafeteros del Cauca	Teléfono:	E-mail: ever.sandoval@cafedeocolombia.com.co	
Servicios solicitados por: Evert Sandoval		Ciudad:	
Descripción de la muestra: Vertimientos			
RESULTADOS DE LOS ENSAYOS DE CALIDAD DE AGUA			
PARÁMETRO	MÉTODO	CABIBIO, VEREDA PORVENIR	
DBO ₅ (mg/L)	Winkler	3780	
DQO (mg/L)	Reflujo Cerrado	11300	

DgM: Andrés Vargas

1. Los resultados presentados en este informe se refieren únicamente a los ensayos realizados a la muestra.
 2. Se prohíbe la reproducción parcial o total de este informe sin el consentimiento del laboratorio.


 COORDINADOR DEL LABORATORIO


 ANALISTA DE FÍSICOQUÍMICO

LABORATORIO DE AGUAS DEL INSTITUTO CINARA
 Cra 15 con Calle 75 Esquina, Puerto Mallarino
 Teléfono: 662 9505 - Telefax: 662 9488
 Correos electrónicos: clara.gonzalez@correounivalle.edu.co; noel.muñoz@correounivalle.edu.co

Anexo 2. Resultados Físicoquímicos muestra 1

 Cinara FACULTAD DE INGENIERIA LABORATORIO DE AGUAS DEL INSTITUTO CINARA	FORMATO	Versión	Código
		1.0	F-1. 3.03.01
Fecha de emisión: 09.09.2013		Página: 1 de 1	
Título: INFORME DE RESULTADOS DE ENSAYOS			
Elaborado por: Edwin Fernando Benitez Barahona	Revisado por: Noel Muñoz Soto	Aprobado por: Director General	

FECHA (dd.mm.aaaa):	02.08.2016	N° 0644
---------------------	------------	---------

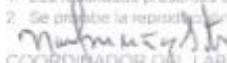
Código interno de la muestra: FQ-ADI 0644-16	Fecha de recepción: 25.07.2016
Fecha de muestreo: 25.07.2016	Hora de recepción: 09:15
Fecha realización de ensayos: 25.07.2016	
Muestreado por:	Lugar de muestreo: Finca el Pomoroso
Empresa: Comité departamental de Cafeteros del Cauca	Dirección:
Teléfono: 8232985 Ext. 180	E-mail: juan.ledezma@catedecolombia.com
Servicios solicitados por: Juan Camilo Ledezma	Ciudad: Popayan
Descripción de la muestra: Agua Residual Cafe	

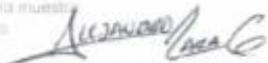
RESULTADOS DE LOS ENSAYOS DE CALIDAD DE AGUA		
PARÁMETRO	MÉTODO	AGUA RESIDUAL VERTIMIENTO DE CAFE
DQO (mg/L)	Reflujo Cerrado	4325
pH (Unidades de pH)	Potenciométrico	4.62
Sólidos Suspendidos Totales (mg/L)	Gravimétrico	200
Fosfatos (mg/L)	Espectrofotométrico	4.4
DBO ₅ (mg/L)	Winkler	2200
Nitratos (mg/L)	Espectrofotométrico	0.034

Digno Andrés Vargas

1. Los resultados presentes en este informe se refieren únicamente a los ensayos realizados a la muestra.

2. Se prohíbe la reproducción parcial o total de este informe sin el consentimiento del laboratorio.


COORDINADOR DEL LABORATORIO


ANALISTA DE FÍSICOQUÍMICO

LABORATORIO DE AGUAS DEL INSTITUTO CINARA

Cra 15 con Calle 75 Esquina, Puerto Mallarino

Teléfono: 662 9505 - Telefax: 662 9488

Correos electrónicos: clara.gonzalez@correounivalle.edu.co; noel.muñoz@correounivalle.edu.co

Anexo 3 Resultados Físicoquímicos muestra 2

 FACULTAD DE INGENIERIA LABORATORIO DE AGUAS DEL INSTITUTO CINARA	FORMATO	Versión: 1.0	Código: F-1. 3.03.01
		Página: 1 de 1	
Fecha de emisión: 09.09.2013		Título: INFORME DE RESULTADOS DE ENSAYOS	
Elaborado por: Edwin Fernando Benitez Barahona	Revisado por: Noel Muñoz Soto	Aprobado por: Director General	

FECHA (dd.mm.aaaa):	18.08.2016	N° 0691
---------------------	------------	---------

Código interno de la muestra: FQ-ADI-0691-16	Fecha de recepción: 09.08.2016	
Fecha de muestreo: 09.08.2016	Hora de Muestreo: 10:44	Fecha realización de ensayos: 09.08.2016
Muestreado por:	Lugar de muestreo: Finca el Pomoroso	Dirección:
Empresa: Comité departamental de Cafeteros del Cauca	Teléfono: 8232985 Ext. 180	E- mail: juan.ledezma@cafedecolombia.com
Servicios solicitados por: Juan Camilo Ledezma		Ciudad: Popayan
Descripción de la muestra: Agua Residual Café		

RESULTADOS DE LOS ENSAYOS DE CALIDAD DE AGUA

PARÁMETRO	MÉTODO	AGUA RESIDUAL ENTRADA	AGUA RESIDUAL SALIDA
DQO (mg/L)	Reflujo Cerrado	19300	3200
pH (Unidades de pH)	Potenciométrico	3,55	4,57
Sólidos Suspendidos Totales (mg/L)	Gravimétrico	2080	104
Fosfatos (mg/L)	Espectrofotométrico	18,6	1,8
DBOs (mg/L)	Winkler	9000	1450
Nitritos (mg/L)	Espectrofotométrico	5,50	0,10

Digitó: Andrés Vargas

1. Los resultados presentes en este informe se refieren únicamente a los ensayos realizados a la muestra.
2. Se prohíbe la reproducción parcial o total de este informe sin el consentimiento del laboratorio.

COORDINADOR DEL LABORATORIO

ANALISTA DE FÍSICOQUÍMICO

LABORATORIO DE AGUAS DEL INSTITUTO CINARA

Cra 15 con Calle 75 Esquina, Puerto Mallarino

Teléfono: 662 9505 - Telefax: 662 9488

Correos electrónicos: clara.gonzalez@correounivalle.edu.co; noel.munoz@correounivalle.edu.co

Anexo 4 Resultados Fisicoquímicos muestra 3

 FACULTAD DE INGENIERIA LABORATORIO DE AGUAS DEL INSTITUTO CINARA	FORMATO	Versión:	Código:
		1.0	F-1. 3.03.01
		Página:	1 de 1
Fecha de emisión: 09.09.2013		Título: INFORME DE RESULTADOS DE ENSAYOS	
Elaborado por: Edwin Fernando Benitez Barahona	Revisado por: Noel Muñoz Soto	Aprobado por: Director General	

FECHA (dd.mm.aaaa):	02.09.2016	N° 0735
---------------------	------------	---------

Código interno de la muestra: FQ-ADI-0735-16		Fecha de recepción: 22.08.2016	
Fecha de muestreo: 22.08.2016	Hora de Muestreo: 10:08	Fecha realización de ensayos: 22.08.2016	
Muestreado por:	Lugar de muestreo: Finca el Pomorroso	Dirección:	
Empresa: Comité departamental de Cafeteros del Cauca	Teléfono: 8232985 Ext. 180	E- mail: juan.ledezma@cafedecolombia.com	
Servicios solicitados por: Juan Camilo Ledezma		Ciudad: Popayan	
Descripción de la muestra: Agua Residual Café			
RESULTADOS DE LOS ENSAYOS DE CALIDAD DE AGUA			
PARÁMETRO	MÉTODO	AGUA RESIDUAL ENTRADA	AGUA RESIDUAL SALIDA
DQO (mg/L)	Reflujo Cerrado	5200	1600
pH (Unidades de pH)	Potenciométrico	4,01	4,85
Sólidos Suspendidos Totales (mg/L)	Gravimétrico	196	120
Fosfatos (mg/L)	Espectrofotométrico	3,8	2,3
DBOs (mg/L)	Winkler	1450	800
Nitritos (mg/L)	Espectrofotométrico	0,48	0,09

Digitó: Andrés Vargas

1. Los resultados presentes en este informe se refieren únicamente a los ensayos realizados a la muestra.
2. Se prohíbe la reproducción parcial o total de este informe sin el consentimiento del laboratorio.

COORDINADOR DEL LABORATORIO

ANALISTA DE FISICOQUIMICO

LABORATORIO DE AGUAS DEL INSTITUTO CINARA

Cra 15 con Calle 75 Esquina, Puerto Mallarino

Teléfono: 662 9505 - Telefax: 662 9488

Correos electrónicos: clara.gonzalez@correounivalle.edu.co; noel.munoz@correounivalle.edu.co

Anexo 5 Resultados Fisicoquímicos muestra 4

 Cinara FACULTAD DE INGENIERIA LABORATORIO DE AGUAS DEL INSTITUTO CINARA	FORMATO	Versión:	Código:
		1.0	F-1. 3.03.01
		Página:	1 de 1
Fecha de emisión: 09.09.2013		Título: INFORME DE RESULTADOS DE ENSAYOS	
Elaborado por: Edwin Fernando Benitez Barahona	Revisado por: Noel Muñoz Solo	Aprobado por: Director General	

FECHA (dd.mm.aaaa):	20.09.2016	N° 0766
---------------------	------------	---------

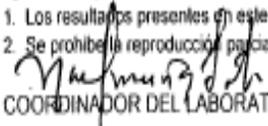
Código interno de la muestra: FQ-ADI-0766-16		Fecha de recepción: 02.09.2016
Fecha de muestreo: 02.09.2016	Hora de Muestreo: 09:458	Fecha realización de ensayos: 02.09.2016
Muestreado por:	Lugar de muestreo: Finca el Pomorroso	Dirección:
Empresa: Comité departamental de Cafeteros del Cauca	Teléfono: 8232985 Ext. 180	E- mail: juan.ledezma@cafedecolombia.com
Servicios solicitados por: Juan Camilo Ledezma		Ciudad: Popayan
Descripción de la muestra: Agua Residual Café		

RESULTADOS DE LOS ENSAYOS DE CALIDAD DE AGUA

PARÁMETRO	MÉTODO	AGUA RESIDUAL ENTRADA	AGUA RESIDUAL SALIDA
DQO (mg/L)	Reflujo Cerrado	2200	1000
pH (Unidades de pH)	Potenciométrico	4,32	4,99
Sólidos Suspendidos Totales (mg/L)	Gravimétrico	93	91
Fosfatos (mg/L)	Espectrofotométrico	3,5	1,2
DBOs (mg/L)	Winkler	1100	500
Nitritos (mg/L)	Espectrofotométrico	0,19	0,10

Digitó: Andrés Vargas

- Los resultados presentes en este informe se refieren únicamente a los ensayos realizados a la muestra
- Se prohíbe la reproducción parcial o total de este informe sin el consentimiento del laboratorio.


COORDINADOR DEL LABORATORIO


ANALISTA DE FÍSICOQUÍMICO

LABORATORIO DE AGUAS DEL INSTITUTO CINARA

Cra 15 con Calle 75 Esquina, Puerto Mallarino

Teléfono: 662 9505 - Telefax: 662 9488

Correos electrónicos: clara.gonzalez@correounivalle.edu.co; noel.munoz@correounivalle.edu.co

Anexo 6 Resultados Fisicoquímicos muestra 5

 FACULTAD DE INGENIERIA LABORATORIO DE AGUAS DEL INSTITUTO CINARA	FORMATO	Versión:	Código:
		1.0	F-1. 3.03.01
Fecha de emisión: 09.09.2013		Título: INFORME DE RESULTADOS DE ENSAYOS	
Elaborado por: Edwin Fernando Benitez Barahona	Revisado por: Noel Muñoz Solo	Aprobado por: Director General	

FECHA (dd.mm.aaaa):	22.09.2016	N° 0798
---------------------	------------	---------

Código interno de la muestra: FQ-ADI-0798-16		Fecha de recepción: 13.09.2016
Fecha de muestreo: 13.09.2016	Hora de Muestreo: 09:37	Fecha realización de ensayos: 13.09.2016
Muestreado por:	Lugar de muestreo: Finca el Pomoroso	Dirección:
Empresa: Comité departamental de Cafeteros del Cauca	Teléfono: 8232985 Ext. 180	E- mail: juan.ledezma@cafedecolombia.com
Servicios solicitados por: Juan Camilo Ledezma		Ciudad: Popayan
Descripción de la muestra: Agua Residual Café		

RESULTADOS DE LOS ENSAYOS DE CALIDAD DE AGUA

PARÁMETRO	MÉTODO	AGUA RESIDUAL
DQO (mg/L)	Reflujo Cerrado	4500
pH (Unidades de pH)	Potenciométrico	6,84
Sólidos Suspendidos Totales (mg/L)	Gravimétrico	8
Fosfatos (mg/L)	Espectrofotométrico	3,2
DBOs (mg/L)	Winkler	2000
Nitritos (mg/L)	Espectrofotométrico	0,100

Digito: Andrés Vargas

1. Los resultados presentes en este informe se refieren únicamente a los ensayos realizados a la muestra.
2. Se prohíbe la reproducción parcial o total de este informe sin el consentimiento del laboratorio.

COORDINADOR DEL LABORATORIO

ANALISTA DE FISICOQUIMICO

LABORATORIO DE AGUAS DEL INSTITUTO CINARA

Cra 15 con Calle 75 Esquina, Puerto Mallarino

Teléfono: 662 9505 - Telefax: 662 9488

Correos electrónicos: clara.gonzalez@correounivalle.edu.co; noel.muñoz@correounivalle.edu.co

Anexo 7 Resultados Fisicoquímicos muestra 6

 Cinara FACULTAD DE INGENIERIA LABORATORIO DE AGUAS DEL INSTITUTO CINARA	FORMATO	Versión: 1.0	Código: F-1. 3.03.01
		Página: 1 de 1	
Fecha de emisión: 09.09.2013		Título: INFORME DE RESULTADOS DE ENSAYOS	
Elaborado por: Edwin Fernando Benítez Barahona	Revisado por: Noel Muñoz Soto	Aprobado por: Director General	

FECHA (dd.mm.aaaa):	28.09.2016	N° 0836
---------------------	------------	---------

Código interno de la muestra: FQ-ADI-0836-16		Fecha de recepción: 22.09.2016
Fecha de muestreo: 22.09.2016	Hora de Muestreo: 09:40	Fecha realización de ensayos: 22.09.2016
Muestreado por:	Lugar de muestreo: Finca el Pomoroso	Dirección:
Empresa: Comité departamental de Cafeteros del Cauca	Teléfono: 8232985 Ext. 180	E- mail: juan.ledezma@cafedecolombia.com
Servicios solicitados por: Juan Camilo Ledezma		Ciudad: Popayan
Descripción de la muestra: Agua Residual Café		

RESULTADOS DE LOS ENSAYOS DE CALIDAD DE AGUA

PARÁMETRO	MÉTODO	AGUA RESIDUAL
DQO (mg/L)	Reflujo Cerrado	2800
pH (Unidades de pH)	Potenciométrico	7,29
Sólidos Suspendidos Totales (mg/L)	Gravimétrico	5
Fosfatos (mg/L)	Espectrofotométrico	3,0
DBOs (mg/L)	Winkler	1300
Nitritos (mg/L)	Espectrofotométrico	0,100

Digitó: Andrés Vargas

1. Los resultados presentes en este informe se refieren únicamente a los ensayos realizados a la muestra.
2. Se prohíbe la reproducción parcial o total de este informe sin el consentimiento del laboratorio.

COORDINADOR DEL LABORATORIO

ANALISTA DE FISICOQUIMICO

LABORATORIO DE AGUAS DEL INSTITUTO CINARA

Cra 15 con Calle 75 Esquina, Puerto Mallarino

Teléfono: 662 9505 - Telefax: 662 9488

Correos electrónicos: clara.gonzalez@correounivalle.edu.co; noel.munoz@correounivalle.edu.co