



Construya y opere un humedal artificial para el postratamiento de las aguas residuales de su finca cafetera

Nelson Rodríguez V. ■ Laura Vanessa Quintero Y. ■ Samuel A. Castañeda





Construya y opere un humedal artificial para el postratamiento de las aguas residuales de su finca cafetera

Nelson Rodríguez V.* Laura Vanessa Quintero Y. ** Samuel A. Castañeda***

* Nelson Rodríguez V., Investigador Científico III, Poscosecha. Centro Nacional de Investigaciones de Café. Cenicafé. <https://orcid.org/0000-0003-0897-4013>

** Laura Vanessa Quintero Y., Investigador Científico I, Poscosecha. Centro Nacional de Investigaciones de Café. Cenicafé. <https://orcid.org/0000-0002-9982-7790>

*** Samuel Castañeda, Auxiliar de Investigación, Poscosecha. Centro Nacional de Investigaciones de Café. Cenicafé.

Como citar:

Rodríguez-Valencia, N., Quintero-Yepes, L., & Castañeda, S. A. (2022).

Construya y opere un humedal artificial para el postratamiento de las aguas residuales de su finca cafetera. Cenicafé.

<https://doi.org/10.38141/cenbook-0013>



Comité Nacional

Ministro de Hacienda y Crédito Público
José Manuel Restrepo Abondano

Ministro de Agricultura y Desarrollo Rural
Rodolfo Enrique Zea Navarro

Ministro de Comercio, Industria y Turismo
María Ximena Lombana Villalba

Director del Departamento Nacional de Planeación
Luis Alberto Rodríguez Ospino

Representante del Gobierno en Asuntos Cafeteros
Marcela Urueña Gómez

Período 1° enero/2019 - 31 diciembre/2022
José Eliecer Sierra Tejada (Antioquia)
José Alirio Barreto Buitrago (Boyacá)
Eugenio Vélez Uribe (Caldas)
Danilo Reinaldo Vivas Ramos (Cauca)
Juan Camilo Villazón Tafur (Cesar-Guajira)
Javier Bohórquez Bohórquez (Cundinamarca)
Ruber Bustos Ramírez (Huila)
Javier Mauricio Tovar Casas (Magdalena)
Jesús Armando Benavides Portilla (Nariño)
Armando Amaya Álvarez (Norte de Santander)
Carlos Alberto Cardona Cardona (Quindío)
Luis Miguel Ramírez Colorado (Risaralda)
Héctor Santos Galvis (Santander)
Luis Javier Trujillo Buitrago (Tolima)
Camilo Restrepo Osorio (Valle)

Gerente General
Roberto Vélez Vallejo

Gerente Administrativo y Financiero
Juan Camilo Becerra Botero

Gerente Comercial
Juan Camilo Ramos Mejía

Gerente Técnico
Hernando Duque Orrego

Director Investigación Científica y Tecnológica
Álvaro León Gaitán Bustamante

Créditos

Comité Editorial

Pablo Benavides M.
Ph.D. Ing. Agrónomo. Entomología, Cenicafé

Carmenza Esther Góngora B.
Ph.D. Microbióloga. Entomología, Cenicafé

José Ricardo Acuña Z.
Ph.D. Biólogo. Fisiología Vegetal, Cenicafé

Diana María Molina V.
Ph.D. Bacterióloga. Mejoramiento Genético, Cenicafé

Luis Fernando Salazar G.
Ph.D. Ing. Agrónomo. Suelos, Cenicafé

Sandra Milena Marín L.
Secretaría Técnica Comité Editorial, revisión de textos y corrección de estilo M.Sc., Esp., Ing. Agrónoma. Divulgación y Transferencia, Cenicafé

Diseño y diagramación
Carmenza Bacca R.
Luz Adriana Álvarez M.

Fotografías
Archivo Cenicafé

Impresión

ISBN 978-958-8490-57-1
ISBN 978-958-8490-58-8 (En línea)
DOI 10.38141/cenbook-0013

2022 - FNC - Cenicafé - FoNC



Contenido

Presentación	5
Introducción	7
Humedales naturales y artificiales	9
Vegetación propia de los humedales	27
Diseño de humedales artificiales	45
Construcción de humedales artificiales	71
Operación y mantenimiento de los humedales artificiales	79
Eficiencia de los humedales artificiales en el postratamiento de aguas residuales	87
Ejemplos de aprovechamiento de la biomasa generada en los humedales artificiales	91
Consideraciones finales	105
Literatura citada	107

Agradecimientos

Al Técnico Uriel López Posada y a los auxiliares Huberto Tobón Arcila y Gloria Piedad Álzate.

Presentación

Un humedal artificial consiste en una laguna impermeabilizada, con una profundidad inferior a un metro, que puede estar empacada con grava, a la que se conducen las aguas residuales tratadas y en la cual se siembran diferentes tipos de plantas con capacidad para crecer en condiciones de alta humedad y de eliminar contaminantes orgánicos e inorgánicos, aún presentes en ellas, ya sea provenientes de la vivienda cafetera o del proceso de beneficio del café, permitiendo realizarles un tratamiento posterior, con el fin de mejorar su calidad, antes de ser descargadas al suelo o a cuerpos de agua superficiales.

Los humedales artificiales están aprobados por el Reglamento Técnico de Agua Potable y Saneamiento Básico (RAS) de Colombia (Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio. Resolución 0330 de 2017) para el postratamiento de las aguas residuales tratadas, como una solución apropiada desde el punto de vista técnico-económico, para las zonas rurales, con el fin de que se alcancen los parámetros de calidad exigidos por la normativa colombiana para vertimientos, sobre todo cuando las aguas tratadas son vertidas a cuerpos de agua superficiales, que posteriormente se utilizan para el abastecimiento humano.

Otra de las aplicaciones de los humedales para el postratamiento de las aguas residuales de las fincas cafeteras, está relacionada cuando sobre el vertimiento rige una normativa local, adicional a la establecida de forma general, por el Estado Colombiano, que es aún más restrictiva respecto al contenido de contaminantes presentes en las aguas residuales tratadas, sobre todo cuando se busca recuperar la calidad y la cantidad del agua superficial en cuerpos de agua en cuencas priorizadas, de acuerdo a lo establecido en el decreto 1640 del 2012 (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible [MADS], 2012), relacionado con los Planes de Ordenamiento en el Manejo de Cuencas (POMCA).

En esta publicación se presentan los pasos para el diseño, dimensionamiento, construcción, operación y mantenimiento de los humedales artificiales para el postratamiento de las aguas residuales generadas en las fincas cafeteras (tanto las aguas residuales provenientes de la vivienda, como las aguas residuales provenientes del proceso de beneficio del café), de forma que los efluentes de los humedales puedan cumplir con los requerimientos de calidad exigidos en la normativa legal vigente.

De igual forma, en la presente publicación se exponen las ventajas y desventajas de los diferentes tipos de humedales artificiales, con base en el comportamiento hidráulico, el tipo de material vegetal sembrado y las características del agua residual a postratar. Se ilustra el paso a paso del diseño, con ejemplos prácticos, y el paso a paso para la construcción de los humedales, la siembra del material vegetal, su operación y mantenimiento, y el aprovechamiento de la biomasa generada.

Finalmente, se presentan los resultados de las investigaciones realizadas en Cenicafé utilizando humedales artificiales para el postratamiento de las aguas residuales del beneficio del café tratadas anaeróbicamente y los resultados del aprovechamiento de la biomasa residual para la producción de hongos comestibles y para la elaboración de abonos orgánicos.

Introducción

Los humedales son terrenos inundados con profundidades de agua, normalmente inferiores a 0,6 m y con plantas emergentes como espadañas, juncos y enneas, o plantas flotantes como el buchón de agua, la lechuga de agua, la lenteja de agua, entre otras. La vegetación proporciona superficies para la formación de películas bacterianas, facilita la filtración y la adsorción de los contaminantes del agua residual, permite la transferencia de oxígeno a la columna de agua y controla el crecimiento de algas al limitar la penetración de la luz solar (Metcalf & Eddy, 1995).

Los humedales forman parte de los sistemas de tratamiento natural, los cuales se caracterizan por la interacción del agua con el suelo, las plantas, los microorganismos y la atmósfera, en el medio ambiente natural, generándose procesos físicos, químicos y biológicos que permiten la depuración de las aguas residuales. (Metcalf & Eddy, 1995).

Además de los humedales, forman parte de los sistemas de tratamiento natural, los sistemas de aplicación al suelo de baja carga, como lo son el riego, la escorrentía sobre cubierta vegetal y la infiltración – percolación, los cuales contemplan la aplicación del agua residual sobre un terreno con vegetación para conseguir tanto el grado necesario de tratamiento del agua como el crecimiento de la vegetación existente (Metcalf & Eddy, 1995).

Los humedales junto a los tratamientos mediante plantas acuáticas flotantes, forman parte de los sistemas acuáticos para el manejo de las aguas residuales. Los humedales pueden ser naturales o artificiales, creados por el hombre, simulando las características de los humedales naturales, con el fin de realizar el postratamiento de diversos tipos de aguas residuales, como son: domésticas, industriales, agrícolas, de producción animal, de escorrentía y lixiviados de rellenos sanitarios, entre otras.

En Estados Unidos, en las últimas décadas, se han creado humedales artificiales con el propósito específico de depurar aguas residuales. Estos sistemas se han empleado casi exclusivamente para el tratamiento terciario de efluentes domésticos o industriales, siendo las principales especies utilizadas *Scirpus sp.*, *Typha sp.*, *Eleocharis sp.* e *Iris sp.* Otro aspecto que se ha considerado es la posibilidad de utilizar *Typha sp.* en la depuración de los vertidos ácidos

de las explotaciones mineras, ya que esta planta es capaz de tolerar pH muy bajo y acumular en sus tejidos altas concentraciones de metales pesados (Martín, 1993).

De acuerdo con la Environmental Protection Agency United States [U.S.EPA] (1988), la eficiencia de remoción de humedales naturales, tratando aguas residuales, es del orden del 70% al 96% para la Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO_5), entre el 60% y el 90% para los Sólidos Solubles Totales (SST) y entre el 40% y el 90% para el Nitrógeno Total (N_T) y las eficiencias de remoción promedio en humedales artificiales son del orden del 74% para la DBO_5 (variando entre 64% y el 86%) y del 77% para los SST (variando entre el 28% y el 93%), comprobando la eficiencia de este tipo de sistemas de tratamiento para la remoción de carga orgánica.

Los humedales artificiales pueden ser utilizados por los caficultores para el postratamiento de las aguas residuales de las viviendas y del beneficio del café, con el fin de mejorar la calidad del agua tratada y dar cumplimiento a las exigencias establecidas en la normativa colombiana en la Resolución 1256 del 2021 por la cual se reglamenta el uso de las aguas residuales (MADS, 2021), en la Resolución 631 del 2015 sobre vertimientos a cuerpos de agua (MADS, 2015), en el Decreto 50 del 2018 sobre vertimientos al suelo (MADS, 2018), y en la Resolución 0699 del 2021 sobre vertimientos de aguas residuales domésticas tratadas al suelo (MADS, 2021).



Humedales naturales y artificiales

Los humedales naturales, desde el punto de vista normativo, se consideran cuerpos de agua receptores y, por lo tanto, los vertidos a ellos están condicionados por la normativa ambiental local. El principal objetivo de los vertidos a los humedales naturales debe ser la mejora del hábitat existente (Metcalf & Eddy, 1995).

Los humedales artificiales son aquellos construidos por el hombre, que simulan todas las características de las tierras húmedas naturales y ofrecen una alternativa para el tratamiento de aguas residuales, con respecto a los sistemas de tratamiento convencionales, dado que son relativamente económicos de construir y operar, de fácil mantenimiento y, adicionalmente, proporcionan un tratamiento efectivo y confiable para las aguas residuales, por ser relativamente tolerantes a las fluctuaciones hidrológicas y a las velocidades de cargas contaminantes (Hammer, 1991).

La reducción o eliminación de contaminantes de las aguas residuales, por medio de procesos biológicos y fisicoquímicos, en los que participan las plantas del propio ecosistema acuático, se conoce con el nombre de fitodepuración, y ocurre naturalmente en los ecosistemas que reciben aguas contaminadas y, junto a la denominada autodepuración de las aguas, ha sido el procedimiento clásico de recuperación de la calidad del agua. Este proceso ocurre tanto en humedales naturales como en humedales artificiales (Curt, 2004).

Los humedales artificiales son sistemas de fitodepuración de aguas residuales y consisten normalmente en un monocultivo o policultivo de plantas superiores (macrófitas) dispuestas en lagunas, tanques o canales impermeabilizados poco profundos (Figura 1). El agua residual, después de recibir un pre-tratamiento, pasa a través del humedal durante un tiempo de retención determinado y es tratada a través de varios procesos físico-químicos y microbiológicos.



Figura 1. Humedales artificiales con policultivos para el postratamiento de las aguas residuales del café.

El oxígeno necesario para estos procesos es suministrado por las propias plantas, a través de la fotosíntesis, o lo toman del aire y lo inyectan hasta la zona de raíces. La transferencia de oxígeno hacia la zona radical por parte de estas plantas acuáticas es un requisito imprescindible para que la eliminación microbiana de algunos contaminantes se realice con eficacia, estimulando además la degradación de materia orgánica y el crecimiento de bacterias nitrificantes. Los mecanismos que tienen lugar para la depuración de contaminantes constituyen una gran variedad de procesos físicos, químicos y biológicos (Fernández, 2004).

Componentes de un humedal

Los humedales están constituidos básicamente por cuatro elementos a saber (Figura 2):

1. Depósito impermeabilizado por el que transita el agua residual
2. Dispositivos de entrada y salida del agua residual
3. Agua residual a tratar
4. Vegetación

Adicional, para humedales cuyo espejo de agua no está expuesto a la atmósfera, se requiere de un medio filtrante.



Figura 2. Componentes de un humedal artificial. Fuente: Adaptado de Organización de las Naciones Unidas [ONU-HABITAT] (2008).

Depósito impermeabilizado por el que transita el agua residual. Se refiere a una excavación tipo canal o tipo laguna, impermeabilizada o a un depósito construido en mampostería en ladrillo o en polietileno que permita contener y retener el agua residual, sin que esta se infiltre, durante el tiempo necesario para que ocurran los diferentes procesos de depuración.

Dispositivos de entrada y salida del agua residual. Son las estructuras de entrada y salida del agua residual, con las cuales se logra que la distribución y recolección de aguas residuales sea homogénea.

Agua residual a tratar. Para el caso de las fincas cafeteras, se refiere a las aguas residuales domésticas generadas en la vivienda y provenientes del Filtro Anaeróbico de Flujo Ascendente (FAFA), antes de ser llevadas al campo de infiltración o descargarlas a una fuente hídrica, y a las aguas residuales generadas en el proceso de beneficio del café, provenientes de algún tratamiento físico, químico o biológico, antes de ser descargadas al suelo o a una fuente de agua superficial.

Vegetación. En los humedales, la vegetación está conformada por macrófitas que contribuyen a la oxigenación del agua residual y a la eliminación de nutrientes. La vegetación que se emplea en este tipo de humedales es la misma que coloniza los humedales naturales. Se trata de plantas acuáticas emergentes como carrizos, juncos, enneas y espadañas, entre otras, que son especies anfíbias que se desarrollan en aguas poco profundas, arraigadas al subsuelo o bien flotando en la superficie del agua (Salas et al., 2007).

Medio filtrante. En los humedales, el medio filtrante está formado por grava. La principal característica del medio es que debe tener la permeabilidad suficiente para permitir el paso del agua a través de él. El medio filtrante sirve de soporte a la vegetación, permitiendo la fijación de la población microbiana, que participa en la mayoría de los procesos de eliminación de los contaminantes presentes en las aguas (Sánchez, 2013).

Clasificación de los humedales artificiales

Los sistemas de humedales se describen típicamente por la posición de la superficie del agua y el tipo de vegetación presente (U.S.EPA, 2000). Los humedales pueden clasificarse en sistemas de flujo horizontal, de flujo vertical y combinados.

Humedales artificiales de flujo horizontal. Existen dos tipos de humedales artificiales de flujo horizontal desarrollados para el tratamiento de aguas residuales: sistemas de flujo libre (SHFL) y sistemas de flujo subsuperficial (SHFS) (Metcalf & Eddy, 1995).

Ventajas de los humedales artificiales (U.S.EPA, 2000)

1. Proporcionan tratamiento efectivo y minimizan la necesidad de equipos mecánicos, electricidad y monitoreo, por parte de operadores calificados.
2. Son menos costosos de construir, operar y mantener que los procesos convencionales de tratamiento diseñados para un nivel equivalente de calidad de efluente.
3. La operación a nivel de tratamiento secundario es posible durante todo el año, con excepción de los climas más fríos.
4. La operación a nivel de tratamiento terciario avanzado es posible durante todo el año en climas cálidos o semicálidos. La configuración de los humedales de flujo subsuperficial proporciona una mayor protección térmica que los humedales de flujo libre.
5. Los sistemas de humedales proporcionan una adición valiosa al “espacio verde” de la comunidad, e incluye la incorporación de hábitat de vida silvestre y oportunidades para recreación pública.
6. Los sistemas de humedales no producen biosólidos ni lodos residuales que requerirían tratamiento subsiguiente y disposición.
7. Son muy efectivos en la remoción de la Demanda Biológica de Oxígeno (DBO), la Demanda Química de Oxígeno (DQO), los Sólidos Suspendidos Totales (SST), metales y algunos compuestos orgánicos y microorganismos patógenos de las aguas residuales domésticas. La remoción de nitrógeno y fósforo a bajos niveles también es posible, pero se requiere de un tiempo de retención mucho mayor.

Desventajas de los humedales artificiales (U.S.EPA, 2000)

1. Requieren un área extensa en comparación con los sistemas mecánicos convencionales de tratamiento.
2. En climas fríos las bajas temperaturas durante el invierno reducen la tasa de remoción de la Demanda Biológica de Oxígeno (DBO), el nitrógeno amoniacal ($N-NH_3$) y el nitrógeno nítrico ($N-NO_3$).
3. La mayoría del agua contenida en los humedales artificiales es esencialmente anóxica, limitando el potencial de nitrificación rápida del amoníaco.
4. Los humedales no pueden ser diseñados para lograr una remoción completa de compuestos orgánicos, de los SST, del nitrógeno o de bacterias coliformes.
5. Los mosquitos y otros insectos vectores de enfermedades pueden ser un problema en los humedales de flujo libre.
6. Los humedales artificiales pueden remover coliformes fecales del agua residual doméstica, al menos en un orden de magnitud. Esto no siempre es suficiente para cumplir con los límites de descarga en todas las localidades, por lo cual podría requerirse desinfección subsiguiente.
7. Si bien los humedales de flujo subsuperficial pueden ser de menor superficie que los humedales de flujo libre para la remoción de la mayoría de los constituyentes del agua residual, el costo mayor de la grava, en estos humedales, puede dar como resultado costos de construcción más altos para sistemas con una capacidad mayor a $227 \text{ m}^3/\text{día}$ de agua residual.

Se definen como **humedales artificiales de flujo libre superficial (SHFL)** aquellos sistemas en los cuales el agua está expuesta a la atmósfera (Figura 3). La mayoría de los humedales naturales son sistemas SHFL, entre los que se incluyen a los fangales (principalmente con vegetación de musgos), zonas pantanosas (principalmente de vegetación arbórea), y las praderas inundadas (principalmente con vegetación herbácea y macrófitas emergentes). En los humedales SHFL el agua fluye sobre la superficie del suelo con vegetación desde un punto de entrada hasta el punto de descarga. En algunos casos, el agua se pierde completamente por evapotranspiración en el humedal (U.S.EPA, 2000).

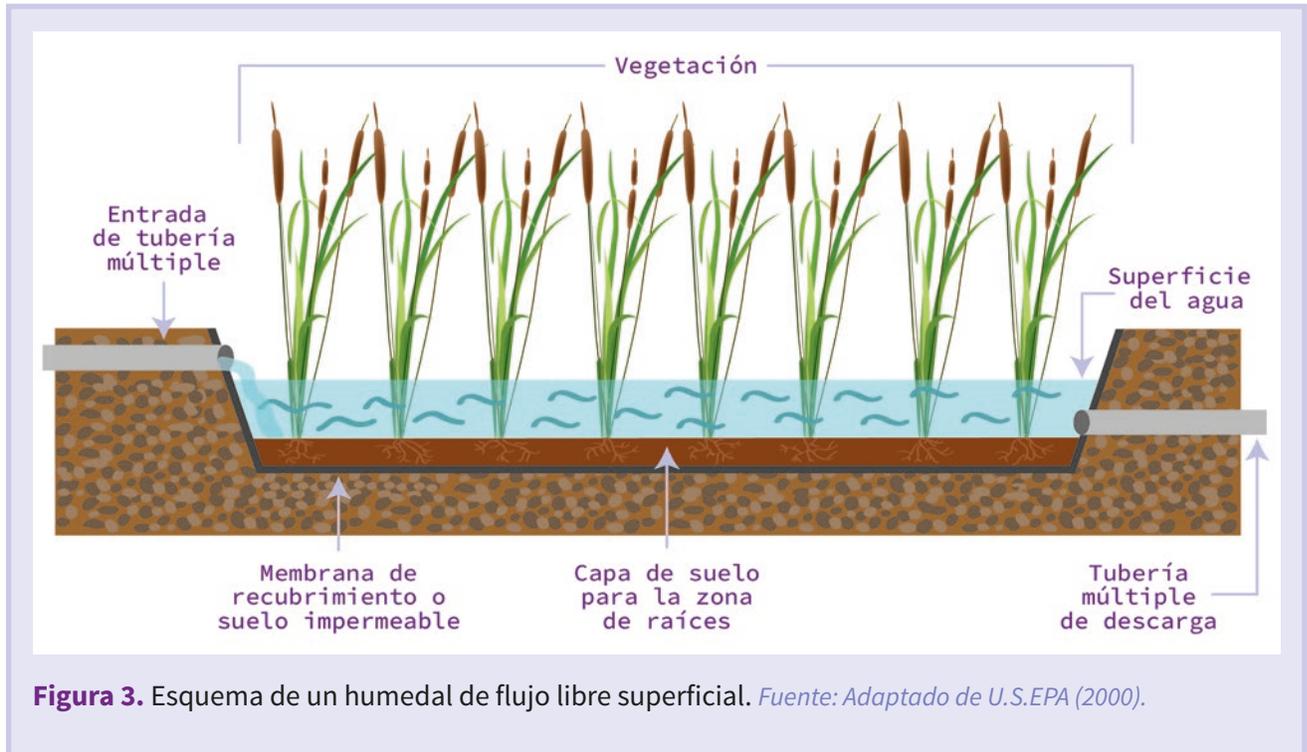


Figura 3. Esquema de un humedal de flujo libre superficial. *Fuente: Adaptado de U.S.EPA (2000).*

La alimentación a estos humedales se efectúa de forma continua y la depuración tiene lugar en el tránsito de las aguas a través de los tallos y las raíces de la vegetación implantada. Tanto los tallos como las raíces y las hojas caídas sirven de soporte para la fijación de la película bacteriana responsable de los procesos de biodegradación, mientras que las hojas que están por encima de la superficie del agua dan sombra a la masa de agua, limitando el crecimiento de microalgas (Salas et al., 2007).

Conforme el agua fluye lentamente a través del humedal, las partículas se asientan, los patógenos se destruyen y las plantas y los organismos utilizan los nutrientes. Este tipo de humedal artificial se usa comúnmente como tratamiento avanzado después de procesos de tratamientos secundarios o terciarios. Un humedal artificial de flujo superficial puede

alcanzar una alta remoción de sólidos suspendidos y una moderada eliminación de patógenos, nutrientes y otros contaminantes, como metales pesados (Tilley et al., 2014).

Este tipo de humedales puede tolerar niveles variables de agua y de carga de nutrientes. La superficie abierta puede actuar como un posible caldo de cultivo para mosquitos; sin embargo, esto puede prevenirse mediante un buen diseño y mantenimiento, como por ejemplo la utilización de policultivos que cubran el espejo de agua y la cosecha periódica de la vegetación. Este tipo de humedal suele ser estéticamente agradable, sobre todo cuando está integrado en las áreas naturales existentes (Tilley et al., 2014).

Pros (+) y contras (-) de los humedales artificiales de flujo libre superficial (Tilley et al., 2014)

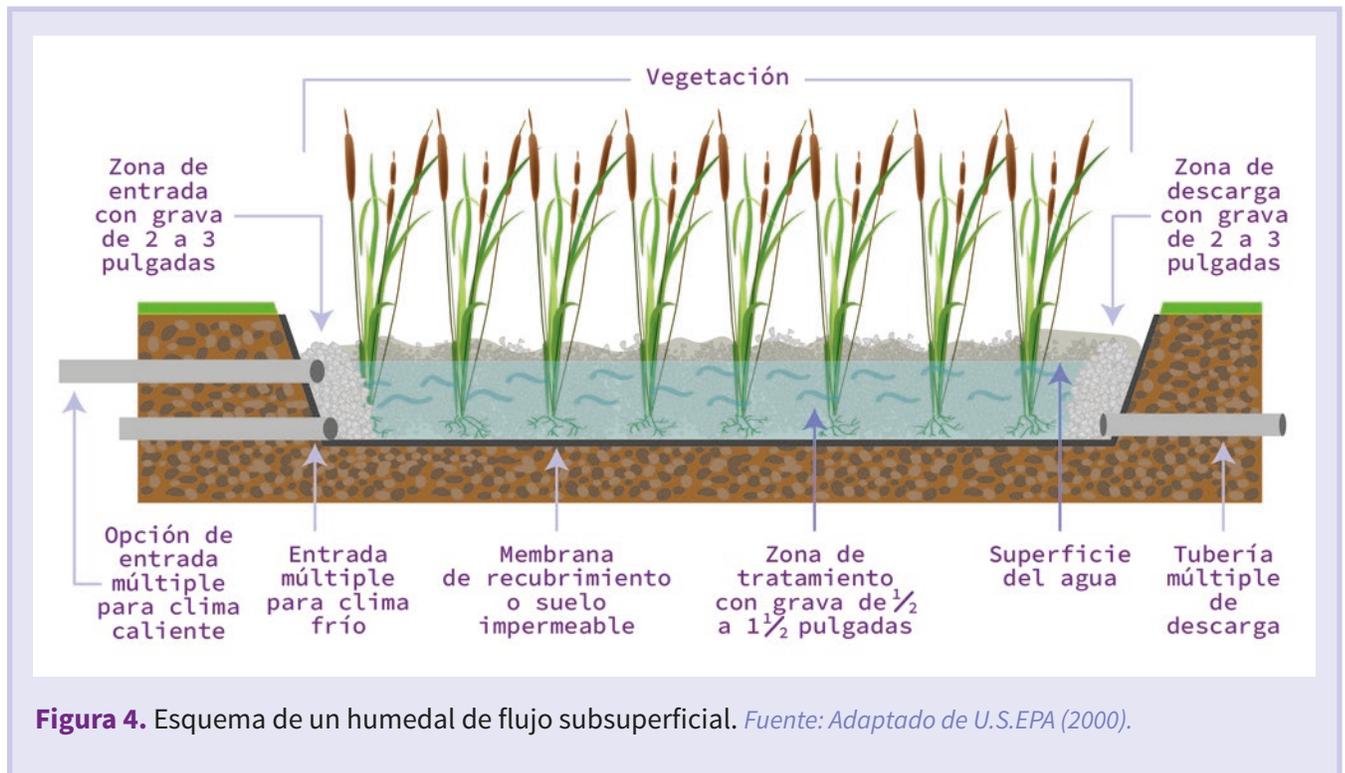
- (+) Estéticamente agradables y proporcionan hábitat a los animales.
- (+) Alta reducción de DBO y sólidos; eliminación moderada de patógenos.
- (+) Pueden ser contruidos y reparados con materiales localmente disponibles.
- (+) Funcionan sin requerimientos de energía eléctrica.
- (+) En su proceso no tienen problemas de olores si se diseñan y mantienen correctamente.
- (+) Bajos costos de operación.
- (-) Pueden facilitar la reproducción de mosquitos.
- (-) Requieren de una gran área superficial.
- (-) Período inicial largo antes de poder trabajar a capacidad plena.
- (-) Requieren experiencia en diseño y construcción.

Un **humedal artificial de flujo subsuperficial (SHFS)** está diseñado específicamente para el tratamiento de algún tipo de agua residual, o su fase final de tratamiento y está construido típicamente en forma de un lecho o canal que contiene un medio apropiado. Como medio se utiliza grava, arena u otro tipo de materiales del suelo (Figura 4). El medio se siembra con la vegetación emergente y por diseño, el nivel del agua se mantiene por debajo de la superficie del medio (U.S.EPA, 2000).

El medio filtrante actúa como un filtro para remover sólidos, con una superficie fija a la cual pueden adherirse las bacterias y sostenerse la vegetación. Aunque las bacterias anaerobias y facultativas degradan más compuestos orgánicos, la vegetación transfiere una pequeña cantidad de oxígeno al área de raíz para que las bacterias aeróbicas puedan colonizar el área y degradar la materia orgánica. Las raíces de la planta juegan un papel importante en mantener la permeabilidad del filtro (Tilley et al., 2014).

Comúnmente, se usa grava pequeña, redonda y de tamaño uniforme (de 3,0 a 32,0 mm de diámetro) para llenar el lecho hasta una profundidad de 0,5 a 1,0 m. Para limitar las obstrucciones, la grava debe estar limpia y libre de arena fina. En años recientes, otros materiales de filtro alternativos, como el tereftalato de polietileno -PET- (plástico muy utilizado en envases de bebidas), también se han usado con éxito. Así mismo, el nivel del agua en el humedal se mantiene de 5,0 a 15,0 cm por debajo de la superficie para garantizar el flujo subsuperficial. Cualquier planta nativa con raíces profundas y anchas que pueda crecer en un entorno húmedo y rico en nutrientes es adecuada para este tipo de humedal (Tilley et al., 2014).

Las obstrucciones son un problema común y, por lo tanto, el afluente debe estar pretratado con tratamiento primario, antes de ser conducido al humedal. Esta tecnología no es apropiada para aguas residuales domésticas sin tratar. Es un tratamiento recomendado para viviendas, en las que se realiza un tratamiento primario a las aguas residuales domésticas (por ejemplo, en el tanque séptico), pero en las que se requiere obtener un efluente de calidad superior (Tilley et al., 2014).



Este tipo de humedal logra una significativa eliminación de patógenos por deterioro natural, depredación de organismos superiores y filtración (dado que el agua fluye por debajo de la superficie y se minimiza cualquier contacto de organismos patógenos con la vida silvestre y humana). También se reduce el riesgo de criaderos de mosquito, ya que no hay agua

estancada como sucede en el humedal artificial de flujo superficial. El humedal artificial de flujo horizontal subsuperficial es estéticamente agradable y puede integrarse a áreas silvestres o parques (Tilley et al., 2014).

Pros (+) y contras (-) de los humedales de flujo subsuperficial (Tilley et al., 2014)

- (+) Alta reducción de DBO, sólidos suspendidos y patógenos.
- (+) Con este humedal se evitan los problemas de mosquitos que existen en los humedales artificiales de flujo superficial.
- (+) Pueden ser contruidos y reparados con materiales disponibles localmente.
- (+) Funcionan sin requerimientos de energía eléctrica.
- (+) Bajos costos de operación.
- (-) Requieren de una gran área superficial.
- (-) Poca remoción de nutrientes.
- (-) Riesgo de obstrucciones, dependiendo del pretratamiento y el tratamiento primario.
- (-) Período inicial largo antes de poder trabajar a capacidad plena.
- (-) Requieren experiencia en diseño y construcción.

Humedales artificiales de flujo vertical. Un humedal artificial de flujo vertical es un lecho filtrante donde está plantada vegetación acuática. Las aguas residuales son vertidas o dosificadas desde un punto más alto en la superficie, utilizando un sistema mecánico de dosificación. El agua fluye verticalmente a través de la matriz filtrante hacia el fondo de la laguna, donde es recolectada por un tubo de drenaje (Figura 5). La principal diferencia entre un humedal de flujo vertical y uno de flujo horizontal no es sólo la dirección de la trayectoria del flujo sino las condiciones aerobias (Tilley et al., 2014).

Al dosificar de forma intermitente el agua en el humedal (cuatro a diez veces al día), el filtro pasa por las etapas de saturado y no saturado y, por consiguiente, por diferentes fases de condiciones anaerobias y aerobias. Durante la fase de arrastre, las aguas residuales percolan hacia abajo, a través del lecho no saturado. Conforme el lecho drena, el aire es atraído al interior y el oxígeno tiene tiempo para disiparse por los medios porosos (Tilley et al., 2014).

El medio filtrante remueve los sólidos y provee una superficie fija a la cual pueden fijarse las bacterias y servir como base para la vegetación. La capa de más arriba se siembra y la vegetación puede desarrollar raíces anchas y profundas que permean el medio filtrante. Los nutrientes y los materiales orgánicos son absorbidos y degradados por las densas poblaciones microbianas (Tilley et al., 2014).

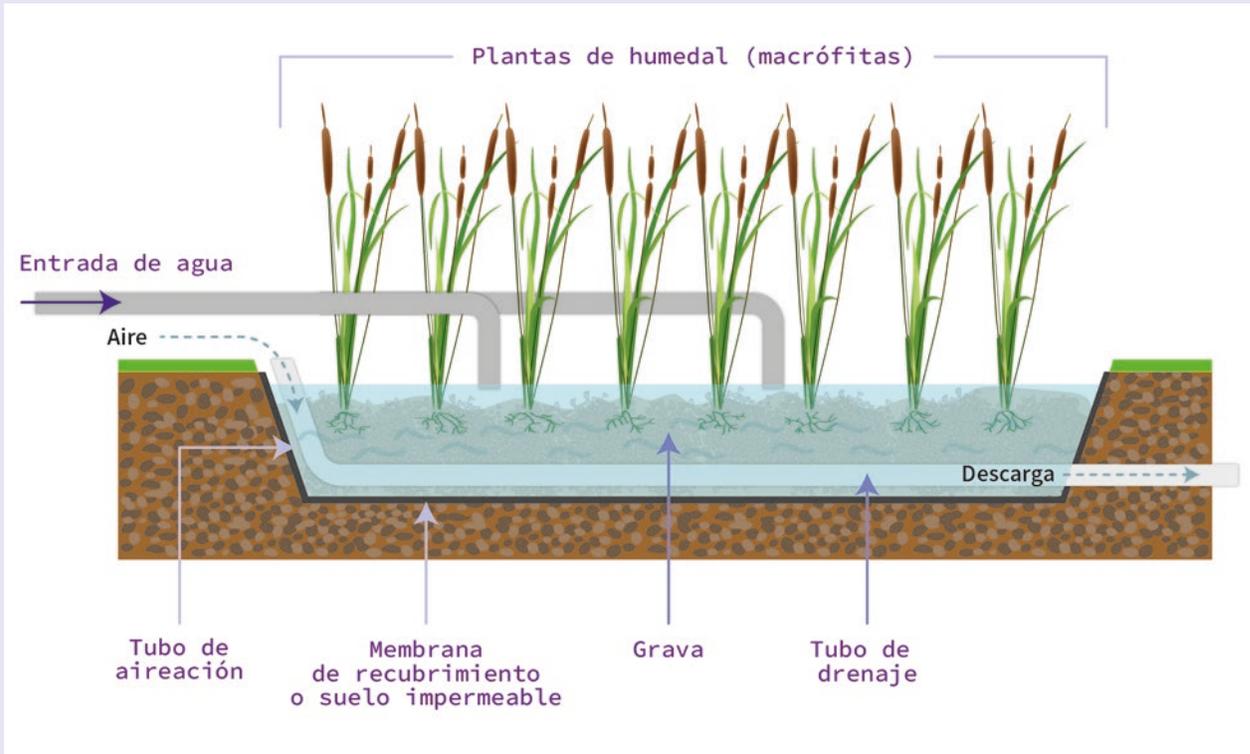


Figura 5. Esquema de un humedal de flujo vertical. *Fuente: Adaptado de Tilley et al. (2014).*

El humedal artificial de flujo vertical es un buen tratamiento para comunidades que tienen tratamiento primario para sus aguas residuales (por ejemplo, tanque séptico) y que buscan conseguir un efluente de calidad superior. Debido al sistema mecánico de dosificación, esta tecnología es más apropiada cuando se cuenta con personal de mantenimiento capacitado, un suministro de energía constante y disponibilidad de repuestos (Tilley et al., 2014).

Este tipo de humedal logra eliminar patógenos por deterioro natural, depredación de organismos superiores y filtración. Reduce el riesgo de criaderos de mosquito, ya que no hay agua estancada. Es estéticamente agradable y puede integrarse a áreas silvestres o parques.

Humedales artificiales combinados. En los sistemas de humedales combinados, también conocidos como multifase, se diseñan varios compartimentos para propiciar diferentes tipos de reacciones y procesos, con el fin de conseguir una mayor eficiencia en la reducción de contaminantes (Figura 6). De esta manera, pueden aprovecharse mejor las ventajas que presenta cada tipo de humedal, diseñando un sistema con una configuración que favorezca las reacciones oportunas para la reducción de algún contaminante en particular (Sánchez, 2013).

Pros (+) y contras (-) de los humedales de flujo vertical (Tilley et al., 2014)

- (+) Alta reducción de DBO, sólidos suspendidos y patógenos.
- (+) Capacidad de nitrificación debido a la transferencia de oxígeno adecuado.
- (+) Con este humedal se evitan los problemas de mosquitos que existen en los humedales artificiales de flujo superficial.
- (+) Menos obstrucciones que en los humedales artificiales de flujo horizontal subsuperficial.
- (+) Requieren menos espacio que los humedales artificiales de flujo superficial libre.
- (+) Bajos costos de operación.
- (-) Requieren experiencia en diseño y construcción, sobre todo para el sistema de dosificación.
- (-) Requieren un mantenimiento más frecuente que los humedales artificiales de flujo horizontal subsuperficial.
- (-) Pueden necesitar una fuente constante de energía eléctrica.
- (-) Período inicial largo antes de trabajar a capacidad plena.
- (-) Limitaciones en la disponibilidad de los repuestos y materiales localmente.

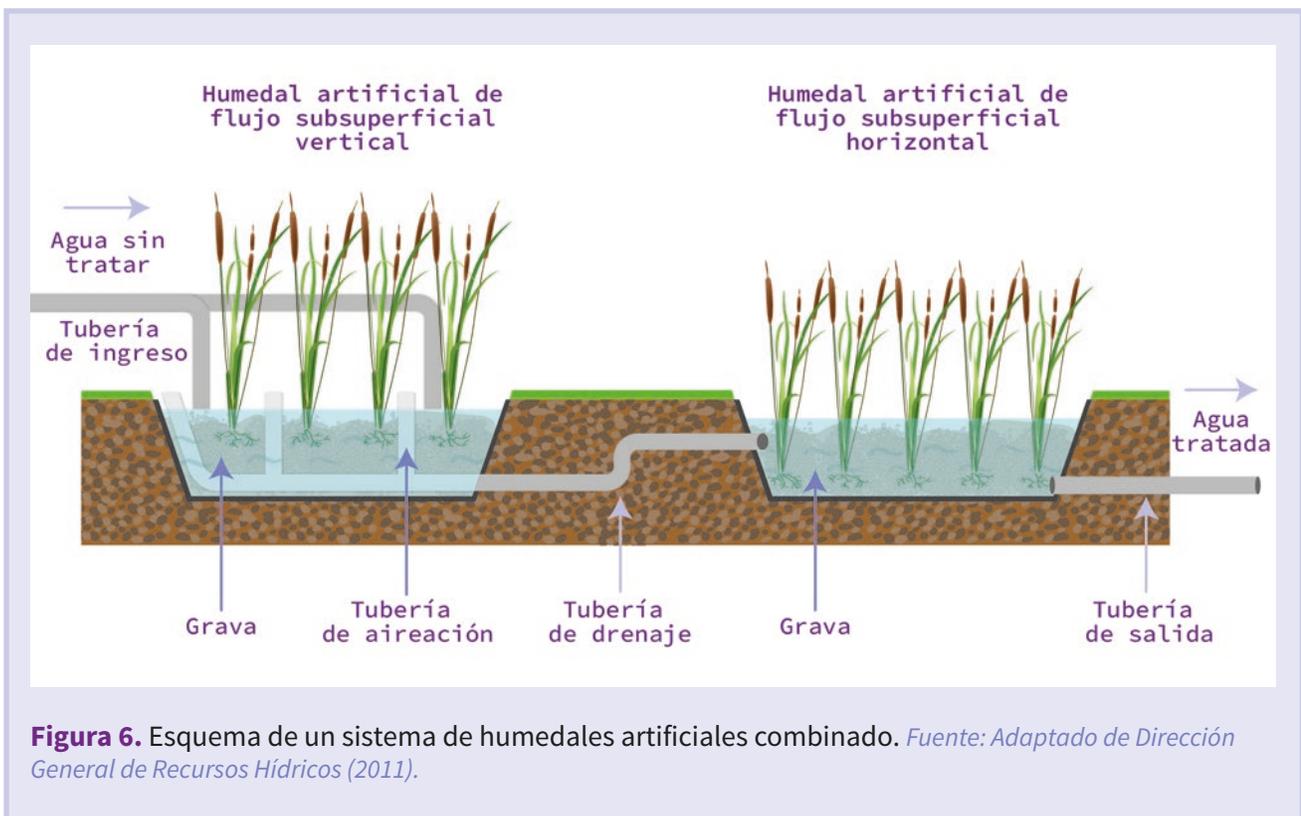


Figura 6. Esquema de un sistema de humedales artificiales combinado. *Fuente: Adaptado de Dirección General de Recursos Hídricos (2011).*

Actualmente, el caso más utilizado de combinación de humedales consiste en el tratamiento, en serie, mediante la operación de un humedal vertical de flujo subsuperficial, seguido de un humedal horizontal de flujo subsuperficial, favoreciendo, en primer lugar, los procesos aeróbicos por la carga intermitente de agua en el humedal de flujo vertical y, posteriormente, el agua pasa al humedal de flujo superficial, donde se presentan procesos anaeróbicos, al existir un flujo de agua constante en el sustrato sin estar expuesto directamente a la atmósfera. Con esta configuración se alcanza una mayor eficacia en el tratamiento de contaminantes, en especial, para la eliminación de nitrógeno y patógenos. En los humedales de flujo vertical se consigue la eliminación de la DBO y la nitrificación, y en los humedales de flujo horizontal se consigue la desnitrificación (Sánchez, 2013).

Mecanismos de remoción de contaminantes en humedales

En los humedales artificiales se presenta una interacción entre el agua a tratar con el suelo, las plantas, los microorganismos y la atmósfera. En estos sistemas intervienen muchos de los procesos utilizados en las plantas de tratamiento convencional: físicos, químicos y biológicos (sedimentación, filtración, transferencia de gases, absorción, intercambio iónico, precipitación química, oxidación y reducción química, y conversión y descomposición biológicas), junto con procesos propios de los sistemas de tratamiento natural tales como la fotosíntesis, la fotooxidación y la asimilación por parte de las plantas (Metcalf & Eddy, 1995).

A diferencia de los sistemas convencionales de tratamiento, en los cuales los procesos se llevan a cabo de forma secuencial, en diferentes tanques y reactores, a velocidades aceleradas, en los sistemas naturales los procesos se producen a velocidades naturales y se realizan en forma simultánea en un único “reactor-ecosistema” (Metcalf & Eddy, 1995).

En los humedales artificiales la depuración se basa en procesos naturales de tipo microbiológico, biológico, físico y químico, relacionados con el tipo de organismos presentes en los mismos y que se describen a continuación.

Microorganismos y organismos inferiores heterótrofos. En este grupo se incluyen bacterias, protozoos, actinomicetos y hongos, los cuales participan en el proceso de descomposición de la materia orgánica y a la vez son productores primarios de biomasa. Se concentran alrededor de la superficie de partículas sólidas, sedimentos, detritos (material resultante de la descomposición de la materia orgánica) y partes sumergidas de las plantas (Curt, 2004).

Las bacterias son responsables de la degradación de la materia orgánica, la transformación del nitrógeno a formas asimilables para las plantas (amonio, nitratos), la solubilización del fósforo para que sea asimilado por las plantas y la reducción y oxidación de compuestos de azufre.

Los protozoos son importantes en la cadena trófica del sistema, ya que al alimentarse de las bacterias regulan la población bacteriana responsable de la degradación de la materia orgánica; como productos de su metabolismo generan ortofosfatos y amonio, fácilmente asimilables por las plantas y contribuyen a la floculación de los sólidos suspendidos (Curt, 2004).

Se considera que las reacciones biológicas se deben a la actividad de los microorganismos adheridos a las superficies disponibles de sustrato sumergido. En el caso de los humedales de flujo libre, estos sustratos son las porciones sumergidas de las plantas vivas, los detritos vegetales y la capa béntica del suelo. En humedales de flujo subsuperficial el sustrato sumergido disponible incluye las raíces de las plantas que crecen en el medio y la superficie misma del medio. Dado que el área de sustrato en un humedal de flujo subsuperficial puede sobrepasar por mucho el sustrato disponible en humedales de flujo libre, las tasas de reacción microbiana pueden ser mayores que las de humedales de flujo libre para muchos contaminantes (U.S.EPA, 2000).

Algas. Son organismos acuáticos fotosintéticos cuyo papel es esencial en la biosfera. La presencia de algas en los humedales es inherente a su condición de hábitats húmedos. Las algas, al realizar la función fotosintética, contribuyen a crear ambiente aerobio liberando oxígeno propicio para procesos oxidativos de la carga contaminante (Curt, 2004).

Vegetación. La vegetación desempeña un papel fundamental en el buen funcionamiento del sistema, se trata de actuaciones activas derivadas de la acción fisiológica de la misma y actuaciones pasivas en la que intervienen procesos físicos por efecto de la presencia de las plantas en el sistema (Curt, 2004).

Actuación pasiva de la vegetación en la depuración. En el balance global de las funciones que desempeña la vegetación en los humedales artificiales, los procesos físicos suponen la función más importante de las plantas para la eficacia depuradora del sistema. En primer lugar, las macrófitas pueden ejercer funciones de desbaste, reteniendo los sólidos gruesos arrastrados por el agua residual. También, por actuar de barrera física para el flujo del agua residual, reducen la velocidad del influente (caudal de agua que circula en el interior del humedal), lo que favorece la sedimentación de partículas en suspensión. De otro lado, las partes de las plantas que están en contacto con el influente, actúan como soporte pasivo de microorganismos y crean en sus proximidades ambientes propicios para el desarrollo de estos; es decir, las plantas crean una enorme área superficial para el desarrollo de 'bio-películas', en las que crecen bacterias, protozoos y algas microscópicas (Curt, 2004).

También son de reseñar las actuaciones pasivas que se refieren a la parte aérea de las plantas. Cuando la vegetación tiene un determinado porte, como ocurre con plantas acuáticas emergentes, la vegetación tiene un cierto efecto amortiguador de las temperaturas extremas y otros fenómenos atmosféricos, ya que aísla la superficie del agua, intercepta lluvia y nieve, y reduce las pérdidas de calor que eventualmente se producen por el viento.

Procesos activos de la vegetación en la depuración. Con respecto a las funciones que desempeñan activamente las plantas en los humedales artificiales, hay que destacar: el intercambio gaseoso desde las hojas hacia la zona radical en contacto con el agua residual, esto favorece la degradación de la materia orgánica del entorno de las raíces por medio de los microorganismos que viven asociados al sistema radical de la planta. El aerénquima (tejido con amplios agujeros interconectados) permite la convección de gases a través de toda la planta, llegando el O_2 a las raíces, el cual es liberado a la columna de agua, generando un micro ambiente aerobio en las zonas cercanas a las raíces. El contenido O_2 en el agua depende de los mecanismos de transporte gaseoso, la demanda de O_2 en los sedimentos, la permeabilidad de las raíces y las especies de plantas utilizadas en el sistema de tratamiento (Figura 7). Algunos estudios indican que *Phragmites australis* puede liberar hasta $4,3 \text{ g m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ de O_2 y las plantas flotantes entre $0,25$ y $9,6 \text{ g m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ de O_2 (Curt, 2004).

También las macrófitas pueden ejercer una depuración directa por la absorción de iones contaminantes, tanto metales pesados como nitratos y fosfatos.

Durante el proceso de transpiración, el agua residual es bombeada por las raíces hacia las hojas y muchos de los contaminantes entran en contacto con las raíces (absorción de iones, nitratos y fosfatos). Las plantas de los sistemas incrementan la tasa de evapotranspiración y, por lo tanto, la pérdida de agua. Durante el proceso de fotosíntesis se presenta la oxigenación del agua, incrementando el valor de O_2 y del pH. Las raíces de las plantas exudan y secretan carbono orgánico y los rizomas muertos proporcionan una fuente de carbono orgánico, necesarios para el proceso de desnitrificación (Gauss, 2008).

El papel que desempeña la vegetación en la remoción de nutrientes y otros contaminantes del agua está estrictamente relacionado con factores propios de la planta. Las extracciones dependen del rendimiento del material vegetal sembrado. Las plantas acuáticas son muy productivas, por lo que la extracción de nutrientes por incorporación al tejido vegetal, puede llegar a ser muy significativa.

Las transformaciones de los constituyentes que ocurren en los humedales se relacionan con los ciclos del carbono y de los nutrientes. En todos los humedales ocurren condiciones de depuración tanto aerobias como anaerobias, en grados variables al mismo tiempo (Crites et al., 2000). En la Tabla 1 se resumen los principales mecanismos de remoción y transformación de la materia orgánica, sólidos suspendidos, nitrógeno, fósforo y organismos patógenos de las aguas residuales tratadas en los humedales artificiales.

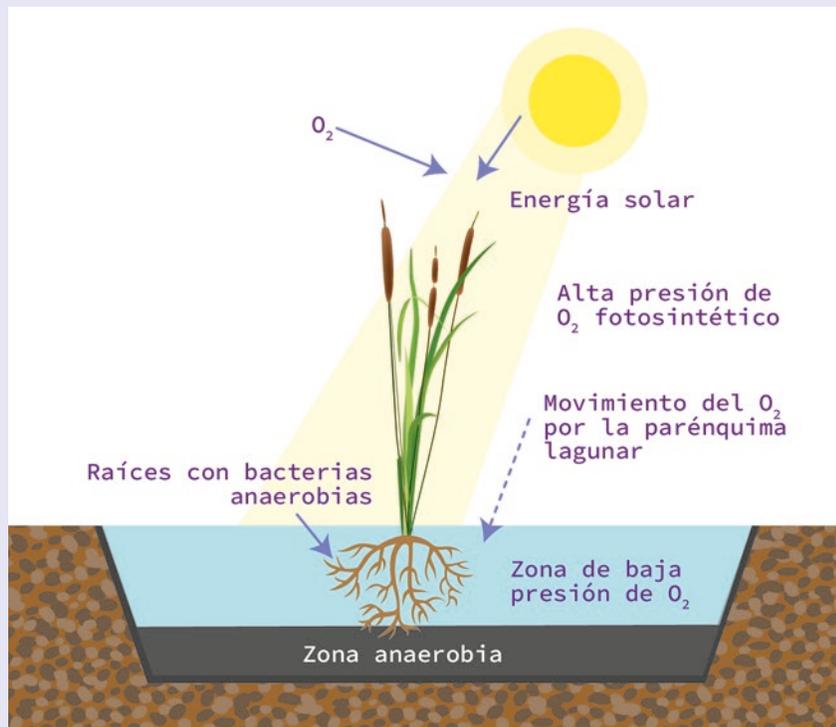


Figura 7. Esquema del proceso de aireación de la rizosfera de las macrófitas emergentes de los humedales. Fuente: Fernández (2004).

Fauna. Está compuesta por diferentes especies de insectos y en menor medida aves, peces, anfibios y reptiles ocasionales. Los insectos juegan un papel importante en la cadena trófica y sirven de alimento a organismos superiores como aves y peces. Algunos insectos pueden ser plagas de la vegetación y otros molestos para el hombre (mosquitos) (Curt, 2004).

Ubicación de los humedales

Los humedales deben localizarse aguas abajo del tanque séptico o del filtro anaeróbico (FAFA) para el postratamiento de las aguas residuales domésticas, tal como se establece en el Título J del Reglamento Técnico del Sector de Agua potable y Saneamiento Básico [RAS], o aguas abajo de un reactor metanogénico o de la última unidad de un tratamiento secundario para el postratamiento de las aguas residuales del beneficio del café. Para esto, debe hacerse una evaluación de las características del suelo, localización de cuerpos de agua, topografía, localización geográfica, líneas de propiedad y vegetación existente para ubicar adecuadamente el humedal, de acuerdo al Título J del RAS (Ministerio de Medio Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial, [MAVDT], 2010).

Topografía. El terreno idóneo para la instalación de un humedal es uno de topografía uniforme horizontal o en ligera pendiente; ello se debe a que los sistemas de flujo libre (SHFL) suelen diseñarse con depósitos o canales horizontales, y a que los sistemas de flujo subsuperficial (SHFS) suelen diseñarse y construirse con pendientes del 1,0% o superiores. A pesar de que es posible construir depósitos en terrenos de más pendiente y con topografía más irregular, el movimiento de tierras necesario afectará al costo constructivo del sistema. En consecuencia, los sistemas de humedales suelen construirse con pendientes inferiores al 5,0% (Metcalf & Eddy, 1995).

Suelo. Dado que el objetivo de los humedales es el tratamiento del agua residual en la lámina de agua situada por encima de la superficie del terreno, los emplazamientos más apropiados para la instalación de estos sistemas son suelos con niveles superficiales o estratos subsuperficiales de permeabilidad lenta ($< 0,5 \text{ cm h}^{-1}$). Consecuentemente, deben minimizarse las pérdidas por percolación a través de la superficie del terreno. Los suelos naturales de permeabilidad rápida pueden ser aptos para la construcción de pequeños sistemas, construyendo depósitos revestidos con arcilla o con láminas impermeabilizantes. La distancia hasta el nivel freático debe de ser como mínimo de 0,3 a 0,6 m, para permitir la existencia de distancia suficiente para el tratamiento de todo el percolado que pueda entrar en contacto con las aguas subterráneas y para evitar la saturación de la zona radical. La profundidad hasta el estrato rocoso puede ser importante si afecta los costos de construcción del sistema (Metcalf & Eddy, 1995).

Uso actual del terreno. El tipo de terreno preferido para la instalación de los humedales son espacios abiertos o de uso agrario. Los humedales artificiales pueden favorecer las condiciones de los sistemas naturales al proporcionar un hábitat suplementario para el mundo animal y, en algunos casos, un abastecimiento de agua más constante (Metcalf & Eddy, 1995).

Clima. Es posible utilizar sistemas de humedales en zonas de climas fríos; sin embargo, la viabilidad del funcionamiento de los sistemas durante el invierno depende de la temperatura del agua en el interior del depósito y de los objetivos del tratamiento. El rendimiento del proceso de tratamiento es muy sensible a la temperatura, ya que los principales mecanismos de tratamiento son biológicos (Metcalf & Eddy, 1995).

Tabla 1. Principales mecanismos de remoción y transformación de los contaminantes en los humedales artificiales. *Fuente: Adaptado de Crites et al. (2000).*

Constituyente del agua residual	Mecanismo de remoción
Sólidos suspendidos	Floculación/sedimentación Filtración/interceptación
Materia orgánica biodegradable (DBO)	Bioconversión por bacterias aerobias, anaerobias y facultativas, y detritos de la superficie (DBO soluble) Adsorción, filtración, floculación y sedimentación (DBO particulada)
Nitrógeno	Procesos físicos: filtración, interceptación, floculación, sedimentación Procesos de sorción (biopelículas) Nitrificación – desnitrificación bacteriana Asimilación vegetal Volatilización
Fósforo	Procesos físicos: filtración, interceptación, floculación, sedimentación Procesos de sorción (biopelículas) Asimilación vegetal
Organismos patógenos	Decaimiento natural Predación Sedimentación Excreción de antibióticos por parte de las raíces de las plantas Irradiación UV



Vegetación propia de los humedales

Desde el punto de vista botánico, el término ‘macrófita’ se aplica a cualquier vegetal que es visible a simple vista (herbáceas, arbustos, árboles). Por ello, los vegetales de talla visible que crecen en los humedales se denominan ‘macrófitas acuáticas’, término que, desde un punto de vista amplio, engloba plantas acuáticas vasculares (angiospermas y helechos), musgos acuáticos y grandes algas (Curt, 2004).

Clasificación de las plantas acuáticas utilizadas en los humedales artificiales

El abanico de especies que se utilizan en fitodepuración se restringe a especies típicamente helófitas (plantas perennes que mantienen el contacto con zonas saturadas de agua), debido a que los sistemas más extendidos son los humedales de flujo superficial y flujo sub-superficial. En estos sistemas, las principales plantas utilizadas son *Typha* spp. (eneas), *Phragmites australis* (carrizo) y *Scirpus* spp. (juncos). En sistemas de tratamiento de aguas, estrictamente acuáticos, se utilizan plantas flotantes de flotación libre, como son *Eichhornia crassipes* (jacinto de agua) y *Lemna* spp. (lentejas de agua), entre otras (Curt, 2004).

Existen muchas clases de plantas acuáticas o macrófitas que pueden utilizarse para el tratamiento de las aguas residuales, pero es necesario tener en cuenta diversas características antes de hacer una selección. Entre los criterios que hay que considerar para esta selección están (Salazar, 1988):

- Adaptabilidad al clima local
- Altas tasas fotosintéticas
- Alta capacidad de transporte de oxígeno
- Tolerancia a concentraciones adversas de contaminantes
- Capacidad asimilativa de contaminantes
- Resistencia a plagas y enfermedades
- Fácil manejo

Debido a los diferentes usos que se dan a los cuerpos de agua, una planta acuática considerada perjudicial en un caso puede ser inofensiva o benéfica en otro. El primer paso para determinar si una planta acuática es útil o perjudicial es identificarla (Stanley, 1982). Las plantas acuáticas muestran una gran diversidad en cuanto a modo de vida. En función de dónde se sitúan los órganos asimiladores, se distinguen tres tipos de plantas acuáticas: flotantes, sumergidas y anfibias (Curt, 2004).

Plantas acuáticas flotantes. Son plantas en las que sus órganos asimiladores están flotando en la superficie del agua. Este grupo comprende plantas de libre flotación, que son

aquellas que presentan raíces suspendidas en el agua (por ejemplo, la lenteja de agua), como plantas flotantes enraizadas, que son aquellas en las que sus raíces están ancladas en los lodos del humedal y sus hojas están flotando en la lámina de agua, como el lirio acuático (Figura 8). Entre las plantas flotantes utilizadas en los sistemas acuáticos de tratamiento de aguas, se encuentran la lenteja de agua (*Lemna minor*) y el jacinto de agua (*Eichhornia crassipes*) (Figura 9), de muy alta productividad. La función principal de estas plantas es la de proporcionar sombra para dificultar el crecimiento de las algas, además de actuar extrayendo nutrientes (Curt, 2004).



Figura 8. Lirio acuático. Fuente: Archivo Fotográfico Cenicafé.



Figura 9. Jacinto acuático sembrado en humedales artificiales en Cenicafé.

Plantas sumergidas. Las partes vegetativas de estas plantas no aparecen sobre la superficie del agua. Pueden estar o no fijadas al fondo. Cualquier parte de la planta (excepto la inflorescencia) que sobresalga de la superficie se seca rápidamente al sol (Stanley, 1982). Se desarrollan en la columna de agua, manteniendo todos sus órganos vegetativos por debajo de la lámina de agua. Son plantas importantes en los humedales naturales a causa de su efecto oxigenador en la columna de agua. En este grupo se encuentran especies muy comunes de los humedales naturales, como *Ranunculus aquatilis* (ranúnculo de agua) (Figura 10) y *Potamogeton* spp., y otras que se utilizan frecuentemente en estanques ornamentales por su capacidad oxigenadora, como son *Ceratophyllum demersum* o *Myriophyllum verticillatum*. Algunas de las plantas acuáticas sumergidas de aplicación en sistemas acuáticos artificiales de depuración son *Potamogeton* spp. y *Elodea* spp. (Curt, 2004).

Plantas anfibia (emergentes). Son aquellas plantas que tienen parte de su estructura vegetativa dentro y otra parte fuera del agua. Típicamente se trata de plantas arraigadas en el

suelo sumergido (lodo) o en suelo encharcado, y que asoman parte de su cuerpo vegetativo por encima de la lámina del agua. En este grupo se encuentran importantes especies de interés en los humedales artificiales, como las eneas (Figura 11), la caña común, *Phragmites australis* y el esparganio, *Sparganium erectum*. Su función primaria en los humedales artificiales es la de actuar de filtro para mejorar los procesos de floculación y sedimentación. Otras funciones son la de servir de soporte de microorganismos (por desarrollo de una gran superficie de órganos sumergidos), oxigenar el agua circundante en la rizosfera y extraer nutrientes (Curt, 2004).



Figura 10. Ranúnculo de agua. Fuente: (“*Ranunculus aquatilis*,” 2020).



Figura 11. Eneas sembradas en humedales artificiales en Cenicafé.

Especies acuáticas utilizadas en la investigación de humedales artificiales en Cenicafé

A continuación se describen las características de las plantas acuáticas que se han utilizado en las investigaciones de Cenicafé en humedales artificiales.

***Eichhornia crassipes* (Mart.) Solms Jacinto acuático**

Eichhornia crassipes (Figura 12) es una planta de la familia Pontederiaceae, nativa de América del Sur, que flota sobre la superficie de arroyos y lagos de agua dulce; se considera libre, ya que sus raíces no están fijadas a algún sustrato. Posee una raíz de tipo plumosa, fibrosa y con muchas ramificaciones. El tallo es delgado, de él parten los peciolos que son esponjosos e inflados y se encuentran rodeándolo. Las hojas son lobuladas, de un color verde característico por ser muy brillante (Weldon, 1973, citado por Olgún et al., 1994). Posee flores de color malva a casi

violeta. Se propaga rápidamente por medios vegetativos. Cada planta produce estolones en cuyos extremos se forman nuevas plántulas. Su hábito de desarrollo y multiplicación le permite cubrir rápidamente grandes extensiones de agua (Stanley, 1982).

Distribución y ambiente: por lo general, el jacinto acuático crece en el agua dulce estancada o de movimiento lento, de ríos, arroyos y represas. A veces enraíza en el lodo al bajar el nivel del agua y persiste por algún tiempo. No tolera agua salobre. Crece en aguas blandas o medianamente duras, a una temperatura de 20°C a 30°C y con luz natural clara (Stanley, 1982).

Los jacintos de agua no toleran el clima frío; las hojas y las flores mueren en condiciones de congelamiento, pero la planta se regenera a menos que las puntas del rizoma se congelen. Debido a la sensibilidad que tienen los jacintos de agua a las bajas temperaturas, su uso se limita a regiones con temperaturas templadas y cálidas; si la temperatura ambiente no desciende por debajo de 5°C a 10°C, pueden tolerar temperaturas del agua tan bajas como de 10°C. En lugares con grandes variaciones climáticas puede ser más adecuado tener sistemas combinados de jacintos con otras plantas acuáticas (Crites et al., 2000).

Utilización en depuración de aguas: existen varios estudios sobre la remoción de nutrientes de las aguas residuales, por parte del jacinto, con valores que, dependiendo de las condiciones de cultivo, varían entre 1.980 kg ha-año⁻¹ de N y 322 kg ha-año⁻¹ de P hasta 7.887 kg ha-año⁻¹ de N y 1.978 kg ha-año⁻¹ de P (Olguín et al., 1994).

Los estudios sobre la capacidad de estas plantas para extraer nutrientes de las aguas residuales han mostrado excelentes resultados. Lord (1982), reporta la reducción de la DBO₅ en más del 97%, los sólidos suspendidos totales en el 95%, el nitrógeno y el potasio en el 99%, el sílice en el 87% y el fosfato del 60% al 65%, siendo la pérdida de agua a través de la transpiración superior al 50% del volumen aplicado, lo cual reduce significativamente el volumen de aguas residuales que se tienen que tratar.

La mayoría de los sistemas de tratamiento con jacintos están compuestos por lagunas rectangulares, dispuestas en serie. Las estructuras de entrada del afluente varían desde vertederos en concreto o madera, hasta tuberías de distribución perforadas, con salidas múltiples. El objetivo es proveer un sistema de poco mantenimiento, que



Figura 12. Inflorescencia de *Eichhornia crassipes*.

pueda distribuir uniformemente el agua residual. Se prefiere la descarga subsuperficial para las entradas, mientras que las estructuras de paso entre las lagunas y las de salida pueden ser tanto superficiales como subsuperficiales (Crites et al., 2000).

***Pistia stratiotes* L. Lechuga de agua**

Pistia stratiotes (Figura 13) es una planta perenne de flotación libre, de la familia Araceae, nativa de las regiones tropicales y subtropicales de América, Asia y África, identificable por la roseta de hojas rizadas color gris-verde en forma de abanico, más espesas y esponjosas en la base, y que pueden alcanzar los 15,0 cm (Stanley, 1982). También se le conoce como lechugilla de agua y repollito de agua, es la única especie que conforma el género *Pistia*. Sus raíces son numerosas y densas, pueden colgar entre 50 y 80 cm por debajo del agua; cada raíz está cubierta de finos pelos que le dan apariencia plumosa (Howard, 2008).

Sus flores son pequeñas y constan de varias flores masculinas cerca de la punta y una flor femenina en la base, que dan lugar a pequeñas bayas verdes. La variación morfológica es influenciada por las condiciones ambientales y la densidad de la población (Howard, 2008).

Al igual que el jacinto acuático, cada planta produce estolones cortos que dan origen a nuevas plantas. En condiciones cálidas el crecimiento y la propagación de las plantas pueden ser muy rápidos.

Distribución y ambiente: la lechuga de agua se desarrolla en aguas dulces estancadas o en corrientes lentas de agua de represas, arroyos y ríos. A veces se encuentra enraizada en el lodo después de bajar el nivel de las aguas. No tolera heladas ni períodos fríos prolongados.

Crece en aguas blandas o semiduras, a temperaturas entre 15°C a 35°C, siendo su crecimiento óptimo en el rango 22°C a 30°C y aguas ligeramente ácidas (pH entre 6,5 y 7,2) y luz superior intensa (Stanley, 1982).



Figura 13. *Pistia stratiotes*.

Utilización en depuración de aguas:

algunos de los trabajos de investigación relacionados con la utilización de *P. stratiotes* en el tratamiento de aguas residuales son: Reddy & DeBusk (1985) evaluaron, a escala de microcosmos, la remoción de N y P por parte de *P. stratiotes*; Aoi & Hayashi (1996) evaluaron la remoción de nutrientes de aguas residuales por parte de la lechuga de agua; Sooknah & Wilkie (2004) valoraron la

remoción de nutrientes, por parte de la lechuga, de efluentes provenientes de la digestión anaerobia de excretas de vacuno.

***Typha angustifolia* L. Enea**

La familia de las *Typhaceae*, ampliamente distribuidas en todo el mundo, está formada por el género *Typha* (Figura 14), de características morfológicas bastante homogéneas. Son plantas acuáticas con sistema radical arraigado en el fondo del humedal y estructura vegetativa que emerge por encima de la lámina de agua. Son plantas herbáceas perennes, erectas, de gran desarrollo, que pueden alcanzar más de 3,0 m de altura. Las hojas de las eneas se disponen formando un denso grupo desde la parte basal de la planta, ya que están envainadas unas con otras, son planas pero gruesas y esponjosas; al seccionarlas transversalmente se observan numerosos canales aeríferos. En las eneas las flores se agrupan densamente en inflorescencias unisexuales (del tipo espiga compuesta) diferenciadas, que se sitúan muy próximas entre sí en el extremo del escapo floral. La inflorescencia masculina se ubica en la parte más apical del escapo floral y la inflorescencia femenina por debajo de la masculina, con una apariencia similar a la de un “tabaco”, por su grosor y coloración marrón, seguida por la inflorescencia masculina, de forma cilíndrica, similar a la femenina, pero menos gruesa; todo ello atravesado por un largo eje erecto de grosor fino (Curt, 2004).

Distribución y ambiente: para su crecimiento requiere un pH entre 4 a 10, no es una planta de sombra, presenta una tolerancia media a la salinidad (entre 15 a 30 ppt) (Reed et al., 1998), alta tolerancia a condiciones anaerobias y soporta un amplio rango de temperaturas (entre 10°C y 30°C) (Lara, 1999). Su crecimiento es rápido, a través de los rizomas que se extienden lateralmente, alcanzando un cubrimiento denso en menos de un año, con plantas sembradas cada 0,6 m. La penetración de las raíces es poco profunda en grava (0,3 m) y el rendimiento anual de la biomasa es cercano a 30 t ha⁻¹. Debe estar permanentemente inundada por encima de 0,3 m, pero puede tolerar sequía. Es muy comúnmente utilizada en muchos humedales de flujo libre y flujo subsuperficial (Reed et al., 1998).

Utilización en depuración de aguas: una muestra de los trabajos de investigación en este campo, son los realizados por Ansola & De Luis (1994), quienes estudiaron los contenidos de NPK en los tejidos de *T. angustifolia*, utilizada para el tratamiento de aguas residuales domésticas en León (España); en la zona cafetera de Colombia,



Figura 14. *Typha angustifolia*.

Williams et al. (1999) evaluaron un sistema de tratamiento de aguas residuales domésticas utilizando *T. angustifolia* en humedales de flujo subsuperficial; Perkins & Hunter (2000) estudiaron la remoción de bacterias entéricas por *Typha* spp. en humedales de flujo libre; Zúñiga et al. (2003), evaluaron el desempeño de *T. latifolia* en humedales de flujo subsuperficial para la depuración de aguas residuales domésticas en Chile; Bernal et al. (2003) evaluaron el desempeño de *Typha* spp. en un humedal de flujo subsuperficial a escala piloto, en el tratamiento de aguas residuales domésticas en la costa Atlántica de Colombia.

Salvinia auriculata complex Oreja de agua

Las salvinias comprenden cerca de 12 especies y están ampliamente distribuidas en regiones cálidas del mundo. Crecen flotando en aguas estancadas con aporte de materia orgánica, en asociación con otras plantas. Se caracterizan como vegetación flotante, poseen hojas dimorfas solitarias o en grupos, miden de 10,0 a 16,0 mm de largo. Las hojas flotantes son fotosintéticas provistas de pelos secos en la superficie axial y pelos húmedos en la base. Su crecimiento es rápido y la fragmentación ocurre fácilmente, favoreciendo su amplia extensión (Cook, 1974, citado por Olgún et al., 1994).

El complejo *Salvinia auriculata* (Figura 15), es un grupo de cuatro especies similares, que tienen como característica la presencia de un órgano sumergido, con o sin eje primario aparente, simple o ramificado, con uno a varios ejes fértiles. Sus hojas flotantes aparentemente son opuestas, a veces planas; haz con pelos ubicados de a cuatro sobre papilas, cubriendo toda la superficie de la lámina o limitados al margen de la misma; envés piloso y nervios ramificados. Forman parte de este complejo las especies *S. auriculata* Aublet, *S. molesta* D.S. Mitchell, *S. herzogii* de la Sota y *S. biloba* Raddi. Las hojas para *S. auriculata*, *S. herzogii* y *S. biloba* usualmente están

en el rango de 1,5 a 2,0 cm de largo y 1,8 a 2,5 cm de ancho; para *S. molesta* son mayores y potencialmente alcanzan entre 4,0 cm de largo y 5,0 cm de ancho en la madurez (Richerson & Jacono, 2005).



Figura 15. *Salvinia auriculata*.

Distribución y ambiente: la *Salvinia* crece en aguas detenidas o corrientes lentas de agua dulce. *S. auriculata* es originaria de Trinidad, Guyana, Brasil, Paraguay y Argentina; *S. molesta* de las costas del Sureste de Brasil, *S. herzogii* de Paraguay, Uruguay, Sur de Brasil y Norte de Argentina, y *S. biloba* de los estados de Espirito Santa y Río de Janeiro y Sur de Brasil (Richerson & Jacono, 2005).

Crece en aguas templadas, con alto contenido de elementos nutritivos, el desarrollo es muy rápido y en poco tiempo una densa vegetación puede cubrir completamente la superficie del agua. Crece en aguas no muy duras, a una temperatura de 18°C a 28°C y luz natural o artificial clara, sobre todo en invierno (Stanley, 1982). Las especies de *Salvinia* han demostrado ser tolerantes a las heladas, pero no resisten la formación de hielo en la superficie del agua. Whiteman & Room (1991) reportan temperaturas extremas letales para *S. molesta* de -3°C y 43°C.

Utilización en depuración de aguas: algunos de los trabajos de investigación relacionados con la utilización de *Salvinia* spp. en el tratamiento de aguas residuales son: a escala de microcosmos, Reddy & DeBusk (1985), evaluaron la remoción de N y P por parte de *S. Rotundifolia*; Nichols et al. (2000) evaluaron el comportamiento de *S. minima* a diferentes concentraciones de cromo; Olguín et al. (2003) evaluaron el desempeño de *S. minima* en la remoción de N y P de efluentes de aguas residuales de café, tratadas anaerobiamente.

Azolla filiculoides Lam Helecho de agua

El género *Azolla* spp. (Figura 16) corresponde a diminutos helechos acuáticos que flotan libremente en el agua. Sus hojas son verdes en la parte superior e incoloras en la parte inferior. En ciertas condiciones también pueden presentar un color entre rojizo y carmelita (Cruz, 2011), esta coloración está asociada con deficiencias de fósforo. Son hierbas flotantes libres, de 0,5–5,0 cm de raíces no ramificadas, tallos ramificados y hojas alternas, imbricadas, diminutas, situadas en dos filas a ambos lados del tallo, cada una con dos lóbulos, uno superior flotante, verde o rojizo, hasta de 1,0 mm con una cavidad basal que contiene cianobacterias (*Anabaena azollae*) y otro inferior sumergido, casi transparente, y esporocarpos situados en la parte inferior del tallo (Mereles et al., 2015).

Distribución y ambiente: el género *Azolla* spp., incluye seis especies distribuidas ampliamente en las regiones templadas, subtropicales y tropicales del mundo. El crecimiento de *Azolla* spp está restringido por factores climáticos y de disponibilidad de agua. El agua es el requerimiento fundamental para el crecimiento y multiplicación de *Azolla* spp. La planta es extremadamente sensible a la falta de agua, aunque puede crecer en superficies de lodo húmedo o estanque mojado, prefiere crecer en un estado de flotación libre. Una columna de agua, poco profunda, de unos pocos centímetros, favorece el crecimiento porque proporciona

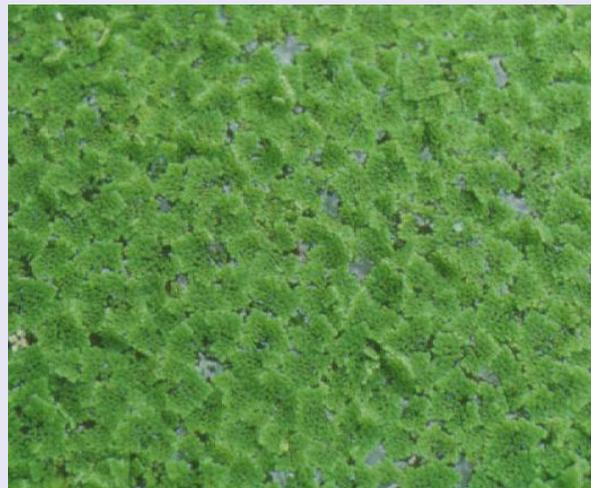


Figura 16. *Azolla filiculoides*.

una buena nutrición mineral, con las raíces no muy lejos del suelo, y también porque reduce el efecto del viento (Hasan et al., 2009).

Azolla spp. puede sobrevivir a un pH del agua entre 3,5 y 10,0, siendo el rango de pH entre 4,5 y 7,0 el óptimo para su crecimiento. La tolerancia a la salinidad de las especies de *Azolla* spp. también varía. La tasa de crecimiento de *A. pinnata* disminuye a medida que su salinidad aumenta por encima de 380 mg L⁻¹. De acuerdo con Reddy et al. (2005), citado por Hasan et al., (2009), *Azolla* spp. puede soportar salinidad de hasta 10 ppt. Se ha reportado que *A. filiculoides* es la más tolerante a la sal (Hasan et al., 2009).

Crece en sombra total o parcial (50% -100% de luz solar) con crecimiento disminuyendo rápidamente bajo sombra intensa. En general, *Azolla* spp. requiere entre un 25%-50% de luz solar completa para su crecimiento normal; una ligera sombra es beneficiosa para su crecimiento en el campo. Requiere todos los macro y micronutrientes para su normal crecimiento y multiplicación. El fósforo, es a menudo, el elemento más limitante para su crecimiento, del cual se requieren 0,06 mg L⁻¹ d⁻¹ (Hasan et al., 2009).

La tolerancia a la temperatura varía ampliamente entre sus diversas especies. En general, *Azolla* spp., tiene baja tolerancia a altas temperaturas y eso restringe su uso en zonas tropicales. La temperatura óptima para el crecimiento está alrededor de 25°C. La temperatura del agua favorable para el crecimiento rápido está entre 18°C y 26°C, y la humedad relativa óptima para su crecimiento está entre 85% y 90%.

Utilización en depuración de aguas: en China, Yan et al. (1998) reportan que, los piscicultores utilizan las plantas acuáticas con el fin de eliminar nutrimentos de cuerpos de agua contaminados con vertidos de aguas residuales urbanas o provenientes de labores agrícolas y pecuarias, para evitar la eutrofización y utilizar la biomasa de las plantas como alimento para peces. Entre las principales especies utilizadas con este propósito reportan a *E. crassipes*, *P. stratiotes* y *Alternanthera philoxeroides* y como especies secundarias *Azolla filiculoides*, *Azolla imbricata*, *Spirodela polyrhiza*, *Wolffia arriza*, *Lemna minor* y *Lemna perpusilla*. Reportan rendimientos para *E. crassipes* entre 750 y 900 t ha-año⁻¹ y para *Azolla* spp. superiores a 230 t ha-año⁻¹.

Lemna spp. Lenteja de agua

El nombre común de lenteja de agua (Figura 17) se aplica a especies del género *Lemna* y otros géneros *Spirodela*, *Wolffia*, *Wolffiella*, de la familia de las *Lemnaceae*, debido a que todas ellas son plantas acuáticas herbáceas, flotantes, no enraizadas y de pequeño tamaño, con distribución mundial y cosmopolita en ambientes acuáticos. El aspecto externo de las *Lemnaceae* es el de pequeños cuerpos verdes (de 1,0 a 15,0 mm de longitud), más o menos redondeados, que reciben el nombre de ‘frondes’, porque no hay distintivamente hoja y tallo.

En la parte inferior del fronde puede existir una raíz (*Lemna*), varias raíces (*Spirodela*) o ninguna (*Wolffia* y *Wolffiella*). Las raíces en los géneros que las tienen, son también muy pequeñas, usualmente de longitud menor a 10,0 mm (Curt, 2004).

Para su propagación, la planta se reproduce vegetativamente desarrollando nuevos frondes en la base del fronde madre. Es usual que en una misma localización crezcan al tiempo varias especies de *Lemnaceae*; este hecho, unido a las similitudes morfológicas entre ellas y al pequeño tamaño de las especies dificulta su identificación en la población (Curt, 2004).



Figura 17. *Lemna* spp.

Distribución y ambiente: las *Lemnaceae* crecen bien en medios acuáticos con contaminación orgánica o medios eutrofizados. La reproducción se ve muy activada por la temperatura. Por ejemplo, a 27°C el área colonizada por *Lemna* sp. se duplica cada cuatro días (Curt, 2004). Las lentejas de agua sirven como bombas de nutrientes y reducen los efectos de eutrofización, proporcionando oxígeno a partir de su actividad fotosintética. A menudo, se observan creciendo en capas gruesas como mantas en aguas frescas y ligeramente salobres. No sobreviven en aguas rápidas (velocidades $> 0,3 \text{ m s}^{-1}$) o agua sin protección del viento. Crecen a la temperatura del agua entre 6°C y 33°C (Hasan et al., 2009).

Las lentejas de agua se adaptan a una amplia variedad de zonas geográficas y climáticas y están distribuidas en todo el mundo, excepto en regiones donde la temperatura cae por debajo de los 0°C durante parte del año. Aunque muchas especies pueden sobrevivir a temperaturas extremas, generalmente crecen más rápido bajo un clima cálido y soleado (Hasan et al., 2009).

Entre los factores ambientales que inciden en su desarrollo se tienen: la temperatura del agua, el pH y la concentración de los nutrientes. Otros de los factores ambientales que influyen en las tasas de crecimiento de las colonias de lenteja de agua son: la presencia de toxinas en el agua, el hacinamiento debido al crecimiento excesivo de la colonia y la competencia de otras plantas por la luz y los nutrientes. Sin embargo, se favorece la tasa de crecimiento de la lenteja de agua por contaminantes orgánicos y nutrientes inorgánicos. Toleran rangos de temperatura entre 0°C y 35°C (con un rango óptimo entre 15°C y 30°C); valores de pH entre 3,0 y 10,0 (con un rango óptimo entre 6,5 y 8,0), conductividades del agua entre 200 y 1.090 $\mu\text{S cm}^{-1}$, valores de N-NH_3 entre trazas y 375 mg L^{-1} (con un rango óptimo entre 7,0 y 12,0) y valores de P-PO_4 en el rango entre 0,017 y 154 mg L^{-1} (con un rango óptimo entre 4,0 y 8,0) (Hasan et al., 2009).

Utilización en depuración de aguas: las *Lemnaceae* pueden utilizarse en sistemas acuáticos de tratamiento de aguas residuales, de modo semejante a la aplicación de los jacintos de agua. En Estados Unidos se han llevado a cabo eficazmente instalaciones de tratamiento de aguas residuales con carga contaminante de 420 mg L⁻¹ como DBO₅ y 364 mg L⁻¹ de sólidos en suspensión con *Lemnaceae*. En relación con la remoción de nutrientes, se encontró que el cuerpo vegetativo de las *Lemnaceae* tiene un alto contenido en nitrógeno total (4,6% en promedio, en peso seco), por lo que, si se obtiene una alta productividad en biomasa y se retira del medio acuático periódicamente, pueden removerse del agua cantidades significativas de nitrógeno. Con respecto al fósforo, el contenido medio en la biomasa de *Lemnaceae* fue del orden del 0,8%; la remoción de este contaminante depende de la productividad del sistema (Curt, 2004).

Espinosa et al. (2002) emplearon un sistema en serie, de lagunas de *Lemnaceae* para el postratamiento de aguas residuales domésticas tratadas en un reactor anaeróbico, alcanzando remociones adicionales de carga orgánica, como DQO, del 29%. Korner et al. (1998) emplearon lagunas con *Lemna gibba* L. para el tratamiento de aguas residuales domésticas, con concentraciones de DQO, en el afluente entre 148 y 760 mg L⁻¹, obteniendo efluentes con concentraciones de DQO entre 34 y 148 mg L⁻¹, alcanzando remociones de carga orgánica, en términos de DQO entre el 77,03% y el 80,53%.

***Pennisetum purpureum* Schumach Pasto elefante morado**

El pasto elefante (Figura 18) se encuentra formando parte de la tribu Paniceae, una de las más ricas en géneros y especies dentro de la familia Graminae, es una especie tetraploide que crece a través de los trópicos húmedos de todo el mundo, es conocida con diversos nombres, como: falsa caña de azúcar, napier grass, hierba elefante, capin elefante, bajra. La hierba elefante es del tipo alto perenne, pudiendo alcanzar, sus tallos, alturas entre 1,0 a 3,0 m en suelos fértiles. Sus tallos son erectos y con nudosidades, en las cuales se encuentran las yemas y los primordios radicales. Debido a este hábito de crecimiento es preferido como un pasto para corte. Las hojas, envainadoras, son grandes pero su largo (60-100 cm) y ancho (2-4 cm) depende de la variedad y de la fase de desarrollo vegetativo o sexual, siendo más anchas en la primera. Las vainas inferiores son más largas que el entrenudo en las dos, cuatro y seis primeras hojas. La sierra de las hojas es más o menos fina. El número de estomas puede variar ligeramente, así como los nervios de la hoja. Los pelos de la vaina, en el cogollo pueden ser cortos o largos y los pelos del limbo pueden estar en la base o en todo el limbo, en el haz o en el envés. La inflorescencia de la hierba elefante es una panícula espiciforme, densa y cilíndrica, donde las espiguillas se disponen en grupos subsentados, rodeados de cerdas, con una principal más larga. El sistema radical es profundo, llegando a alcanzar los 450 cm de profundidad y nunca menos de 400 cm; no obstante, cuando esta hierba es sometida a corte, muchas de las raíces ocupan los primeros 10 cm de la capa superior del suelo y su extensión en esta profundidad depende del espaciamiento entre surcos y la profundidad de siembra (Machado et al., 1979).

Distribución y ambiente: su distribución está regulada principalmente por el requerimiento de altas temperaturas y precipitación no menor a los 1.000 mm/año. En algunas zonas su cultivo es restringido a pequeñas extensiones, debido a los altos requerimientos de agua de este pasto para producir altos volúmenes de forraje (Machado et al., 1979). Es una especie que se adapta bien a las condiciones tropicales y sub-tropicales, desde el nivel del mar hasta los 1.800 m, obteniendo su mejor desarrollo por debajo de los 1.500 m de altitud, con temperaturas entre 17°C a 27°C, siendo la óptima 25°C, con una humedad relativa entre el 60% y el 80%, con una precipitación de 1.200 a 2.200 mm/año (Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria [CORPOICA], 2014).



Figura 18. *Pennisetum purpureum*.

Se adapta a una amplia gama de suelos, prefiriendo suelos fértiles y profundos, en las zonas de alta pluviosidad del trópico. Aunque es recomendado en suelos salinos, preferentemente de origen arcilloso, sus rendimientos se ven afectados con el incremento de la salinidad, así como por las condiciones de alcalinidad (Machado et al., 1979).

Utilización en depuración de aguas: Ramírez (2015) reporta eficiencias de remoción del orden del 77,92% para la DQO, del 74,12% para la DBO₅, del 94,76% para los SST, del 42,01% para el N-NTK y del 24,01% para el P_T, para el pasto elefante morado, utilizado en humedales artificiales de flujo subsuperficial, tratando aguas residuales domésticas.

***Chrysopogon zizanioides* Pasto Vetiver**

El pasto vetiver (Figura 19) es una planta perenne de la familia de las gramíneas, originaria de India, de tupidos penachos, con inflorescencia y semilla estériles, que se reproducen con dificultad. Como no tiene rizoma radicular o haces enraizados, la planta crece en grandes macollos a partir de una masa radical muy ramificada y esponjosa. Sus tallos erguidos, en forma recta, alcanzan una altura de 0,5 a 1,5 m. Las hojas son relativamente rígidas, largas y angostas, tienen hasta 75,0 cm de largo y no más de 8,0 mm de ancho. La panícula (en donde se desarrolla la inflorescencia) tiene entre 15,0 a 40,0 cm de largo. A diferencia de la mayoría de las gramíneas, las raíces del vetiver crecen masivamente de manera vertical y alcanzan una profundidad de hasta 4,0 m. El proceso de propagación es una etapa muy importante para el buen establecimiento de la planta. La mejor forma de propagarlo es por esquejes, que asegura tener



Figura 19. *Chrysopogon zizanioides*.

una planta con las mismas características genéticas. Se define un esqueje como un material de propagación asexual, compuesto de pedazos de tallos y hojas (20 cm de alto) con una pequeña cantidad de raíces (no más de 5 cm) (Alegre, 2007).

Distribución y ambiente: la planta puede soportar sequías extremas, debido a su alto contenido de sales de la savia de sus hojas, así como inundaciones por largos períodos (se han reportado hasta 45 días de inundación en el terreno). Crece en un rango amplio de suelos y con diferentes niveles de fertilidad y puede resistir hasta temperaturas de -9°C desde el nivel del mar hasta los 2.500 m de altitud (Alegre, 2007).

El pasto vetiver es altamente tolerante a condiciones climáticas adversas (heladas, olas de calor, sequías, inundaciones), es altamente tolerante a condiciones edáficas adversas como la alta acidez del suelo y la alcalinidad, y es altamente tolerante a niveles elevados de metales pesados (Truong & Hart, 2001).

Utilización en depuración de aguas: el pasto vetiver fue reconocido por primera vez en 1995 por tener características “súper absorbentes”, adecuadas para la eliminación de lixiviados y efluentes generados en vertederos y plantas de tratamiento de aguas residuales; presenta tallos rígidos y erectos que pueden soportar flujos de alta velocidad, un crecimiento abundante y grueso que forma una barrera porosa viva que actúa como un filtro, atrapando sedimentos gruesos y finos y un sistema radical profundo, extenso y penetrante, que puede reducir y hasta eliminar los vertidos (Truong & Hart, 2001).

Ramírez (2015) reporta eficiencias de remoción promedio del orden del 65,61% para la DQO, del 57,41% para la DBO_5 , del 91,65% para los SST, del 38,07% para el N-NTK y del 22,00% para el P_r , para el pasto vetiver, utilizado en humedales artificiales de flujo subsuperficial, tratando aguas residuales domésticas.

Heliconias

Las heliconias (Figura 20) son plantas monocotiledóneas, herbáceas, perennes, con rizoma simpodialmente ramificado (emite brotes o vástagos) y un pseudotallo aéreo, erecto, formado por un eje recubierto por las bases de hojas alternas que se solapan (posición dística). Constituyen un género de plantas de grandes dimensiones, con hojas de nervadura

pinnada, cuyos nervios se prolongan paralelos hacia los bordes del limbo; esta característica y la ausencia de un tejido de refuerzo en los márgenes, hacen que ellos se desgarren en forma típica de lacinias. Su verdadero tallo está constituido por un vigoroso rizoma provisto de yemas vegetativas y abundantes, largas y fuertes raíces fibrosas. Las heliconias constituyen, junto a las alpinias, lirio antorcha y anturios, entre otros, un grupo de flores tropicales nativas de la América tropical (Jerez, 2007).

El género *Heliconia* presenta de 225 a 250 especies en el mundo; Colombia es el país que mayor número de especies tiene (aproximadamente 93). Las heliconias son el único género en la familia de las heliconiaceas que es miembro de un gran orden botánico llamado Zingiberales, al cual pertenecen también las familias Musacea (bananos y plátanos), Sterlitzia (aves del paraíso), Lowiaceae, Zingiberaceae (gingers), Costaceae (costus), Cannaceae (cannas y chirillas) y Marantaceae (calateas) (Jerez, 2007).

Distribución y ambiente: las heliconias presentan condiciones agronómicas favorables, como su alta resistencia a las diferentes condiciones climáticas y al ataque de plagas y enfermedades, así como su amplia rusticidad; además, su fácil propagación, largos períodos de floración y carácter permanente hacen de ellas renglones de significativa importancia para el trazado y cumplimiento de planes de producción en la explotación florícola. Las heliconias se propagan usualmente de manera natural a través del desarrollo de las yemas vegetativas presentes en su tallo rizomatoso. Debido a su centro de origen, las heliconias presentan exigencias ecológicas muy definidas, áreas con altas temperaturas y abundantes precipitaciones del trópico, pero pueden cultivarse en cualquier lugar, cuya temperatura media sea de unos 20°C, siempre que exista una abundante humedad edáfica. El clima ideal para el cultivo de estas especies varía entre una mínima de 18°C y una máxima de 34°C, además de abundante precipitación uniformemente distribuida a lo largo del año (Jerez, 2007).

Utilización en depuración de aguas:

Guerrero (2010) reporta eficiencias de remoción promedio del orden del 53,28% para la DBO₅ y del 72,32% para los SST, de heliconias combinadas con papiros, utilizadas en humedales artificiales de flujo subsuperficial, postratando aguas residuales domésticas.



Figura 20. Heliconias en humedales artificiales.

Cyperus papyrus L. Papiro

El papiro (Figura 21) es una especie de planta palustre, del género *Cyperus*, de la familia de las ciperáceas, es una planta originaria de la cuenca del mar Mediterráneo, que alcanzó una gran difusión en Egipto, creciendo en las orillas del río Nilo y su delta, y servía para elaborar los antiguos papiros manuscritos. El *Cyperus papyrus* L. es una herbácea acuática perenne, monocotiledónea, cespitosa, con rizomas horizontales cortos y gruesos, y un extenso aparato radical; presenta tallos (cañas) en secciones más bien triangulares, erectos, altos de 2,0 a 5,0 m, anchos en la base de hasta 6,0 cm, lisos, llenos de un tejido esponjoso (parénquima) en donde están presentes grandes espacios intercelulares que facilitan la circulación del aire, con el fin de llevar el oxígeno hacia las partes sumergidas y en su extremo superior porta hojas dispuestas en estrella. Sus hojas son de color verde jade, largas, delgadas, firmes, con espigas marrones, de 10,0 a 30,0 cm de largo, dispuestas en estrella. Tiene una gran inflorescencia, liviana y plumosa en abanico, los nuevos brotes surgen siempre del mismo segmento. Las plantas forman matorrales densos, que pueden alcanzar de 3,0 a 5,0 m de longitud, y hasta 6,0 m a su ápice. El papiro se multiplica principalmente a través de sus rizomas, de los que brotan nuevos troncos a intervalos regulares. También produce semillas que pueden ser transportadas por el viento (Patiño & Zhinín, 2015).

Distribución y ambiente: es una planta que ha sido ampliamente cultivada como ornamental; esta condición ha posibilitado su cultivo e introducción en el medio natural en áreas geográficas dispares y distantes, a lo largo del mundo, con el ser humano como vector de transporte. Su distribución actual como xenófito está ampliamente extendida, principalmente

en áreas geográficas de climas cálidos de América y Asia (Carballeira & Souto, 2018). Tolerancia a temperaturas entre 20°C y 33°C, y valores de pH en el rango entre 6,0 y 8,5. Crece sobre terrenos arenosos y colmados de humedad, con abundante insolación durante todo el año, pudiendo tener la base de su tronco totalmente sumergida en el agua (Patiño & Zhinín, 2015). El área nativa de *C. papyrus* comprende climas subtropicales y tropicales, pero también zonas de clima mediterráneo, como la costa egipcia y el delta del río Nilo, lo que indica que las temperaturas bajas ejercen un efecto negativo sobre el desarrollo de la especie, lo que puede ser un factor determinante en su asentamiento y distribución en el mundo (Carballeira & Souto, 2018).



Figura 21. *Cyperus papyrus*.

Utilización en depuración de aguas: Guerrero (2010) reporta eficiencias de remoción promedio, del orden del 56,74% para la DQO, 67,44% para la DBO₅ y del 75,00% para los SST, de papiros combinados con jenjibre, utilizados en humedales artificiales de flujo subsuperficial, postratando aguas residuales domésticas. Ramírez (2015) reporta eficiencias de remoción, promedio, del orden del 73,82% para la DQO, del 67,69% para la DBO₅, del 95,52% para los SST, del 37,94% para el N-NTK y del 22,61% para el P_r, para el papiro utilizado en humedales artificiales de flujo subsuperficial, tratando aguas residuales domésticas.

Densidades operacionales de las plantas en el tratamiento de aguas residuales

Reddy & DeBusk (1984) definen la densidad operacional de las plantas flotantes como “*un rango de densidad en la cual la producción de biomasa del sistema es operado para obtener los más altos rendimientos posibles*”. Estos autores reportan una densidad operacional en el rango entre 0,5 y 2,0 kg secos m⁻² para *Eichhornia crassipes* y entre 0,2 y 0,7 kg secos m⁻² para *Pistia stratiotes*, una densidad de arranque entre 6,8 y 9,0 kg húmedos m⁻² para *E. crassipes* y entre 1,0 y 2,0 kg húmedos m⁻² de *P. stratiotes*, en sistemas de tratamiento. Reddy & DeBusk (1985) reportan una densidad operacional para *Salvinia rotundifolia* en el rango de 35,0 a 240,0 g secos m⁻², para *Azolla* en el rango entre 10,0 y 80,0 g secos m⁻² y para *Lemna* entre 10,0 y 120,0 g secos m⁻².

Trabajos con jacinto acuático demostraron que había una velocidad máxima de crecimiento de hasta 5,4 g secos m⁻² d⁻¹ al inicio de los estudios, cuando había espacio suficiente en las lagunas; sin embargo, las velocidades decrecieron hasta 1,78 g secos m⁻² d⁻¹ cuando ya no había espacio suficiente, operando bajo temperaturas similares. Lo anterior señala la necesidad de cosechar periódicamente las plantas (Olguín et al., 1994).

Aparte del espacio, la cosecha de las plantas es necesaria, ya que la remoción de nutrientes es mayor cuando la planta está en crecimiento que cuando está madura, y además para evitar que la biomasa muerta penetre en el agua y demande oxígeno para su degradación (Olguín et al., 1994).

Se ha demostrado que la productividad del jacinto acuático está en función de la temperatura del aire, la disponibilidad de nutrientes (principalmente nitrógeno) y la densidad de la planta (Imaoka & Teranishi, 1988, citados por Olguín et al., 1994). Además, las plantas proveen sombra que impide el crecimiento de algas, permitiendo que actúe como filtro biológico, clarificando y purificando el agua.

Jing et al. (2002) utilizaron un cubrimiento inicial del 50% del área superficial de las lagunas de tratamiento para las especies flotantes *Ipomoea aquatica* y *Pistia stratiotes*, en el tratamiento de un agua residual sintética (simulando un agua residual doméstica), a escala de laboratorio.

Para el caso de las plantas emergentes, DeBusk et al. (1995) reportan unas densidades iniciales entre 8 y 48 plantas/m² para las plantas emergentes *Typha domingensis*, *Pontederia cordata*, *Canna flaccida*, *Sagittaria lancifolia*, *Sagittaria latifolia*, *Saururus cernuus*, *Peltandra virginica*, *Phragmites australis*, *Juncus effusus* y *Scirpus validus*, en el tratamiento de aguas residuales provenientes de la industria láctea. Grueso & Jaramillo (1998) reportan una densidad inicial de *Typha angustifolia* de 9 plantas/m², sembradas en cuadro cada 0,5 m, en el tratamiento de aguas residuales domésticas a escala de campo, y Cenicafé (1998) reporta una densidad de 25 plantas/m² en el postratamiento, a escala de laboratorio, de las aguas mieles del café tratadas anaerobiamente.

En la Tabla 2 se presentan las densidades de inicio y operacionales recomendadas para las plantas flotantes (jacinto de agua, lechuga de agua, oreja de agua, helecho de agua, lenteja de agua) utilizadas en humedales artificiales de flujo horizontal superficial (SHFL) y para las plantas emergentes (enea, heliconias, pasto vetiver, pasto elefante morado, papiro) utilizadas en humedales artificiales de flujo horizontal subsuperficial (SHFS) para el postratamiento de las aguas residuales generadas en las fincas cafeteras.

Tabla 2. Densidades iniciales y de operación recomendadas para las macrófitas utilizadas en humedales artificiales instalados para el postratamiento de las aguas residuales de las fincas cafeteras.

Plantas flotantes	Densidad inicial (biomasa fresca/m ²)	Densidad operacional (biomasa fresca/m ²)	Densidad inicial (porcentaje de cubrimiento)*	Densidad operacional (porcentaje de cubrimiento)*
Jacinto de agua	Entre 7,0 y 9,0 kg	Entre 5,0 y 20,0 kg	50	75
Lechuga de agua	Entre 1,0 y 2,0 kg	Entre 2,0 y 7,0 kg	50	75
Oreja de agua	Entre 0,4 y 1,0 kg	Entre 0,4 y 2,4 kg	50	75
Helecho de agua	Entre 0,1 y 0,3 kg	Entre 0,1 y 0,8 kg	50	75
Lenteja de agua	Entre 0,1 y 0,4 kg	Entre 0,1 y 1,2 kg	50	75
Plantas emergentes	Densidad inicial (plantas/m ²)	Densidad operacional (plantas/m ²)		
Enea	8-12	25-35		
Pasto vetiver	8-12	25-50		
Pasto elefante	8-10	20-30		
Heliconias	8-10	20-30		
Papiro	8-10	20-30		

(*) Para las plantas flotantes puede utilizarse cualquiera de los dos métodos: 1. Pesar la biomasa y adicionarla a la laguna o cubrir la laguna con las plantas flotantes hasta cubrir el 50% del espejo de agua al iniciar el tratamiento, y mantener mediante la cosecha periódica, el valor de la biomasa en el rango recomendado de operación, o mantener un 75% de cobertura del espejo de agua, durante el proceso de operación de los humedales, en este segundo caso no sería necesario retirar toda la biomasa para reincorporar el peso necesario, como sucede con el primer método, sólo se retira la biomasa que esté cubriendo más del 75% del espejo de agua.



Diseño de humedales artificiales

El proceso de diseño de los humedales artificiales, para el postratamiento de las aguas residuales de las fincas cafeteras, se basa en conceptos hidráulicos, microbiológicos y biológicos para simular y controlar los procesos de depuración físicos, químicos y biológicos que ocurren en los humedales naturales.

Para encontrar el tamaño, en metros cuadrados (m^2), que debe tener el área efectiva de tratamiento en el humedal artificial y para encontrar el valor, en días, que debe permanecer el agua residual en esta área de tratamiento, de forma que permita obtener un agua residual tratada con las características de calidad deseada, antes de ser reutilizada para otros usos o antes de ser descargada al suelo o a cuerpos de agua superficiales, se utilizan diferentes ecuaciones de diseño, que incluyen algunos parámetros cinéticos (velocidad de reacción), los cuales deben obtenerse experimentalmente, y en caso de no tenerlos, pueden utilizarse los generados en los diversos estudios realizados a escala de planta piloto y a escala de campo.

Las ecuaciones de diseño utilizadas en los humedales artificiales suponen que, los humedales se comportan como reactores de flujo ideal en pistón, es decir, que la calidad del agua varía de un punto a otro, a través de la dirección del flujo, en los cuales los contaminantes se degradan siguiendo modelos cinéticos de primer orden, es decir, que la velocidad de la reacción depende únicamente de un reactivo.

De acuerdo con el Título J del RAS (MAVDT, 2010) debe seleccionarse una metodología de diseño que garantice el correcto funcionamiento del sistema, teniendo en cuenta los siguientes criterios:

- Conductividad hidráulica
- Granulometría
- Flujo sumergido para todas las condiciones de caudales

Los principales parámetros de diseño de humedales artificiales incluyen:

- El área superficial del humedal (A_s)
- El tiempo de retención hidráulica del agua residual en el humedal (TRH)
- El área transversal del humedal (A_c)
- El ancho del humedal (W)
- El largo del humedal (L)
- La carga orgánica aplicada al humedal (C_L)
- La carga hidráulica aplicada al humedal (L_w)

Las unidades de medida utilizadas en los diferentes parámetros de diseño se basan en el Sistema Internacional de Unidades (Oficina Internacional de Pesas y Medidas, 2008) y su notación es la siguiente:

- Para unidades de masa: kilogramo (kg), gramo (g), miligramo (mg)
- Para unidades de tiempo: año (año), día (d), hora (h), minuto (min), segundo (s)
- Para unidades de longitud: metro (m), centímetro (cm), milímetro (mm)
- Para unidades de área: metro cuadrado (m²), hectárea (ha)
- Para unidades de volumen: metro cúbico (m³), litro (L), mililitro (mL)

Diseño de humedales artificiales de flujo horizontal superficial (SHFL) y de flujo horizontal subsuperficial (SHFS)

Los sistemas de plantas acuáticas flotantes son, conceptualmente, similares a los humedales artificiales de flujo horizontal superficial (SHFL), excepto por el hecho de que se emplean especies de plantas flotantes como jacinto, lechuga, oreja, helecho y lenteja de agua, por lo que las ecuaciones de diseño para estos sistemas son las mismas que se presentan para los humedales artificiales de flujo horizontal superficial. Para el caso de las especies emergentes sembradas sobre un lecho de grava (enea, heliconia, papiro, pasto elefante, pasto vetiver), se utilizan las mismas ecuaciones de diseño que se presentan para los humedales artificiales de flujo horizontal subsuperficial (Metcalf & Eddy, 1995).

Área superficial de tratamiento (A_s)

Se refiere al área sobre la superficie del terreno, necesaria para la construcción del humedal. Para su determinación el Título J del RAS (MAVDT, 2010) recomiendan dos alternativas:

Alternativa 1: usar los siguientes valores de carga hidráulica, para las aguas residuales de la vivienda: 0,032 m³ m⁻² d⁻¹ (para zonas frías o donde haya restricciones de espacio), y 0,021 m³ m⁻² d⁻¹ (para zonas donde haya restricciones de espacio) (MAVDT, 2010).

La carga hidráulica (L_w) es igual al caudal (Q), expresado en m³ d⁻¹, dividido entre el área (A_s), expresada en m², es decir, $L_w = Q/A_s$, por lo que el cálculo del área se obtendría de dividir el caudal del agua residual que ingresa al humedal entre la carga orgánica, de acuerdo con la expresión $A_s = Q/L_w$. La aplicación de esta alternativa se ilustra más adelante, en los ejemplos planteados.

Alternativa 2: utilizar un método que incluya la cinética del proceso de tratamiento (MAVDT, 2010). Para esta alternativa se utiliza la **Ecuación <1>** (U.S.EPA, 1988; Crites et al., 2006), recomendada en el Título J del RAS (MAVDT, 2010).

$$A_s = L * W = \left[\frac{Q \ln \left(\frac{C_o}{C_e} \right)}{K_T * d * n} \right] \quad <1>$$

Donde:

A_s = Área superficial necesaria, m².

L = Longitud del humedal, en m.

W = Ancho del humedal, en m.

Q = Caudal medio que circula a través del humedal, en m³ d⁻¹ = (Q_e+Q_s)/2.

Q_e = Caudal de entrada al humedal, en m³ d⁻¹.

Q_s = Caudal de salida del humedal, en m³ d⁻¹.

C_e = Concentración del contaminante en el efluente (salida del humedal), mg L⁻¹.

C_o = Concentración del contaminante en el afluente (ingreso al humedal), mg L⁻¹.

K_T = Constante de velocidad de primer orden, dependiente de la temperatura, d⁻¹. El valor de K_T depende del contaminante a eliminar (DBO₅, SST, N_r, P_T y coliformes, entre otros) y de la temperatura a la que se realiza el proceso de tratamiento.

$K_T = K_{20} (\Theta)^{(T-20)}$, T en °C, siendo K₂₀ la constante de velocidad a 20°C, Θ el coeficiente de temperatura a 20°C y T la temperatura promedio del agua residual en el humedal durante el proceso de depuración, en °C. Sus valores para humedales SHFL y SHFS se presentan en la Tabla 3.

Según U.S.EPA (1988), K₂₀ depende de la porosidad del medio, variando entre 1,84 para arena media y 0,86 para arena gravosa. Sus valores se presentan en la Tabla 4.

d = Profundidad del agua en el humedal, en m.

n = Porosidad o espacio utilizado por el agua para fluir a través del humedal. En los humedales horizontales de flujo superficial (SHFL) la vegetación, los sólidos sedimentados y las plantas secas ocupan un espacio en la columna de agua, mientras que en los humedales horizontales de flujo subsuperficial (SHFS) el medio, las raíces de las plantas y otros sólidos hacen lo mismo, reduciendo, de este modo, el espacio disponible para el agua (U.S.EPA, 2000), sus valores se presentan en la Tabla 5.

Tabla 3. Valores de la constante de velocidad y de temperatura, para diversos contaminantes*.

Contaminante	Tipo de humedal	Θ	K_{20} (d)	Referencia
DBO ₅	SHFL	1,100	0,0057	U.S.EPA (1988)
DBO ₅	SHFL con vegetación escasa	1,060	0,149	Rodríguez (2009)
DBO ₅	SHFL con vegetación escasa	1,090	0,150	Crites et al. (2006)
DBO ₅	SHFL con vegetación densa	1,060	0,486	Cenicafé (2010)
DBO ₅	SHFL con vegetación densa	1,060	0,678	Crites et al. (2006)
DBO ₅	SHFS con vegetación densa	1,060	0,906	Cenicafé (2010)
DBO ₅	SHFS con vegetación densa	1,060	1,100	Crites et al. (2006)
DBO ₅	SHFS con vegetación densa	1,060	1,100	Crites et al. (2006)
DBO ₅	SHFS con vegetación densa	1,060	1,104	Recomendado por USEPA, citado por Crites et al. (2006)
N-NH ₃	SHFL	1,048	0,219	Crites et al. (2006)
Coliformes	SHFL	1,190	2,600	Crites et al. (2006)

*El modelamiento de la remoción de la DBO₅ y de los SST es muy complicado en sistemas acuáticos de tratamiento ya que se trata de constituyentes aglomerados con partículas de diferentes tamaños. La DBO₅ del afluente puede estar en forma soluble, coloidal y particulada y su remoción puede ocurrir por mecanismos biológicos en condiciones aerobia, anóxica y anaerobia, así mismo por mecanismos físicos como la floculación y sedimentación. Como consecuencia de lo anterior, el valor de la constante de la tasa de remoción dependerá de la distribución de la DBO entre las tres fracciones. Por lo tanto, las constantes de la tasa de remoción que se usan en el diseño de sistemas acuáticos de tratamiento son constantes globales de la tasa de remoción y deben ser modificadas para reflejar la naturaleza de la DBO en aplicaciones específicas (Crites et al., 2000).

Tabla 4. Porosidad, conductividad hidráulica y K_{20} de algunos medios de empaque en humedales de flujo subsuperficial (SHFS). Fuente: U.S.EPA (1988).

Tipo de medio	Tamaño efectivo D_{10}^* (mm)	Porosidad, n (%)	Conductividad hidráulica, K_s (m ³ m ⁻² d ⁻¹)	K_{20}
Arena media	1	0,42	420	1,84
Arena gruesa	2	0,39	480	1,35
Arena gravosa	8	0,35	500	0,86

Tabla 5. Valores de porosidad (n) en humedales artificiales de flujo superficial (SHFL)*

Característica del humedal	Valor	Referencia
Sin vegetación	1,00	U.S.EPA (2000)
Completamente colonizados por la vegetación	0,65–0,75	U.S.EPA (2000)
Con vegetación completa densa (0,65) hasta vegetación menos madura (0,75)	0,65–0,75	Reed et al. (1998), citados por U.S.EPA (2000)
Con vegetación poco densa	0,95–1,00	Kadlec & Knight (1996), citados por U.S.EPA (2000)
Con vegetación madura	0,75	Gearheart (1997), citado por U.S.EPA (2000)

*Para el diseño hidrológico puede utilizarse un valor de porosidad promedio basado en el porcentaje de cubrimiento por la vegetación. Por ejemplo, un humedal con el 50% del espejo de agua sin plantas emergentes tendría un $n=1,0$ y con un 50% de cubrimiento con vegetación emergente tendría un $n = 0,75$, El promedio sería $n = 0,875$ (U.S.EPA, 2000).

La porosidad del medio de empaque varía entre 0,28 y 0,45 para humedales de flujo subsuperficial (SHFS). En la Tabla 6 se indican las características de los medios normalmente empleados en sistemas SHFS, según Reed et al. (1998).

Tabla 6. Características típicas del medio en humedales de flujo subsuperficial. Fuente: Reed et al. (1998).

Tipo de medio	Tamaño efectivo D_{10}^* (mm)	Porosidad, n (%)	Conductividad hidráulica, K_s ($m^3 m^{-2} d^{-1}$)
Arena gruesa	2	28 a 32	100 a 1.000
Arena con grava	8	30 a 35	500 a 5.000
Grava fina	16	35 a 38	1.000 a 10.000
Grava mediana	32	36 a 40	10.000 a 50.000
Roca triturada	128	38 a 45	50.000 a 250.000

*Es el diámetro de una partícula en una distribución de peso de partículas que es más pequeña que todas, menos el 10% de las partículas.

Área transversal (A_c)

Se refiere al área del humedal perpendicular a la dirección del flujo. Se determina a partir de la **Ecuación <2>** (U.S.EPA, 1988), recomendada en el Título J del RAS (MAVDT, 2010).

$$A_c = \left[\frac{Q}{K_s * S} \right] \quad <2>$$

Donde:

A_c = Área Transversal, en m^2 .

Q = Caudal medio que circula a través del sistema en $m^3 d^{-1} = (Q_e + Q_s)/2$.

Q_e = Caudal de entrada al humedal, en $m^3 d^{-1}$.

Q_s = Caudal de salida del humedal, en $m^3 d^{-1}$.

K_s = Conductividad hidráulica del medio, en $m^3 m^{-2} d^{-1}$.

S = Pendiente del depósito, en $m m^{-1}$ (como fracción).

Para los humedales SHFS, la velocidad de flujo $K_s \times S$ debe limitarse a $6,8 m d^{-1}$ para minimizar el arrastre localizado de películas biológicas (Metcalf & Eddy, 1995).

La conductividad hidráulica puede determinarse experimentalmente a través de la **Ecuación <3>** de Darcy, reportada por Klute & Dirksen (1986), a saber:

$$K_s = \frac{V * L}{A * t * (H_2 - H_1)} \quad <3>$$

Donde:

K_s = Conductividad hidráulica en $m d^{-1}$.

V = Volumen de agua que fluye a través del medio y recolectado en el tiempo (m^3).

A = Área de la sección transversal de conducción (m^2).

t = Tiempo (d).

$H_2 - H_1$ = Diferencia de cabeza hidráulica entre dos puntos de la muestra (m).

L = Longitud de la muestra (m).

Cuando no se tengan datos experimentales de la conductividad hidráulica, mediante la ecuación de Ergun puede relacionarse la porosidad (n) con la conductividad hidráulica K_s , para gravas gruesas o rocas, en diseños preliminares.

$K_s = n^{3,7}$ (válido para diseños preliminares) (Reed et al., 1998).

Ancho del estanque (W)

Se calcula a partir de la **Ecuación <4>** (U.S.EPA, 1988).

$$W = \left(\frac{A_c}{d} \right) \quad <4>$$

Donde:

W = Ancho del humedal, en m.

A_c = Área transversal, en m².

d = profundidad del agua en el humedal, en m.

Aspectos a tener en cuenta en el diseño de los humedales artificiales (MAVDT, 2010)

Respecto a la conductividad hidráulica. La conductividad utilizada para el diseño del humedal nunca puede ser mayor que la del medio de soporte. En el diseño del humedal debe reducirse dicha conductividad en un orden de magnitud, para tener en cuenta los efectos de atascamiento asociados a la retención de sólidos en los humedales. La conductividad hidráulica puede determinarse a partir de la **Ecuación <3>**.

Respecto a la pendiente del fondo del humedal. Se recomienda no usar la pendiente del fondo para ganar cabeza de presión, pues se corre el riesgo de dejar la entrada del humedal seca cuando se presenten condiciones de bajo caudal. Se recomienda una pendiente de fondo del humedal del 1,0%.

Respecto al punto de ingreso y salida del agua del humedal. Usar piedra con un tamaño entre 50 y 100 mm para cubrir un tramo de longitud del humedal de 0,6 m, alrededor del influente distribuidor y de las tuberías colectoras del efluente, para reducir el riesgo de taponamiento en el humedal.

Respecto al material de soporte del humedal. Usar solo sustrato lavado para eliminar los granos finos que puedan taponar los poros del sustrato y, posiblemente, causen flujo superficial.

Respecto a la berma del humedal. Construir la berma (margen del humedal) al menos 150 mm por encima del sustrato y al menos 150 mm por encima de la superficie de la tierra. Ancho mínimo de la berma = 0,60 m

Respecto a la profundidad del humedal. Se recomienda que la profundidad media del lecho sea 0,6 m y que la profundidad en la entrada no sea menor de 0,3 m. Con profundidades mayores a 0,6 m, las raíces más profundas y los rizomas empiezan a debilitarse. Se recomienda que los lechos se construyan con al menos 0,5 m de cabeza sobre la superficie del lecho.

Tiempo de retención hidráulica (TRH)

Se refiere al tiempo que debe permanecer el agua residual en el humedal para alcanzar el grado de depuración necesario.

Existen varias ecuaciones para obtenerlo, en función de los diferentes parámetros que se miden en el humedal.

A) Para la determinación del tiempo de retención hidráulica en humedales artificiales de flujo horizontal subsuperficial (SHFS), diseñados para la eliminación de DBO, se ha propuesto un modelo que asume flujo ideal de pistón (**Ecuación <5>**) (Reed et al., 1998).

$$\frac{C_e}{C_o} = \exp [- K_T * TRH] \quad <5>$$

Donde:

C_e = Concentración del contaminante en el efluente, mg L⁻¹.

C_o = Concentración del contaminante en el afluente, mg L⁻¹.

K_T = Constante de velocidad de primer orden dependiente de la temperatura, d⁻¹.

$K_T = K_{20} (1,06)^{(T-20)}$, T en °C y $K_{20} = 1,1$ d (Crites et al., 2006) para DBO₅.

TRH = Tiempo de retención hidráulica, en días.

B) Para los humedales artificiales de flujo horizontal subsuperficial (SHFS), el tiempo de retención hidráulica está en función de la conductividad hidráulica del medio y de la longitud del depósito y se expresa, de acuerdo con la **Ecuación <6>** (Reed et al., 1998).

$$TRH = \left[\frac{L}{K_s * S} \right] \quad <6>$$

Donde:

TRH = Tiempo de retención hidráulica, en días, para SHFS.

L = Longitud del humedal, en metros.

K_s = Conductividad hidráulica, en m³ m⁻² d⁻¹.

S = Pendiente del depósito, en m m⁻¹.

C) El tiempo de retención hidráulica para humedales horizontales de flujo superficial (SHFL) y subsuperficial (SHFS) puede expresarse en función del caudal de diseño y de la geometría del sistema, mediante la **Ecuación <7>** (U.S.EPA, 1988).

$$TRH = \left(\frac{L * W * n * d}{Q} \right) \quad <7>$$

Donde:

TRH = Tiempo de retención hidráulica, en d, para SHFL, o tiempo de retención en los huecos intersticiales, en d, para SHFS.

L = Longitud del humedal, en m.

Q = Caudal medio que circula a través del sistema en $m^3 d^{-1} = (Q_e + Q_s)/2$.

Q_e = Caudal de entrada al humedal, en $m^3 d^{-1}$.

Q_s = Caudal de salida del humedal, en $m^3 d^{-1}$.

W = Ancho del humedal, en m.

d = Profundidad del agua en el humedal, en m.

n = Porosidad o espacio utilizado por el agua para fluir a través del humedal.

En la expresión contenida en la **Ecuación <7>**, es claro que si se aumenta el largo (L), el ancho (W), la profundidad (d) o la porosidad (n) del humedal, se aumentará el volumen del agua residual en el humedal y para el mismo caudal de entrada se incrementará el tiempo de retención hidráulica, lo que favorecerá el tratamiento del agua residual en el humedal.

En un humedal horizontal de flujo libre (SHFL) una porción del volumen disponible estará ocupado por la vegetación, por lo tanto, el tiempo de retención hidráulica será una función de la porosidad (n), la cual puede ser definida como el área de sección transversal restante disponible para el flujo. La porosidad puede calcularse de forma experimental a partir de la **Ecuación <8>** (U.S.EPA, 1988).

$$n = \frac{V_v}{V_T} \quad <8>$$

Donde:

n = Porosidad.

V_v = Volumen de espacios.

V_T = Volumen total.

D) Para el diseño de humedales de flujo horizontal superficial (SHFL), diseñados para la eliminación de la carga orgánica como DBO, el tiempo de retención hidráulica necesario puede estimarse empleando la **Ecuación <9>** que asume un modelo de eliminación de primer orden (U.S.EPA, 1988).

$$\frac{C_e}{C_o} = A * \exp [- 0,7 * K_T * (A_v)^{1,75} * TRH] \quad <9>$$

Donde:

C_e = Concentración del contaminante en el efluente, mg L⁻¹.

C_o = Concentración del contaminante en el afluente, mg L⁻¹.

A = Coeficiente determinado empíricamente que representa la fracción de DBO₅ no eliminada por sedimentación a la entrada del sistema. A tiene un valor de 0,52 para tratamiento primario; 0,70 a 0,85 para tratamiento secundario y 0,90 para tratamiento terciario (Reed et al., 1998).

-0,7 = Constante empírica (U.S.EPA, 1988).

K_T = Constante de velocidad de primer orden dependiente de la temperatura, d⁻¹.

A_v = Superficie específica de actividad microbiológica, m² m⁻³.

TRH = Tiempo de retención hidráulica, en d.

$K_T = K_{20} (1,1)^{(T-20)}$, T en °C (U.S.EPA, 1988).

$K_{20} = 0,0057 \text{ d}^{-1}$ para DBO₅ (U.S.EPA, 1988).

$A_v = 15,7 \text{ m}^2 \text{ m}^{-3}$.

$n = 0,75$

Carga hidráulica (L_w)

Se refiere al volumen de agua residual a tratar, que llega al humedal por metro cuadrado y por día. La carga hidráulica se calcula mediante la **Ecuación <10>** (U.S.EPA, 2000).

$$L_w = \left[\frac{Q}{L * W} \right] \quad <10>$$

Donde:

L_w = Carga hidráulica, m³ m⁻² d⁻¹

Q = Caudal medio que circula a través del sistema en m³ d⁻¹ = $(Q_e + Q_s)/2$.

L = Longitud del humedal, en m.

W = Ancho del humedal, en m.

Carga orgánica (C_L)

Se refiere a la cantidad de materia orgánica, expresada en kilogramos de DBO_5 , que llega al humedal por unidad de área y por día. La carga orgánica se calcula mediante la **Ecuación <11>** (U.S.EPA, 2000).

$$C_L = \left[\frac{Q * C_0}{A_s} \right] \quad <11>$$

Donde:

C_L = Carga orgánica, en $\text{kg ha}^{-1} \text{d}^{-1} \text{DBO}_5$.

Q = Caudal medio que circula a través del sistema en $\text{m}^3 \text{d}^{-1} = (Q_e + Q_s)/2$.

Q_e = Caudal de entrada al humedal, en $\text{m}^3 \text{d}^{-1}$.

Q_s = Caudal de salida del humedal, en $\text{m}^3 \text{d}^{-1}$.

C_0 = DBO_5 en el afluente, en g m^{-3} .

A_s = Área específica, m^2 .

Diseño hidráulico

El diseño hidráulico de un humedal artificial es crítico para el éxito de su rendimiento. Todos los modelos de diseño que se usan actualmente asumen condiciones uniformes de flujo pistón y que además no existen restricciones para el contacto entre los constituyentes del agua residual y los organismos responsables del tratamiento. La relación largo:ancho tiene gran influencia en el régimen hidráulico y en la resistencia al flujo del sistema. En teoría, grandes relaciones largo:ancho 10:1 o mayores asegurarían un flujo a pistón, pero en la parte alta se presentaría desbordamiento, debido al incremento de la resistencia al flujo causado por la acumulación de residuos de vegetación, principalmente en sistemas de flujo libre superficial. Por tanto, relaciones 1:1 hasta aproximadamente 3:1 o 4:1 son aceptables (Reed et al., 1998).

Diseño hidráulico de un humedal horizontal de flujo subsuperficial. La ley de Darcy, **Ecuación <12>**, describe el régimen de flujo en un medio poroso que es lo generalmente aceptado para el diseño de humedales de flujo subsuperficial usando suelo y arena como medio del lecho (Crites et al., 2006).

$$v = K_s * s = \left[\frac{Q}{W * y} \right] \quad <12>$$

Donde:

Q = Caudal medio que circula a través del sistema en $\text{m}^3 \text{d}^{-1} = (Q_e + Q_s)/2$.

$Q = K_s \times A_c \times S$.

Q_e = Caudal de entrada al humedal, en $\text{m}^3 \text{d}^{-1}$.

Q_s = Caudal de salida del humedal, en $\text{m}^3 \text{d}^{-1}$.

K_s = Conductividad hidráulica perpendicular a la dirección del flujo, $\text{m}^3 \text{m}^{-2} \text{d}^{-1}$.

A_c = Área de la sección transversal perpendicular al flujo, m^2 .

S = Gradiente hidráulico o pendiente de la superficie del agua en el sistema, m m^{-1} .

v = Velocidad de Darcy, la velocidad aparente de flujo a través de la totalidad del área de la sección transversal del lecho, m d^{-1} .

W = Ancho del humedal, m .

y = Profundidad del agua en el humedal, m .

Diseño hidráulico de un humedal horizontal de flujo superficial. El flujo está descrito por la ecuación de Manning, que define el flujo en canales abiertos. La velocidad de flujo del humedal está dada por la **Ecuación <13>**, depende de la profundidad del agua, de la pendiente del humedal y de la densidad de la vegetación. Para humedales SHFL la resistencia está distribuida sobre la totalidad de la columna de agua, ya que las plantas emergentes y los restos de vegetación están presentes en todo el espacio. La ecuación de Manning también asume flujo turbulento, lo que no es totalmente válido, pero es una aproximación aceptable (Crites et al., 2006).

$$v = \left[\frac{1}{n} * y^{2/3} * s^{1/2} \right] \quad \text{<13>}$$

Donde:

v = Velocidad de flujo, m s^{-1} .

n = Coeficiente de Manning, $\text{s m}^{-1/3}$.

y = Profundidad del agua en el humedal, m .

s = Gradiente hidráulico, o pendiente de la superficie del agua, m m^{-1} .

Para los humedales, el número de Manning (n) está en función de la profundidad del agua debido a la resistencia impuesta por la vegetación emergente. La resistencia también depende de la densidad de la vegetación y de la capa de residuos que puede variar. La relación está definida por la **Ecuación <14>** (Crites et al., 2006).

$$n = \left[\frac{a}{y^{1/2}} \right] \quad <14>$$

Donde:

a: factor de resistencia y tiene valores de 0,4 para vegetación escasa y profundidad del agua >0,4 m; un valor de 1,6 para vegetación moderadamente densa y profundidad del agua ≥0,3 m; un valor de 6,4 para vegetación muy densa y capa de residuos, en humedales con profundidades <0,3 m. Sus unidades son s x m^{1/6} (Crites et al., 2006).

Eliminación de Sólidos Suspendidos Totales (SST) en humedales artificiales

La eliminación de SST, en humedales horizontales de flujo superficial (SHFL), está dada por la Ecuación <15> (Crites et al., 2006).

$$\frac{C_e}{C_o} = (0,1139 + 0,00213 * Lw) \quad <15>$$

La eliminación de SST, en humedales horizontales de flujo subsuperficial (SHFS), está dada por la Ecuación <16> (Crites et al., 2006).

$$\frac{C_e}{C_o} = (0,1058 + 0,0011 * Lw) \quad <16>$$

Donde:

C_e = concentración de SST en el efluente (salida del humedal), mg L⁻¹.

C_o = concentración de SST en el afluente (ingreso al humedal), mg L⁻¹.

L_w = carga hidráulica, en cm d⁻¹.

En la Tabla 7 se indican los intervalos de valores recomendados para los parámetros de diseño, en la eliminación de DBO₅, según Metcalf & Eddy (1995), para humedales artificiales horizontales de flujo superficial y subsuperficial.

Tabla 7. Valores recomendados para el diseño de humedales de flujo horizontal. *Fuente: Metcalf & Eddy (1995).*

Parámetro de diseño	Unidades	Tipo de humedal	
		Flujo libre (SHFL)	Flujo Subsuperficial (SHFS)
Tiempo de retención hidráulica	d	4–15	4–15
Profundidad del agua	m	0,1 – 0,60	0,3 – 0,75
Carga de DBO ₅	kg ha ⁻¹ d ⁻¹	< 67	< 67
Carga hidráulica	m ³ m ⁻² d ⁻¹	0,014 – 0,046	0,014 – 0,046
Superficie específica	ha 10 ⁻³ m ⁻³	7,1 – 2,15	7,1 – 2,15

En la Tabla 8 se indican los criterios típicos recomendados para los parámetros de diseño, en la eliminación de DBO₅, N_T y SST, según Crites et al. (2000), para humedales artificiales horizontales de flujo superficial y subsuperficial, de acuerdo con la calidad esperada del efluente.

Tabla 8. Criterios típicos para el diseño de humedales y calidad de los efluentes esperados. *Fuente: Adaptado de Crites et al. (2000).*

Parámetro de diseño	Unidades	Tipo de humedal	
		Flujo libre (SHFL)	Flujo Subsuperficial (SHFS)
Tiempo de retención hidráulica	d	2 – 5 DBO ₅ 7 – 14 N _T	3 – 4 DBO ₅ 6 – 10 N _T
Tasa de carga de DBO ₅	kg ha ⁻¹ d ⁻¹	< 110	< 110
Tasa de carga de SST	kg m ⁻² d ⁻¹	-	0,04
Profundidad del agua	m	0,06 – 0,45	0,30 – 0,61
Profundidad del medio	m	-	0,46 – 0,76
Tamaño mínimo	m ² m ⁻³ d ⁻¹	5,3 – 10,7	-
Relación L:W	-	2:1 a 4:1	-
Control de mosquitos	-	Requerido	No se requiere
Intervalo de cosecha	Año	3-5/año	No se requiere

Continúa...

... Continuación Tabla 8.

Parámetro de diseño	Unidades	Tipo de humedal	
		Flujo libre (SHFL)	Flujo Subsuperficial (SHFS)
Calidad esperada del efluente			
DBO ₅	mg L ⁻¹	< 20	< 20
SST	mg L ⁻¹	< 20	< 20
N _T	mg L ⁻¹	< 10	< 10
P _T	mg L ⁻¹	< 5	< 5

En la Tabla 9 se condensan los valores típicos indicativos de los parámetros de diseño de los sistemas de plantas acuáticas para diferentes niveles de tratamiento, analizando también el control de mosquitos y la cosecha de las plantas (Metcalf & Eddy, 1995).

Tabla 9. Criterios de diseño típicos y calidad del efluente esperada en sistemas de tratamiento con plantas acuáticas flotantes. *Fuente: Metcalf & Eddy (1995).*

Elemento	Tipo de tratamiento con jacintos de agua			Sistemas de tratamiento con lentejas de agua
	Secundario aerobio (no aireado)	Secundario aerobio (aireado)	Eliminación nutrientes (aerobio no aireado)	
Criterios típicos designados				
Agua residual afluente	Desbastada o sedimentada	Desbastada o sedimentada	Secundario	Efluente de estanques facultativos
DBO afluente (mg L ⁻¹)	130 – 180	130 – 180	30	40
Carga de DBO (kg ha ⁻¹ d ⁻¹)	45–90	165–330	11–44	22 – 33
Profundidad de agua (m)	0,45 – 0,90	0,90 – 1,20	0,60 – 0,90	1,20 – 1,80
Tiempo de retención (d)	10–36	4–8	6–18	20–25
Carga hidráulica (L m ⁻² d ⁻¹)	18–56	93–280	37–150	56 – 84

Continúa...

... Continuación Tabla 9.

Elemento	Tipo de tratamiento con jacintos de agua			Sistemas de tratamiento con lentejas de agua
	Secundario aerobio (no aireado)	Secundario aerobio (aireado)	Eliminación nutrientes (aerobio no aireado)	
Temperatura del agua (°C)	> 10	> 10	> 10	> 7
Programa de cosecha	Anual a estacional	Entre dos veces al mes y de forma continua	Entre dos veces al mes y de forma continua	Para secundario periodicidad mensual; para eliminación de nutrientes periodicidad semanal
Calidad del efluente esperada				
DBO (mg L ⁻¹)	< 20	< 15	< 10	< 30 (< 10)
SST (mg L ⁻¹)	< 20	< 15	< 10	< 30 (< 10)
N _T (mg L ⁻¹)	< 15	< 15	< 5	< 15 (< 5)
P _T (mg L ⁻¹)	< 6	< 1-2	< 2-4	< 6 (< 1-2)

Los valores entre paréntesis son los relativos a la eliminación de nutrientes.

En la Tabla 10 se condensan los valores de área requeridos, reportados por diferentes autores, para el tratamiento de las aguas residuales domésticas.

Tabla 10. Área requerida de humedal, en m²/persona-eq., para aguas residuales de la vivienda.

Área requerida* (m ² /persona-eq)	Condición	Referencia
1,5 a 2,5	Aguas residuales pretratadas	Fernández (2004)
8,0	En zonas con T<10°C. Aguas residuales pretratadas	Hoffmann et al. (2011)
3,0	En zonas con T<20°C. Aguas residuales pretratadas	Hoffmann et al. (2011)
2,5 a 5,0	Aguas residuales pretratadas	Delgadillo et al. (2010)
1,0 a 2,0	Aguas residuales pretratadas	ONU-Habitat (2008)
5,0 a 10,0	Aguas residuales pretratadas	Tilley et al. (2014)
3,0 a 5,0	Aguas residuales pretratadas	Salazar (1988)

(*) Valor promedio: Entre 3,0 a 5,0 m²/persona-eq.

Procedimiento para el diseño de humedales artificiales (Adaptado de Crites et al., 2000)

En el diseño de humedales artificiales de flujo horizontal superficial (SHFL) y de humedales artificiales de flujo horizontal subsuperficial (SHFS), se recomiendan los siguientes pasos:

- Determinar los requerimientos limitantes del efluente para DBO_5 , SST, N_T y P_T , con base en los valores de calidad exigidos en la normativa colombiana en la Resolución 1256 del 2021, Resolución 631 del 2015, Decreto 50 del 2018, Resolución 699 del 2021 o las normativas que las deroguen.
- Seleccionar la constante de velocidad apropiada y correcta, de la tasa de remoción de los contaminantes en función de la temperatura (Tabla 3).
- Calcular el tiempo de retención para obtener el nivel deseado de remoción de la DBO_5 , asumiendo una cinética de primer orden y suponiendo un flujo ideal de pistón. Dado que se conocería la concentración de entrada y salida de la DBO_5 , se recomienda utilizar la **Ecuación <5>**.
- Si la DBO_5 y los SST son los únicos parámetros que es preciso remover, debe verificarse la tasa de carga orgánica y debe seleccionarse la mayor de las dos áreas de tratamiento calculadas.
- Determinar el tiempo de retención requerido para la remoción de N_T .
- Para el diseño, debe seleccionarse el mayor tiempo de retención, con base en los parámetros limitantes del mismo.
- Determinar el área necesaria. Aumentar el área de 15% al 25% como factor de seguridad.
- Para los humedales SHFS, con la ley de Darcy, debe calcularse el área de la sección transversal necesaria para el flujo (**Ecuación <2>**).
- Conociendo el área de la sección transversal, debe calcularse el ancho, dividiendo el área por la profundidad (**Ecuación <4>**).
- Para los humedales tipo SHFL y SHFS, debe calcularse la longitud del lecho, de manera que cumpla con el área superficial necesaria (**Ecuación <1>**) (**$A_s = \text{Ancho} \times \text{Largo}$**).
- Verificar las dimensiones razonables del lecho. La relación, ancho a longitud, puede variar de 1:2 hasta 1:4. Debe ajustarse la longitud o el ancho, tanto como sea necesario, considerando las limitaciones del lugar.
- Verificar las pérdidas por fricción, para asegurar una cabeza hidráulica entre la entrada del afluente y la salida del efluente.

Diseño simplificado de humedales artificiales para el postratamiento de las aguas residuales domésticas generadas en fincas cafeteras (humedales pequeños operando en el sitio)

(Adaptado de Steiner & Watson, 1993, citado por Crites et al., 2006)

Se recomienda realizar los siguientes pasos:

- Determine el caudal de diseño. Si no hay datos, puede asumirse una producción de aguas residuales de 100 L/persona-d, para personal permanente y de 50 L/persona-d para personal temporal, de acuerdo con lo establecido en el Título E del RAS (MAVDT, 2000).
- Implemente un sistema séptico para el manejo de las aguas residuales de la vivienda, que involucre trampa de grasa, tanque séptico y filtro anaeróbico de flujo ascendente (FAFA), de acuerdo con los requerimientos del Título E del RAS (MAVDT, 2000) y Título J del RAS (MAVDT, 2010) (Rodríguez et al., 2022).
- Suponga que la DBO_5 que sale del FAFA tiene un valor constante de 40 mg L^{-1} . Según el Ministerio del Medio Ambiente, 2002, las aguas residuales domésticas tienen una concentración media de DBO_5 de 200 mg L^{-1} y la eficiencia del sistema séptico hasta el FAFA es del 80%.
- Asuma que la DBO_5 del efluente del humedal no excederá los 10 mg L^{-1} .
- Utilice grava limpia y lavada como medio de tratamiento en el humedal, con un tamaño medio entre 1,25 a 2,50 cm, con una profundidad total de 0,60 m.
- Para el diseño, suponga que la profundidad efectiva del agua en el humedal es de 0,55 m.
- Estime, para el medio de soporte del humedal, una conductividad hidráulica (K_s) de $1.500 \text{ m}^3 \text{ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ y una porosidad de 0,38.
- Utilice una planta emergente (enea, papiro, pasto elefante morado, pasto vetiver, heliconias).
- Registre la temperatura del agua en el humedal, si no la puede medir, asuma que está por debajo de la temperatura ambiente en 2°C .
- Determine el área de la superficie del humedal (A_s), utilizando la **Ecuación <1>**. Como factor de seguridad, utilice una tasa constante K_{20} que sea el 75% del valor base ($1,104 \text{ d}^{-1}$). Entonces, para el diseño de pequeños sistemas en el sitio, $K_{20} = 0,828 \text{ d}^{-1}$. Para el cálculo de K_T , utilice la ecuación: $K_T = K_{20} (1,06)^{(T-20)}$. Siendo T la temperatura del agua en el humedal. A 20°C , y con los otros factores definidos anteriormente, esta ecuación se reduce a: $A_s = 8 \times Q$, siendo Q el caudal que ingresa al humedal. La ecuación debe ajustarse si se tienen otras temperaturas y otros tipos de medios de soporte para la vegetación.
- Adopte una relación de aspecto del humedal (largo a ancho) de, máximo 4:1, con lo cual se permite que se cumpla la Ley de Darcy y, por lo tanto, no se tendrían inconvenientes en el diseño hidráulico del humedal, no siendo necesarios los cálculos hidráulicos. Si las condiciones del sitio no permiten que se adopte la relación largo:ancho de máximo 4:1, será necesario realizar los cálculos hidráulicos, a partir de las ecuaciones respectivas.
- Con este enfoque de diseño se obtendrá un TRH de aproximadamente 2 días (a 20°C) en el humedal, que es apropiado para obtener una DBO_5 de 10 mg L^{-1} . Si la eliminación de nitrógeno se requiere hasta 10 mg L^{-1} , el tamaño del sistema debe duplicarse para tener un TRH de aproximadamente 4 días.

Ejemplo del cálculo del área de un humedal artificial para el postratamiento de las aguas residuales domésticas

Si en la vivienda de la finca, viven cinco personas permanentes y en época de cosecha trabajan tres recolectores (sin pernoctar en la finca), ¿Cuál sería el área de un humedal para postratar las aguas residuales de la vivienda que salen del filtro anaeróbico de flujo ascendente (FAFA), si la temperatura media de la finca es de 22°C?

.....

→ Solución 1. Utilizando un valor promedio de área/persona-equivalente

De acuerdo con lo condensado en la Tabla 10, el valor medio del rango promedio es de 4 m²/persona – equivalente. Por lo tanto, se requiere un área superficial de:

$$A_s = 8 \text{ personas (5 permanentes + 3 temporales)} \times 4 \text{ m}^2/\text{persona}$$

$$A_s = 32 \text{ m}^2$$

El área superficial necesaria para la construcción del humedal es de 32 m²

Dado que el Título E del RAS (MAVTD, 2000), establece que mínimo deben tenerse dos lagunas conectadas en serie, se requiere construir dos lagunas de 16 m², cada una, con un ancho entre 2,0 y 3,0 m y un largo entre 5,5 y 8,0 m, teniendo la precaución de que la relación del ancho:largo esté en el rango recomendado en los diseños hidráulicos (entre dos y cuatro). La profundidad del agua en las lagunas debe ser de 0,55 m.

.....

→ Solución 2. Utilizando un valor de carga hidráulica para zonas con restricciones de espacio

De acuerdo con lo reportado en el Título J del RAS, (MAVDT, 2010), debe usarse un valor de carga hidráulica de 0,021 m²m⁻³d⁻¹.

$$L_w = \left[\frac{Q}{L * W} \right] <10>$$

De la Ecuación <10>, se despeja L x W (largo x ancho), que es equivalente al área superficial (A_s).

$$A_s = Q/L_w$$

Q= Caudal diario de agua residual = 100 L/hab-d para las personas permanentes (clase baja, por referirse a un predio rural) y 50 L/hab-d para las personas temporales (se toma el valor de oficinas temporales, por el horario de trabajo), obtenido del Título E del RAS (MAVDT, 2000).

$$Q = 0,65 \text{ m}^3 \text{ d}^{-1}$$

$$L_w = 0,021 \text{ m}^3 \text{ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$$

$$A_s = Q/L_w = (0,65 \text{ m}^3 \text{ d}^{-1}) / (0,021 \text{ m}^3 \text{ m}^{-2} \text{ d}^{-1})$$

$$A_s = 31 \text{ m}^2$$

El área superficial necesaria para la construcción del humedal es de 31 m²

Dado que el Título E del RAS (MAVDT, 2000), establece que mínimo deben tenerse dos lagunas conectadas en serie, se requiere construir dos lagunas de 15,5 m², cada una, con un ancho entre 2,0 y 3,0 m y un largo entre 5,5 y 8,0 m, teniendo la precaución de que la relación del largo/ancho esté en el rango recomendado en los diseños hidráulicos (entre 2,0 y 4,0). La profundidad del agua en las lagunas debe ser de 0,55 m.

.....

→ **Solución 3. Utilizando un método que incluya la cinética del tratamiento**

De acuerdo con lo reportado en el Título J del RAS (MAVDT, 2010), debe usarse para el cálculo del área superficial, la Ecuación <1>.

$$A_s = L * W = \left[\frac{Q \ln \left(\frac{C_o}{C_e} \right)}{K_T * d * n} \right] \quad <1>$$

$$A_s = Q(\ln C_o - \ln C_e) / K_T \times d \times n$$

Q= Caudal diario de agua residual = 100 L/hab-d para las personas permanentes (clase baja, por referirse a un predio rural) y 50 L/hab-d para las personas temporales (se toma el valor de oficinas temporales, por el horario de trabajo), obtenido del Título E del RAS (MAVDT, 2000).

$$Q = 0,65 \text{ m}^3 \text{ d}^{-1}$$

C_e = Concentración de DBO_5 del efluente, mg L^{-1} y C_o = Concentración de DBO_5 del afluente, mg L^{-1}

Se asume una DBO_5 de salida del FAFA de 40 mg L^{-1} (C_o) y una exigencia de calidad en el efluente del humedal de 10 mg L^{-1} para la DBO_5 (C_e)

La profundidad del agua en el humedal sería de $0,55 \text{ m}$ (d)

La temperatura del agua en el humedal estaría 2°C por debajo de la temperatura ambiente: $22-2=20^\circ\text{C}$

Si se construye un humedal horizontal de flujo superficial, con vegetación poco densa

De la Tabla 3: $K_{20} = 0,150 \text{ d}^{-1}$, $\Theta = 1,06$ y para un factor de seguridad del 25%, en el diseño, se tiene:

$$K_T = 0,150 \times 0,75 \times (1,06)^{(20-20)} = 0,113 \text{ d}^{-1}. \text{ De la Tabla 5: Porosidad} = 0,95 \text{ (n)}$$

$$A_s = (0,65 \text{ m}^3 \text{ d}^{-1}) \times (\ln 40 - \ln 10) / (0,113 \text{ d}^{-1} \times 0,55 \text{ m} \times 0,95) = 15,3 \text{ m}^2$$

El área superficial necesaria para la construcción del humedal es de $15,3 \text{ m}^2$

Si se construye un humedal horizontal de flujo superficial, con vegetación densa

De la Tabla 3: $K_{20} = 0,678 \text{ d}^{-1}$, $\Theta = 1,06$ y para un factor de seguridad del 25%, en el diseño, se tiene:

$$K_T = 0,678 \times 0,75 \times (1,06)^{(20-20)} = 0,509 \text{ d}^{-1}. \text{ De la Tabla 5: Porosidad} = 0,75 \text{ (n)}$$

$$A_s = (0,65 \text{ m}^3 \text{ d}^{-1}) \times (\ln 40 - \ln 10) / (0,509 \text{ d}^{-1} \times 0,55 \text{ m} \times 0,75) = 4,3 \text{ m}^2$$

El área superficial necesaria para la construcción del humedal es de 4,3 m²

Si se construye un humedal horizontal de flujo subsuperficial, con vegetación densa

De la Tabla 3: $K_{20} = 1,104 \text{ d}^{-1}$, $\Theta = 1,06$ y para un factor de seguridad del 25%, en el diseño, se tiene:

$$K_T = 1,104 \times 0,75 \times (1,06)^{(20-20)} = 0,828 \text{ d}^{-1}. \text{ De la Tabla 5: Porosidad} = 0,38 \text{ (n)}$$

$$A_s = (0,65 \text{ m}^3 \text{ d}^{-1}) \times (\text{Ln } 40 - \text{Ln } 10) / (0,828 \text{ d}^{-1} \times 0,55 \text{ m} \times 0,38) = 5,2 \text{ m}^2.$$

El área superficial necesaria para la construcción del humedal es de 5,2 m²

Ejemplo del cálculo del área de un humedal artificial para el postratamiento de las aguas residuales del beneficio del café

Determinación del área requerida del humedal con base en la DBO_5

Una finca de 5,0 ha, con una producción media de 280 @ ha⁻¹ de cps, un día pico de producción del 3%, y un consumo específico de agua de 12 L kg⁻¹ de cps, a una temperatura media de 22°C, requiere de alternativas para el manejo y tratamiento de las aguas residuales del beneficio.

→ Solución

Para esta finca se diseña un SMTA con los siguientes tamaños: una trampa de pulpa de 150 L, un reactor hidrolítico de 20 m³, una recámara dosificadora de 250 L y un reactor metanogénico de 20 m³. El efluente del SMTA es vertido a un cuerpo de agua y sale con las siguientes características: pH de 6,32, DBO_5 de 775 mg L⁻¹, SST de 621 mg L⁻¹.

Dado que la finca está realizando el vertimiento a un cuerpo de agua superficial, la descarga debe cumplir con los parámetros de calidad exigidos en la Resolución 631 del 2015, la cual establece para productores que consuman más de 10 L de agua para

obtener 1 kg de cps, valores de pH entre 5 y 9, DBO₅ de 400 mg L⁻¹ y SST de 400 mg L⁻¹ en el agua descargada.

De acuerdo con lo anterior, el agua residual que sale del SMTA, sólo cumple en el parámetro de pH y debe ser postratada para disminuir la DBO₅ y los SST a los valores que exige la norma, para ello se recomienda la construcción de un humedal artificial a continuación del reactor metanogénico.

Si se construye un humedal horizontal de flujo subsuperficial, con vegetación densa

De acuerdo con el Título J del RAS (MAVDT, 2010), para el cálculo del área superficial debe usarse la **Ecuación <1>**.

$$A_s = L * W = \left[\frac{Q \ln \left(\frac{C_o}{C_e} \right)}{K_T * d * n} \right] \quad <1>$$

$$A_s = Q(\ln C_o - \ln C_e) / K_T * d * n$$

$$Q = \text{Caudal diario de agua residual} = 6,30 \text{ m}^3 \text{ d}^{-1}$$

C_e = Concentración de DBO₅ del efluente del humedal = 400 mg L⁻¹ (la concentración de la Resolución)

C_o = Concentración de DBO₅ del afluente del humedal = 775 mg L⁻¹ (la concentración del SMTA)

La profundidad del agua en el humedal sería de 0,55 m (d).

La temperatura del agua en el humedal estaría 2°C por debajo de la temperatura ambiente: 22-2=20°C.

De la Tabla 3: $K_{20} = 1,104 \text{ d}^{-1}$, $\Theta = 1,06$ y para un factor de seguridad del 25%, en el diseño, se tiene:

$$K_T = 1,104 * 0,75 * (1,06)^{(20-20)} = 0,828 \text{ d}^{-1}. \text{ De la Tabla 5: Porosidad} = 0,38 \text{ (n)}$$

$$A_s = 6,30 \text{ m}^3 \text{ d}^{-1} * (\ln 775 - \ln 400) / (0,828 \text{ d}^{-1} * 0,55 \text{ m} * 0,38) = 24,0 \text{ m}^2$$

El área superficial necesaria para la construcción del humedal es de 24,0 m²

Dado que el Título E del RAS (MAVDT, 2000), establece que mínimo deben tenerse dos lagunas conectadas en serie, se requiere construir dos lagunas de 12,0 m², cada una, con un ancho entre 2,0 y 3,0 m y un largo entre 4,0 y 6,0 m, teniendo la precaución que la relación del largo/ancho esté en el rango recomendado en los diseños hidráulicos (entre 2,0 y 4,0). La profundidad del agua en las lagunas debe ser de 0,55 m.

Determinación del área requerida del humedal con base en los SST

Del ejemplo anterior se estableció que el efluente del SMTA de una finca cafetera es vertido a un cuerpo de agua y sale con las siguientes características: pH de 6,32, DBO₅ de 775 mg L⁻¹, SST de 621 mg L⁻¹ y que debe ser postratada, dado que en la Resolución 631 del 2015, establece como valores máximos permisibles en la descarga una DBO₅ de 400 mg L⁻¹ y unos SST de 400 mg L⁻¹ y para ello se recomienda la construcción de un humedal artificial a continuación del reactor metanogénico.

Si se construye un humedal horizontal de flujo subsuperficial, con vegetación densa

Dado que se construye un humedal horizontal de flujo subsuperficial, debe usarse la Ecuación <16>.

$$\frac{C_e}{C_o} = (0,1058 + 0,0011 * L_w) \quad <16>$$

$$C_e/C_o = (0,1058 + 0,0011 L_w)$$

C_e = Concentración de SST del efluente del humedal = 400 mg L⁻¹ (la concentración de la Resolución)

C_o = Concentración de DBO₅ del afluente del humedal = 621 mg L⁻¹ (la concentración del SMTA).

L_w = Carga hidráulica en cm d⁻¹

Despejando la Ecuación <16>, obtenemos:

$$L_w = ((C_e/C_o) - 0,1058)/0,0011$$

$$L_w = ((400/621) - 0,1058)/0,0011 = 489,38 \text{ cm d}^{-1} \times 0,01 \text{ m cm}^{-1} = 4,89 \text{ m d}^{-1}$$

A partir de la Ecuación <10> se relaciona la carga hidráulica (L_w) con el área superficial (A_s).

$$L_w = \left[\frac{Q}{L * W} \right] \quad <10>$$

$$A_s = L \times W = Q/L_w$$

L = Longitud del humedal, en metros

W = Ancho del humedal, en metros

L_w = Carga hidráulica, $\text{m d}^{-1} = 4,89$

Q = Caudal medio que circula a través del sistema en $\text{m}^3 \text{d}^{-1} = 6,30$

$$A_s = (6,30 \text{ m}^3 \text{d}^{-1}) / (4,89 \text{ m d}^{-1}) = 1,29 \text{ m}^2$$

El área superficial necesaria del humedal para alcanzar con los parámetros de calidad exigidos por la normatividad para SST es de $1,29 \text{ m}^2$ y para DBO_5 es de $24,0 \text{ m}^2$.

Nota: Siempre que se requieran eliminar varios de los contaminantes del agua residual que llega al humedal, es necesario calcular el área necesaria para cada uno de los contaminantes y luego seleccionar el área mayor, pues esta aseguraría la eliminación de todos los contaminantes hasta los parámetros de calidad requeridos.

Por lo tanto, para el ejemplo propuesto, se requiere construir un humedal de $24,0 \text{ m}^2$.



Construcción de humedales artificiales

Una vez calculadas las necesidades de área superficial (As) del humedal, se procede a determinar el largo y el ancho, de forma que su relación no supere la razón 4:1. El paso siguiente es la selección del terreno, tal como se describió en el ítem 1.4. “Ubicación de los humedales”, luego se procede con la realización de la excavación, su impermeabilización, tanto del fondo como de las paredes, para evitar la infiltración y, a continuación, la adición del material de soporte, si se trata de humedales horizontales de flujo subsuperficial, la siembra del material vegetal y la canalización de los afluentes y efluentes en el humedal.

Como material impermeabilizante puede utilizarse polietileno de baja densidad (Agroblack Esp. 6 o superior) o polietileno de alta densidad (geomembrana de 20 o 30 mills), la ventaja de este último es su gran tiempo de duración comparado con el polietileno de baja densidad.

La salida del efluente tratado se recomienda establecerlo a un nivel máximo de 55,0 cm medido desde el fondo del humedal y a través de tubería de PVC de 1”, realizando la toma del agua desde el fondo del mismo. La profundidad total del humedal se recomienda que no supere los 0,6 m y la pendiente del humedal se recomienda establecerla entre el 1,0% y el 2,0% (Rodríguez, 2009).

Se recomienda realizar canales para desviar las aguas de escorrentía y evitar que ingresen a los humedales.

En la Figura 22 se detalla el proceso de construcción de los humedales, cuando tienen varias celdas, las cuales se conectan en serie.

En la Figura 23 se presenta el aspecto de una de las celdas del humedal. Si no se empaca con ningún material de soporte funciona como un humedal horizontal de flujo superficial (SHFL), si se empaca con grava funciona como un humedal horizontal de flujo subsuperficial (SHFS).

La composición, propiedades térmicas y mecánicas del material impermeabilizante se presentan en la Tabla 11.

Cuando se trata de humedales horizontales de flujo subsuperficial, a cada celda, debe adicionarse grava para la siembra de las plantas, de tal forma que cubra el dispositivo de salida. Se recomienda utilizar grava de tamaño medio, aproximadamente entre 1,5 y 2,5 cm de diámetro (Figura 24).

Paso seguido, se siembran plantas flotantes en los humedales horizontales de flujo superficial, tales como el jacinto de agua, la lechuga de agua, la oreja de agua, la lenteja de agua y el helecho de agua, entre otras, teniendo en cuenta la densidad inicial, expresada en kilogramos de biomasa fresca o en porcentaje de cubrimiento, como se indica en la Tabla 2 (Figura 25), y se siembran las plantas emergentes en los humedales horizontales de flujo subsuperficial, tales como la enea, pasto vetiver, pasto elefante morado, papiro y heliconias, teniendo en cuenta la densidad inicial en número de plantas/m², como se indica en la Tabla 2 (Figura 26).



1



2



3



4



5



6

Figura 22. Construcción de las celdas de los humedales. 1. Trazado y excavación; 2. Panorámica de las celdas construidas; 3. Material impermeabilizante y empaques de caucho, para evitar fugas; 4. Accesorios de salida; 5. Dispositivo de salida de cada celda (toma desde el fondo); 6. Marco para fijación del material impermeabilizante. *Fuente: Rodríguez (2009).*



Figura 23. Aspecto de una celda, de 1 m², de un humedal, que puede operar sin grava (SHFL) y con grava (SHFS). Fuente: Rodríguez (2009).

Tabla 11. Características de los materiales impermeabilizantes. Fuente: Adaptado de Productos Químicos Andinos [PQA] (2021).

Parámetro	Agroblack Esp 6	Geomembrana
Descripción	Lámina coextruída estabilizada con níquel y antioxidante (desarrollada para impermeabilización de reservorios)	Lámina soplada estabilizada con antioxidantes que le confieren una alta resistencia a los químicos y una excelente duración (recomendada para reservorios de agua)
Composición	Polietileno de baja densidad, pigmento	Polietileno de alta densidad, pigmento, antioxidantes
Tonalidad	Negro	Negro
Coextrusión	Tres y cinco capas	-

Continúa...

... Continuación Tabla 11.

Propiedades ópticas y térmicas			
Termicidad	85%	-	
Bloqueo UV	Total	-	
Propiedades mecánicas (Mínimo)			
Parámetro	Agroblack Esp 6	Geomembrana	
		20 mills	30 mills
Espesor promedio	0,15 mm	0,45 mm	0,68 mm
Resistencia al impacto	500 gf	-	-
Resistencia al rasgado dirección máquina	800 gf	-	-
Resistencia al rasgado dirección transversal	900 gf	6.322 gf	9.483 gf
Carga a la rotura dirección máquina	18,0 Mpa	-	-
Carga a la rotura dirección transversal	18,0 Mpa	-	-
Resistencia a la rotura	-	15,0 KN m ⁻¹	22,0 KN m ⁻¹
Resistencia en el punto de fluencia	-	8,0 KN m ⁻¹	11,0 KN m ⁻¹
Resistencia al punzonado	-	20.700 gf	30.591 gf



Figura 24. Aspecto de la grava utilizada en los humedales horizontales de flujo subsuperficial (SHFS), diámetro medio entre 15,0 y 25,0 mm. *Fuente: Rodríguez (2009).*



Figura 25. Densidad inicial de las plantas flotantes, cubriendo el 50% del espejo de agua en los humedales artificiales horizontales de flujo superficial. 1. Siembra del jacinto de agua; 2. Siembra de la lechuga de agua; 3. Siembra de la oreja de agua. *Fuente: Rodríguez (2009).*

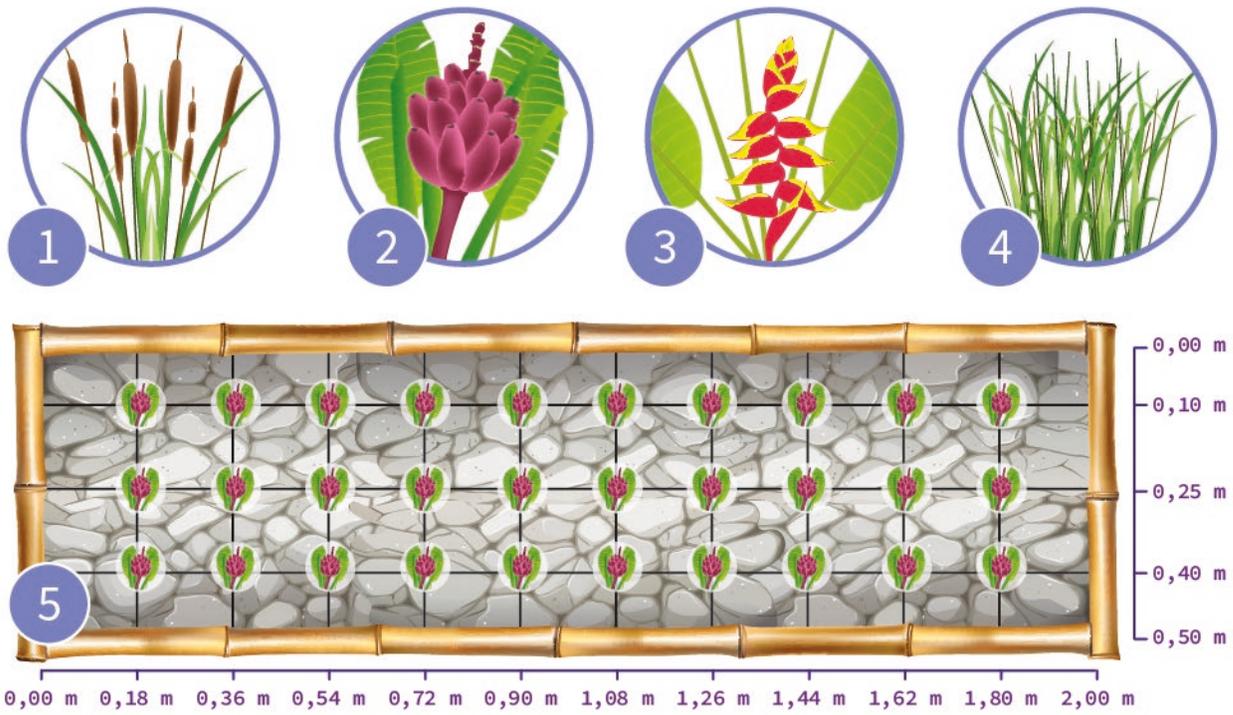


Figura 26. Algunas especies de plantas emergentes utilizadas en los humedales artificiales, de flujo horizontal subsuperficial, evaluadas en Cenicafé. 1. Enea (*Typha* spp.); 2. Bananito rojo (*Musa coccinea*); 3. Heliconias, *Heliconia* spp.; 4. Pasto vetiver, *Chrysopogon zizanioides*; 5. Distribución y distancias de siembra de las plantas emergentes en el humedal. *Fuente: Rodríguez (2009).*

Para la siembra de las plantas se retira todo el material extraño adherido a las raíces y se siembran el mismo día de extracción de la planta.

Para la siembra de la *Typha*, por ejemplo, debe retirarse todo el material extraño adherido a los rizomas, aplicando un lavado *in situ*; cortar ambos lados del rizoma, de forma que tenga una longitud aproximadamente de 15,0 cm; sembrar el mismo día de extracción de la planta, 5,0 cm por encima del fondo de las lagunas. Podar las plantas a una altura de 0,7 m, medidos desde la superficie de la grava, con el fin de iniciar con un cultivo uniforme (Figura 27).

Materiales necesarios para la instalación de un humedal artificial

Materiales por cada celda:

- Tubería de PVC-P de 1”
- Una Tee de PVC-P de 1”
- Dos codos de PVC-P de 1”.
- Un adaptador macho de PVC-P de 1”
- Un adaptador hembra de PVC-P de 1”
- Dos arandelas en neolite con perforación interna de 1”.
- Geomembrana de 20 o 30 mills o plástico agroleno espesor 6 o superior
- Guadua, para los marcos
- Puntillas o grapas con su respectiva grapadora
- Gravilla entre 1,5 cm y 2,5 cm, si el humedal es de flujo subsuperficial
- Vegetación, acorde al tipo de humedal y a las dimensiones del mismo

Herramientas necesarias para la instalación de un humedal artificial

- Mango sierra o serrucho
- Llave cadena o pico de loro
- Flexómetro
- Grapadora
- Martillo
- Alicata o pinza
- Pala y palín
- Tijeras

En la Figura 28 se presenta el diseño de algunos humedales que se realizaron durante la implementación del proyecto gestión Inteligente del agua (Rodríguez et al., 2018).



1



2

Figura 27. Siembra de la macrófita emergente *Typha* spp. 1. Aspecto de las plantas sembradas en el humedal; 2. Adición de la grava hasta alcanzar una altura de 60 cm. *Fuente: Rodríguez (2009).*

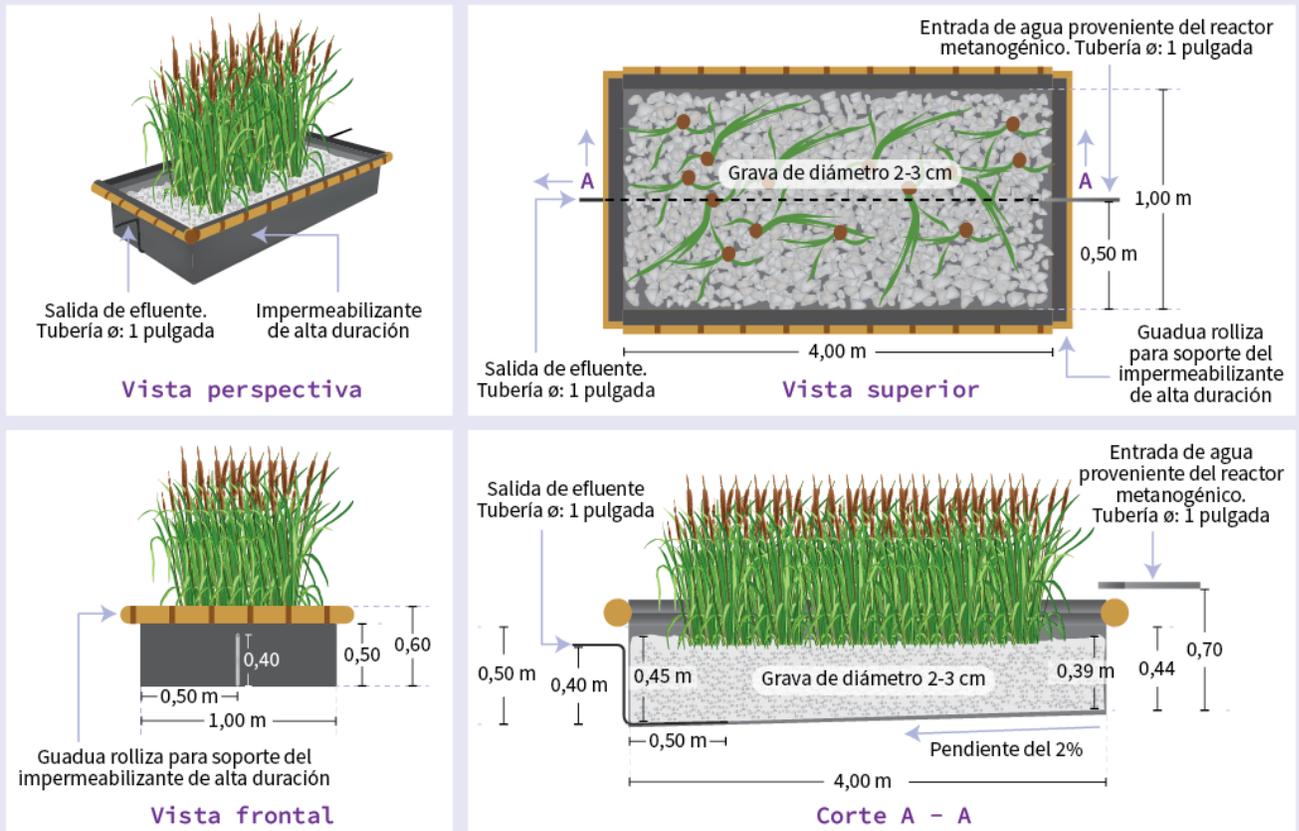


Figura 28. Esquema de humedales construidos e instalados en fincas cafeteras. *Fuente: Rodríguez et al. (2018).*



Operación y mantenimiento de los humedales artificiales

Se recomienda que la superficie del humedal se mantenga cubierta con vegetación. La elección de la vegetación depende del tipo de agua residual, de la radiación solar, la temperatura, la estética, la vida silvestre deseada, las especies nativas y la profundidad del humedal. Deben implementarse dos o más lagunas en serie por humedal. Las lagunas deben ser impermeabilizadas para evitar la infiltración. Es esencial que las raíces de la vegetación utilizada tengan siempre acceso al agua en el nivel de los rizomas en todas las condiciones de operación. Para medios muy permeables con alta conductividad hidráulica (tales como la grava), el Título J del RAS (MAVDT, 2010) recomienda que el nivel de agua se mantenga alrededor de 2,0 a 5,0 cm por debajo de la superficie del lecho.

Se ha demostrado que el diseño de los humedales en celdas en serie puede mejorar la calidad del efluente del humedal, entre otras cosas porque minimiza la posibilidad de aparecer caminos preferenciales en el sistema. Por ello, este diseño es el recomendado y especialmente con un mínimo de tres celdas en serie (U.S. EPA, 2000).

Las actividades de mantenimiento deben centrarse en garantizar que los tratamientos previos realizados al agua antes de que ingrese al humedal, como es el caso de los sistemas sépticos, para el caso de las aguas residuales domésticas de la vivienda campesina o los sistemas modulares de tratamiento anaerobio (SMTA), para el caso de las aguas residuales del beneficio del café, sean eficaces para reducir la concentración de sólidos suspendidos y de la carga orgánica expresada como DBO_5 , del agua que ingresa al humedal. Además, el mantenimiento debe garantizar que no crezcan árboles en el área, ya que las raíces pueden dañar el revestimiento que impermeabiliza las lagunas (Tilley et al., 2014).

Para los humedales artificiales horizontales de flujo superficial (SHFL), el mantenimiento constante, realizando la cosecha de la vegetación y la limpieza del área circundante, garantiza que el agua no se devuelva por ramas caídas, basura o elementos extraños, bloqueando la salida del agua del humedal (Tilley et al., 2014).

Para los humedales artificiales horizontales de flujo subsuperficial (SHFS), durante la primera temporada de crecimiento es importante eliminar las malas hierbas que puedan competir con la vegetación plantada en el humedal. Con el tiempo, la grava se obstruye con sólidos acumulados y biopelícula bacteriana. El material de filtro en la zona de entrada del humedal requiere ser reemplazado al menos cada 10 años (Tilley et al., 2014).

Los aspectos involucrados en el manejo de humedales de flujo libre (SHFL) incluyen el control de mosquitos, cosecha de la vegetación, consideraciones de vida silvestre y monitoreo. Para los humedales de flujo subsuperficial (SHFS) se involucran los aspectos relacionados con el manejo de la vegetación, la vida silvestre y el monitoreo (Crites et al., 2000).

Control de mosquitos

Es esencial en los humedales de flujo libre que utilizan jacintos de agua y lechuga de agua como vegetación y las estrategias más empleadas son la utilización de peces que se alimentan de las larvas de mosquitos, uso de controles biológicos (como es el caso de la aplicación de la bacteria *Bacillus thuringensis*), utilización de predadores y manejo de la vegetación con el fin de mantener las aguas abiertas y las vías para que los peces alcancen las larvas de los mosquitos (Crites et al., 2000). De no tener peces, se recomienda tener en el humedal un policultivo, utilizando pequeñas macrófitas (oreja de agua, lenteja de agua, helecho de agua) dado que las plantas sellan efectivamente la superficie de la laguna (Figura 29) y las hembras de los mosquitos no alcanzan el agua para colocar sus huevos (Crites et al., 2000).



Figura 29. Policultivo, jacinto, enea y salvinia, en humedales artificiales de flujo superficial, para cubrir el espejo de agua y evitar la proliferación del mosquito.

Cosecha de la vegetación

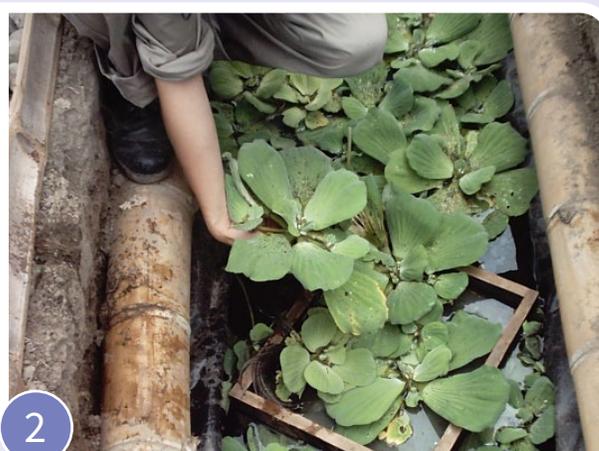
Para remover nutrientes, mantener la capacidad hidráulica, promover el crecimiento activo y evitar el crecimiento de los mosquitos, se cosecha la vegetación de los humedales artificiales (Figura 30 y 31), dejando en los SHFL una cobertura de la lámina de agua en un 75%, por parte de las plantas acuáticas flotantes, y en los SHFS el número indicado para las plantas emergentes (densidad operacional, como se reporta en la Tabla 2). Para estas últimas se recomienda podas, hasta 1,0 m de altura, cada tres meses, con el fin de mantener el cultivo uniforme, facilitar la labor de recolección de biomasa y estimular la extracción de nutrientes (Hazelip, 1998).

Manejo de lodos

Entre los sólidos que se acumulan en los sistemas acuáticos se hallan los detritos de las plantas, los sólidos inorgánicos y el lodo biológico. Por lo general, estos sólidos se remueven con poca frecuencia en los sistemas con jacintos y lentejas de agua (anualmente o con menos frecuencia, según se necesite) (Crites et al., 2000).



1



2



3



4

Figura 30. Cosecha de plantas flotantes en humedales de Cenicafé. 1. Pesaje de la biomasa del jacinto acuático; 2. Recolección de la lechuga de agua; 3. Recolección de la biomasa de la oreja de agua; 4. Pesaje de la biomasa de lechuga de agua. *Fuente: Rodríguez (2009).*



Figura 31. Biomasa de *Typha angustifolia*. 1. Recolección de hojas de enea en los humedales; 2. Pesaje de la biomasa de Enea. *Fuente: Rodríguez (2009).*

Monitoreo y control

Dentro de los aspectos que son necesarios controlar en los humedales artificiales están el flujo y la calidad del agua superficial. Para ello, se establecen vertederos de altura variable para verificar el flujo que sale del humedal y para determinar la calidad del agua se proveen puntos de muestreo y a las muestras recolectadas se le realizan análisis físico-químicos y microbiológicos (Crites et al., 2000).

Vida silvestre

El aspecto natural de los humedales artificiales y la disponibilidad de agua y alimento atraen a diferentes tipos de animales. Si promover hábitats es uno de los objetivos de la implementación de humedales artificiales, es necesario diseñar las estrategias necesarias que permitan alcanzar este propósito (Crites et al., 2000). En la Figura 32 se presentan imágenes de diferente fauna asociada a los humedales artificiales instalados en Cenicafé.

Utilización de la biomasa proveniente de los humedales

Las macrófitas acuáticas han sido consideradas, con frecuencia, como una plaga, debido a los inconvenientes que causa su prolífico crecimiento, requiriendo diversas formas de control (Wolverton & McDonald, 1979), dado que pueden invadir aguas superficiales, generando

problemas como obstrucción de las tomas de bombas, restricción del paso del agua en canales, contaminación del agua en estanques agrícolas, alteración de la sedimentación (al formar trampas que detienen los sedimentos), problemas de navegación, reducción de la penetración de la luz en el agua y disminución del nivel de oxígeno en el agua (por efecto de su descomposición) (Stanley, 1982). No obstante, si las macrófitas se manejan apropiadamente, pueden convertirse en una herramienta importante para el tratamiento de aguas residuales, dada su alta tasa de crecimiento, su capacidad de absorción de nutrientes y de bioacumulación de metales (Boyd, 1970).

En un intento de controlar la proliferación de plantas acuáticas se han hallado varios métodos para utilizar la biomasa de dichas plantas, llegando a la conclusión de que si la cosecha de las plantas puede ser provechosa, las medidas de control ya no serían necesarias (Lord, 1982).

En consecuencia, se han propuesto diversas formas de aprovechamiento, algunas ya muy utilizadas y otras que constituyen innovaciones. La producción de abonos orgánicos a partir de la biomasa es una de las prácticas más utilizadas (Gajalakshmi & Abbasi, 2002) y en la actualidad se utiliza la biomasa para la producción de biogás (Singhal & Rai, 2003), cultivo de hongos comestibles (Murugesan et al., 1995) y alimentación animal (Henry & Monteiro 2002). En India, el jacinto acuático se ha utilizado con éxito en la producción de papel, en industrias que requieren la inversión de pequeños capitales (Lord, 1982).

En China, uno de los usos que se le ha dado al jacinto acuático durante muchos años ha sido el de suplemento alimenticio para cerdos. Estos animales crecen en corrales cercanos a una pequeña laguna que contiene jacintos acuáticos. Los desechos de los cerdos se introducen en la laguna y contribuyen así al crecimiento prolífico de los jacintos acuáticos, que se cosechan a diario y se cocinan junto con otros alimentos para los animales. En otros países se ha utilizado el jacinto acuático como suplemento alimenticio para ganado bovino, sin embargo, no puede constituir la única fuente de alimentación (Lord, 1982).

Dependiendo del uso posterior que se realice de la biomasa, puede requerir un acondicionamiento y secado de la misma. En la Figura 33 se presenta la forma como se acondiciona la biomasa de las plantas cosechadas cuando son utilizadas como sustrato para el cultivo de hongos comestibles.



Figura 32. Diferente fauna visitante de los humedales artificiales horizontales de flujo superficial y subsuperficial, instalados en Cenicafé.



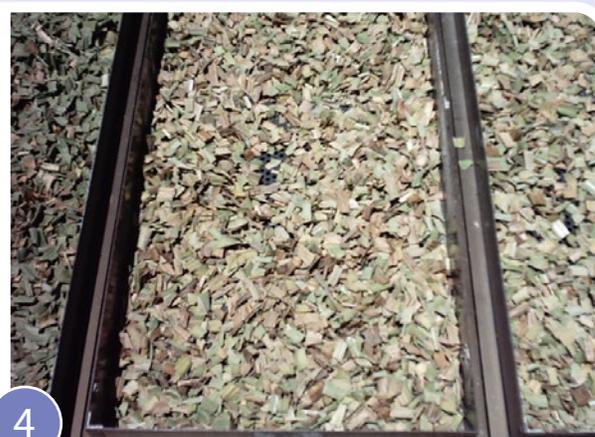
1



2



3



4

Figura 33. Adecuación de las plantas de los humedales para su aprovechamiento. 1. Adecuación del tamaño de partícula por medios mecánicos; 2. Adecuación del tamaño de partícula por medios manuales; 3 y 4. Secado solar de la biomasa cosechada. *Fuente: Rodríguez, 2009.*



Eficiencia de Los humedales artificiales en el postratamiento de aguas residuales

En la Tabla 12 se presentan las eficiencias de remoción alcanzadas para la DQO, la DBO₅, SST, N_T y P_T en los humedales horizontales de flujo superficial, con las diferentes especies evaluadas para el postratamiento de las aguas residuales del beneficio del café, provenientes de los sistemas modulares de tratamiento anaerobio (SMTA). De acuerdo con los resultados obtenidos con las diferentes especies, los porcentajes de remoción de la DBO₅ estuvieron en el rango entre 76,10% y 80,91% y para los SST entre 71,83% y 84,58% (parámetros que se utilizan para el cobro de la tasa retributiva, Decreto 2667 del 2012), estando en el rango de eficiencias reportado por U.S.EPA (1988) y Crites et al. (2006) para humedales artificiales.

Tabla 12. Eficiencias de remoción de algunos parámetros en humedales artificiales utilizados en el postratamiento de las aguas residuales del beneficio del café.

Especie	DQO (%)	DBO ₅ (%)	SST (%)	N _T (%)	P _T (%)
Jacinto de agua	79,21	80,91	78,68	48,01	64,35
Lechuga de agua	79,78	80,72	72,87	45,06	61,39
Oreja de agua	76,83	79,09	71,83	38,06	60,21
Enea	73,78	77,19	84,58	21,18	30,26
Heliconia	74,71	76,10	82,12	28,37	37,14
Pasto vetiver	76,75	78,23	84,27	47,24	62,15

En la Figura 34 se presenta el aspecto de los diversos humedales utilizados en el postratamiento de las aguas residuales del beneficio del café.

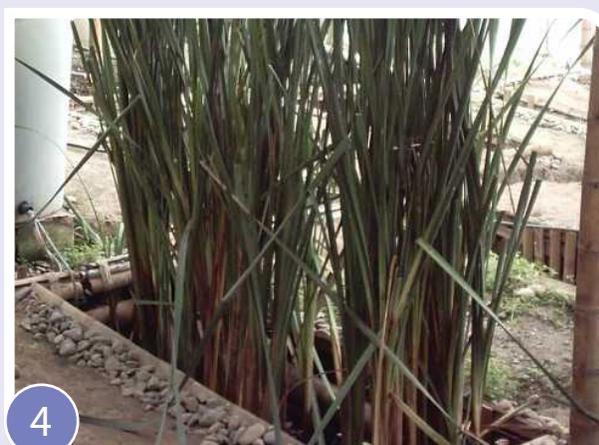


Figura 34. Plantas utilizadas en los humedales para el postratamiento de las aguas residuales del beneficio del café. 1. Jacinto acuático; 2. Lechuga de agua; 3. Oreja de agua; 4. Enea; 5. Heliconias; 6. Pasto vetiver.



**Ejemplos de
aprovechamiento de
la biomasa generada
en los humedales
artificiales**

De acuerdo con los resultados obtenidos por Rodríguez (2009) en los humedales artificiales utilizados para el postratamiento de las aguas residuales del café, las especies flotantes jacinto de agua y lechuga de agua, fueron las que presentaron las mayores tasas medias de crecimiento, con valores de 421 t ha⁻¹ año⁻¹ para el jacinto y 432 t ha⁻¹ año⁻¹ para la lechuga, para un promedio de 427 t ha⁻¹ año⁻¹ de biomasa fresca, con una humedad media de 89,25% y un valor en peso seco de 45,9 t ha⁻¹ año⁻¹. Para la especie emergente (Enea), la tasa media de crecimiento fue de 323 t ha⁻¹ año⁻¹ de biomasa fresca, con una humedad media del 79,50% y un valor en peso seco de 66,22 t ha⁻¹ año⁻¹. Esta biomasa se utilizó para la producción de abono orgánico y para el cultivo de hongos comestibles del género *Pleurotus* spp.

Producción de hongos comestibles en sustratos elaborados utilizando la biomasa de las plantas cosechadas como suplemento

Para el aprovechamiento de la biomasa cosechada, en el cultivo de los hongos comestibles, se utilizaron las cepas de *Pleurotus pulmonarius* (Fr.) Quél. y *Pleurotus sajor-caju* (Fr.) Sing y la metodología descrita por Rodríguez & Jaramillo (2005).

En la preparación de los sustratos para el cultivo de los hongos comestibles se consideró la oferta de biomasa en la finca cafetera relacionada con el cultivo y beneficio del café, siendo las dos materias primas predominantes, la pulpa y los tallos de café, y la oferta de la biomasa cosechada de los humedales. Rodríguez (2009) encontró que la relación apropiada para la conformación del sustrato para el cultivo de los hongos comestibles, en peso seco, fue: 42% de pulpa de café, 42% de tallos molidos de café y 16% de biomasa proveniente de los humedales. En la preparación del sustrato se realizaron los siguientes pasos (Figura 35 y 36) (Rodríguez, 2009):

- Para la caracterización de las materias primas, se analizaron los contenidos de humedad, cenizas y NPK en los materiales que conformaron las distintas formulaciones de sustrato. Se ajustó la relación C/N del sustrato de acuerdo con los requerimientos nutricionales de los hongos (Rodríguez & Jaramillo, 2005) (Tabla 13).
- Mezcla de los materiales para obtener un sustrato homogéneo.
- Para la adecuación y siembra de los sustratos, se llenaron bolsas de polipropileno con 1,0 kg de sustrato y se esterilizaron con vapor durante seis horas, a una temperatura de 94°C (tratamiento con calor) o se sumergió la mezcla en agua durante diez días (tratamiento sin calor) y luego se inocularon con la semilla de los hongos a una tasa del 2,5% en peso.

- La incubación del sustrato inoculado se realizó en un cuarto seco. Las estanterías se rociaron con carbonato de calcio para controlar hongos presentes en el ambiente y la presencia de insectos.
- La fructificación se realizó en un cuarto construido en guadua y esterilla.

Tabla 13. Características del sustrato, suplementado con biomasa proveniente de humedales, utilizado para el cultivo de *Pleurotus* spp. *Fuente: Rodríguez (2009).*

Relación C/N de las materias primas				
Materia prima	N (%)	Cenizas (%)	C (%)	C/N
Pulpa café	1,71	8,33	53,17	31
Aserrín tallo café	0,69	3,08	56,21	81
Jacinto acuático <i>Eichhornia crassipes</i>	2,55	34,61	37,93	15
Lechuga de agua <i>Pistia stratiotes</i>	2,91	38,26	35,81	12
Enea <i>Typha angustifolia</i>	1,60	14,15	49,79	31
Oreja de agua <i>Salvinia auriculata</i>	3,04	22,26	45,09	15
Peso de las materias primas				
Materia prima	Peso fresco (kg)	Humedad (%)	Peso seco (kg)	Peso seco del sustrato (%)
Pulpa café	28,40	79,20	5,91	40,77
Aserrín tallo café	7,00	16,55	5,84	40,31
<i>Eichhornia crassipes</i>	0,49	17,70	0,40	2,78
<i>Pistia stratiotes</i>	0,50	18,14	0,41	2,82
<i>Typha angustifolia</i>	1,40	17,63	1,15	7,96
<i>Salvinia auriculata</i>	0,41	17,92	0,34	2,32
Carbonato de calcio	0,45	1,97	0,44	3,04



Figura 35. Adecuación de los sustratos para el cultivo de los hongos. 1. Mezcla de las materias primas; 2. Aspecto del sustrato utilizado; 3. Embolsado del sustrato; 4. Adecuación del sustrato por tratamiento térmico; 5. Adecuación del sustrato por anaerobiosis; 6. Inoculación de los sustratos con la semilla de siembra de los hongos. *Fuente: Rodríguez (2009).*

Cuando no se dispuso de material cosechado de enea y oreja de agua, el 16% de la suplementación del sustrato se realizó con biomasa de jacinto de agua y lechuga de agua, representando el 8,0% del peso seco del sustrato, con una relación C/N de 37.



Figura 36. Condiciones del cultivo de los hongos. 1. Bloques de sustrato inoculados con el hongo durante la etapa de incubación; 2. Aspecto de los bloques con *Pleurotus* spp. al final de la etapa de incubación; 3. Bloques de sustrato en el cuarto de fructificación; 4. Aspecto de la fructificación de los hongos. Fuente: Rodríguez (2009).

Producción de hongos comestibles en sustratos elaborados utilizando la biomasa de las plantas cosechadas como único sustrato

Se realizaron ensayos de cultivo de los hongos comestibles utilizando como único sustrato la vegetación cosechada de los humedales y se comparó su rendimiento con un sustrato elaborado a partir de pulpa y tallos de café, por ser un sustrato recomendado por Rodríguez & Jaramillo (2005). La caracterización de los sustratos se presenta en la Tabla 14.

Tabla 14. Características de los sustratos sin suplementar con biomasa de los humedales y preparados con biomasa de los humedales, utilizados para el cultivo de *Pleurotus* spp. Fuente: Rodríguez (2009).

Sustratos a base de pulpa de café y aserrín de tallo de café (C/N = 46)				
Materia prima	Peso fresco (kg)	Humedad (%)	Peso seco (kg)	Peso seco del sustrato (%)
Pulpa café	13,83	80,11	2,75	48,5
Aserrín tallo de café	3,25	15,39	2,75	48,5
Carbonato de calcio	0,18	1,94	0,17	3,0
Sustratos a base de la biomasa cosechada de los humedales (C/N = 20)				
Materia prima	Peso fresco (kg)	Humedad (%)	Peso seco (kg)	Peso seco del sustrato (%)
<i>Typha angustifolia</i>	1,65	17,51	1,36	48,78
<i>Eichhornia crassipes</i>	0,96	17,87	0,79	28,26
<i>Pistia stratiotes</i>	0,47	18,24	0,38	13,77
<i>Salvinia auriculata</i>	0,24	17,63	0,20	7,09
Carbonato de calcio	0,06	2,01	0,06	2,11

En la Tabla 15 se presentan los valores del rendimiento medio alcanzado, la desviación estándar y los valores mínimos y máximos de la producción de hongos comestibles del género *Pleurotus*, en los diferentes sustratos.

Tabla 15. Promedio, desviación estándar, valores mínimos y máximos para la variable rendimiento de cosecha de hongos comestibles. Fuente: Adaptado de Rodríguez (2009).

Tratamiento	Rendimiento Promedio (%)	Desv. Estándar	Valor mínimo (%)	Valor máximo (%)
<i>Pleurotus sajor caju</i> cultivado en sustrato suplementado al 16% con biomasa cosechada de los humedales	103,85	32,98	72,12	214,93
<i>P. pulmonarius</i> cultivado en sustrato suplementado al 16% con biomasa cosechada de los humedales	128,55	40,70	87,28	243,18

Continúa...

... Continuación Tabla 15.

Tratamiento	Rendimiento Promedio (%)	Desv. Estándar	Valor mínimo (%)	Valor máximo (%)
<i>P. sajor caju</i> cultivado en sustrato sin suplementar con biomasa cosechada de los humedales	61,88	12,50	44,36	78,13
<i>P. pulmonarius</i> cultivado en sustrato sin suplementar con biomasa cosechada de los humedales	69,39	7,06	59,83	79,92
<i>P. sajor caju</i> cultivado en sustrato a partir de biomasa cosechada de los humedales	110,79	53,95	36,30	192,97
<i>P. pulmonarius</i> cultivado en sustrato a partir de biomasa cosechada de los humedales	95,58	39,32	39,28	158,99

De los datos condensados en la Tabla 15 puede concluirse:

1. La biomasa de las plantas acuáticas, como único sustrato, permite alcanzar con las dos cepas de hongos evaluadas, rendimientos en el cultivo mayores a los alcanzados con los subproductos del café (pulpa y tallos de café).
2. Al comparar los rendimientos alcanzados con los subproductos del café, sin suplementar con la biomasa de los humedales y utilizando mezclas de subproductos de café suplementadas al 16% con biomasa de los humedales, puede observarse que los rendimientos fueron mayores para ambas cepas evaluadas cuando los subproductos se suplementan con la biomasa cosechada de los humedales.

De acuerdo con lo anterior y considerando que la producción de biomasa de los humedales es muy inferior a la que se tendría en las fincas cafeteras a partir de pulpa y tallos de café, la mejor forma de aprovechamiento de la biomasa cosechada en los humedales sería como suplemento de los sustratos tradicionales utilizados en la zona cafetera para el cultivo de hongos comestibles del género *Pleurotus* spp., dado que permitió incrementar significativamente los rendimientos medios de los cultivos, con unos valores superiores a los que se obtuvieron utilizando los sustratos tradicionales sin suplementar y valores iguales o superiores a los encontrados cuando se utilizó únicamente la biomasa de las plantas como sustrato del cultivo.

En la Figura 37 se presentan aspectos de la etapa de fructificación, cosecha y poscosecha de las dos especies de *Pleurotus* sobre los diferentes tratamientos evaluados.



Figura 37. Producción de hongos comestibles. 1. Cultivo de *Pleurotus sajor caju* en sustrato con plantas acuáticas; 2. Cultivo de *Pleurotus sajor caju* en sustrato de pulpa y aserrín de tallos de café; 3. Aspecto de *Pleurotus sajor caju* y *Pleurotus pulmonarius* en los sustratos tradicionales suplementados con biomasa cosechada en los humedales; 4. hongos recolectados; 5. Empaque de carpóforos de *Pleurotus pulmonarius*; 6. Empaque de carpóforos de *Pleurotus sajor caju*. Fuente: Rodríguez (2009).

Producción de abono orgánico con biomasa de las plantas cosechadas

Se utilizó la lombriz roja, *Eisenia foetida* Savigny, proveniente de los lombricultivos a base de pulpa de café instalados en Cenicafé, La Granja, siguiendo la metodología descrita por Dávila & Ramírez (1996).

Se evaluó el proceso de lombricompostaje para la producción de abono orgánico a partir de biomasa sola y mezclada de las diferentes especies acuáticas evaluadas.

De cada una de las plantas acuáticas se utilizaron 2,5 kg de biomasa fresca o 0,25 kg de biomasa seca, a la cual se le acondicionó el tamaño de partícula cuando fue necesario, a un valor $\leq 2,0$ cm y se utilizó como sustrato de la lombriz roja (Figura 38). De igual manera, se conformaron mezclas utilizando proporciones iguales de plantas acuáticas, con pesos finales de 2,5 kg frescos o 0,25 kg de biomasa seca.

En la Tabla 16 se presentan los resultados del proceso de lombricompostaje realizado a la biomasa deshidratada de las especies jacinto de agua, lechuga de agua, enea y a mezclas (por partes iguales) de estas especies.

Tabla 16. Lombricompuestos obtenidos de biomasa seca de diferentes plantas acuáticas y sus mezclas. Fuente: Rodríguez (2009).

Parámetro	Sustrato				
	<i>Eichhornia crassipes</i> (Jacinto)	<i>Pistia stratiotes</i> (Lechuga)	<i>Typha angustifolia</i> (Enea)	Mezcla J + L + E	Mezcla J + E
Peso inicial (g)	250,00	250,00	250,00	250,00	250,00
Humedad inicial (%)	10,40	9,60	10,40	10,20	10,40
Peso seco inicial (g)	224,00	226,00	224,00	224,50	224,00
Peso húmedo final (g)	460,60	295,20	679,70	415,40	636,40
Humedad final (%)	76,90	63,50	81,00	79,00	79,41
pH final (unidades)	8,52	9,43	8,56	8,44	8,15
Peso seco final (g)	106,40	107,75	129,14	87,23	131,03
Rendimiento (%bs)	47,50	47,68	57,65	38,86	58,50
Tiempo proceso (días)	55	55	55	55	55



Figura 38. Lombricompostaje utilizando biomasa de sistemas acuáticos de tratamiento. 1. Canastillas utilizadas en el proceso de lombricompostaje; 2. Lombricultivo con jacinto acuático; 3. Lombricultivo con lechuga de agua; 4. Lombricultivo con enea; 5. Lombricultivo con oreja de agua. *Fuente: Rodríguez (2009).*

De los datos condensados en la Tabla 16, puede apreciarse que el tiempo en que se determinó visualmente que el material estuvo descompuesto fue de 55 días, para todas las muestras de biomasa evaluadas.

Los mayores rendimientos en el proceso de lombricompostaje se alcanzaron con la mezcla de jacinto de agua y enea (58,50%), seguido de enea (57,65%), lechuga de agua (47,68%), jacinto de agua (47,50%) y de la mezcla jacinto de agua + lechuga de agua + enea (38,86%).

En la Tabla 17 se presentan los resultados del proceso de lombricompostaje realizado a biomasa fresca de las especies jacinto de agua, lechuga de agua, enea, oreja de agua y a mezclas (por partes iguales) de estas especies.

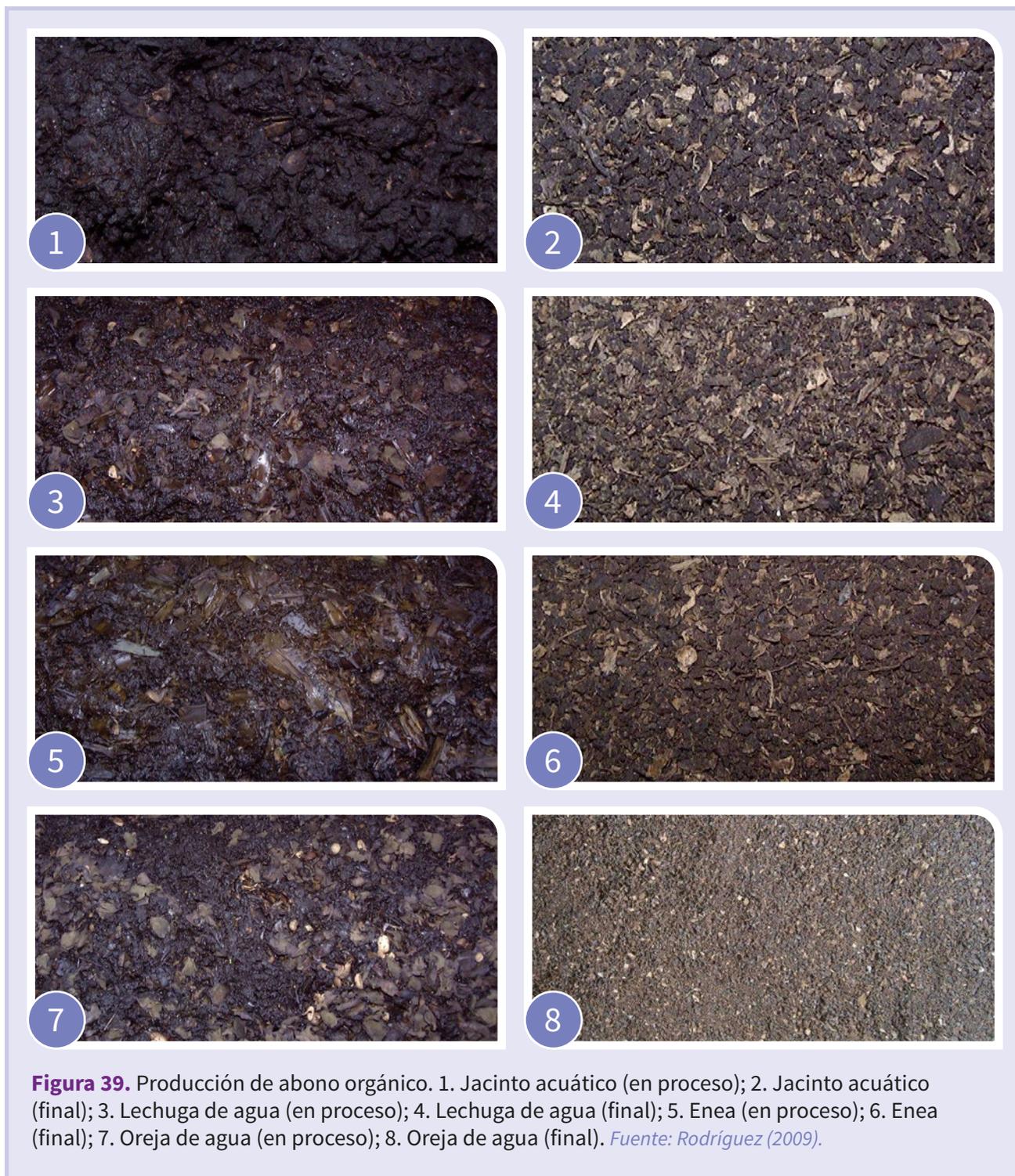
Tabla 17. Lombricompostos obtenidos de biomasa fresca de diferentes plantas acuáticas y sus mezclas. *Fuente: Rodríguez (2009).*

Parámetro	Sustrato				
	<i>Eichhornia crassipes</i> (Jacinto)	<i>Pistia stratiotes</i> (Lechuga)	<i>Typha angustifolia</i> (Enea)	<i>Salvinia auriculata</i> (Oreja)	Mezcla J + L + E + O
Peso inicial (g)	2500,00	2500,00	2500,00	2500,00	2500,00
Humedad inicial (%)	94,30	90,40	79,50	90,90	88,80
Peso seco inicial (g)	142,50	240,00	512,50	227,50	280,00
Peso húmedo final (g)	370,60	606,30	854,20	545,20	629,50
Humedad final (%)	80,70	71,13	69,74	82,40	77,17
pH final (unidades)	8,15	8,76	8,62	6,45	8,85
Peso seco final (g)	71,53	175,04	258,48	95,96	143,71
Rendimiento (%bs)	50,19	72,93	50,44	42,18	51,33
Tiempo proceso (días)	42	35	64	64	64

De los datos condensados en la Tabla 17 puede apreciarse que el tiempo en que se determinó visualmente que el material estuvo descompuesto fue de 35 días para el material proveniente de biomasa fresca de lechuga de agua, de 42 días para el material proveniente de biomasa de jacinto de agua y de 64 días para el material proveniente de biomasa de enea, de oreja de agua y de la mezcla de las cuatro especies acuáticas evaluadas.

Los mayores rendimientos en el proceso de lombricompostaje se alcanzaron con lechuga de agua (72,93%), seguido de la mezcla jacinto de agua + lechuga de agua + enea + oreja de agua (51,33%), seguido de enea (50,44%), de jacinto acuático (50,19%) y de oreja de agua (42,18%).

En la Figura 39 se presentan aspectos del proceso de lombricompostaje con las cuatro especies de plantas acuáticas evaluadas.



El rendimiento promedio del proceso de lombricompostaje utilizando biomasa de plantas provenientes del sistema acuático de tratamiento fue de 51,73% \pm 9,58% y su velocidad media de transformación de 4,66 \pm 1,51 g secos al día.

El valor fertilizante del lombricompuesto obtenido a partir de la biomasa de plantas provenientes de sistemas acuáticos de tratamiento de aguas mieles del café fue, para todos los casos, superior en el contenido de N al que presenta el lombricompuesto de la pulpa de café; superior en ocho de los nueve lombricompuestos para los contenidos de P (como P_2O_5); y sólo superior en uno de los nueve lombricompuestos en los contenidos de K (como K_2O). El valor fertilizante del lombricompuesto obtenido de la mezcla de la biomasa seca de las plantas acuáticas fue de 5,81% N - 4,49% P_2O_5 - 17,83 K_2O ; del lombricompuesto obtenido de la mezcla de la biomasa fresca de las plantas acuáticas fue de 4,57% N - 4,49% P_2O_5 - 13,49 K_2O ; mientras que el valor fertilizante del lombricompuesto obtenido de pulpa de café fresca fue de 3,72% N - 2,02% P_2O_5 - 23,22 K_2O .



Consideraciones finales

Los humedales artificiales son sistemas de tratamiento natural que se adaptan a las condiciones de oferta ambiental presentes en la zona cafetera colombiana y se constituyen en un sistema de postratamiento apropiado, desde lo técnico y económico, para las aguas residuales de las viviendas cafeteras tratadas en sistemas sépticos y para las aguas residuales del beneficio del café tratadas en sistemas biológicos.

A través de las investigaciones realizadas en Cenicafé, se han identificado cerca de seis especies de plantas acuáticas (jacinto de agua, lechuga de agua, oreja de agua, enea, heliconias y pasto vetiver) que eliminan más del 75% de la carga orgánica presente en el agua que llega al humedal, medida como DQO, DBO₅ y SST, permitiendo realizar un mejoramiento a la calidad del agua, para que cumpla con los valores de calidad exigidos en la normativa colombiana para vertimientos a cuerpos de agua superficial o subterránea o al suelo.

En la zona cafetera colombiana existe una gran variedad de plantas acuáticas con gran potencial para ser utilizadas en los humedales artificiales, en la depuración de las aguas generadas en las fincas cafeteras, tales como el papiro, el pasto elefante morado, la lenteja de agua, además de otras pertenecientes a las familias Ciperaceas, Gramíneas, Juncaceas, Tifaceas e Iridiaceas.

La biomasa generada en los humedales artificiales tiene un gran potencial de aprovechamiento para la producción de abonos verdes y para la producción de alimentos para consumo humano y animal.

Literatura citada

Alegre, J. (2007). *Manual sobre el uso y manejo del pasto vetiver (Chrysopogon zizanioides)*. Organización Panamericana de la Salud. http://www.vetiver.org/TVN_manualvetiver_spanish-o.pdf

Aoi, T., & Hayashi, T. (1996). Nutrient removal by water lettuce (*Pistia stratiotes*). *Water Science and Technology*, 34(7-8), 407-412. <https://doi.org/10.2166/wst.1996.0648>

Ansola, G., & De Luis, E. (1994). Concentración de nutrientes en helófitos acuáticos utilizados en depuración de agua residual. *Limnética*, 10(1), 33-36. <https://www.limnetica.com/documentos/limnetica/limnetica-10-1-p-33.pdf>

Bernal, F., Mosquera, D., Maury, H.A., González, D., Guerra, R., Pomare, A., & Silva, M. (2003). Humedales artificiales para el tratamiento de las aguas residuales en la Corporación Universitaria de la Costa. *Memorias del Congreso Internacional Agua. Seminario sobre Métodos Naturales para el Tratamiento de Aguas Residuales*. Cartagena, Colombia. <https://silo.tips/download/humedales-artificiales-para-el-tratamiento-de-las-aguas-residuales-en-la-corpora>

Boyd, C. E. (1970). Vascular aquatic plants for mineral nutrient removal from polluted waters. *Economic Botany*, 24(1), 95-103. <https://doi.org/10.1007/BF02860642>

Carballeira, R., & Souto, M. (2018). Presencia de *Cyperus papyrus* L. (Cyperaceae) en la región biogeográfica atlántica de la Península Ibérica. *Acta Botanica Malacitana*, 43, 137-140. <https://doi.org/10.24310/abm.v43i0.5011>

Centro Nacional de Investigaciones de Café. (1998). Informe anual de actividades Disciplina Química Industrial 1997-1998.

Centro Nacional de Investigaciones de Café. (2010). Informe anual de actividades Disciplina Calidad y Manejo Ambiental 2009-2010.

Crites, R. W., Middlebrooks, E. J., Bastian, R. K., & Reed, S. C. (2006). *Natural wastewater treatment systems*. CRC Press, Taylor & Francis Group.

Crites, R. W., Tchobanoglous, G., Camargo, M., & Pardo, L. P. (2000). *Sistemas de manejo de aguas residuales: Para núcleos pequeños y descentralizados*. McGraw-Hill.

Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria (CORPOICA). (2014). Sistema de Toma de Decisión para la selección de especies Forrajeras. Pasto elefante enano. *Pennisetumpurpureum*. http://www.corpoica.org.co:8086/NetCorpoicaMVC/STDF/Content/fichas/pdf/Ficha_70.pdf

Cruz, Y., Wedler, E., Vergara, W., Agudelo, V., & Serna, D. (2011). *Plantas Acuáticas: Manual para su uso en la acuicultura rural*. Unimagdalena.

Curt, M. D. (2004). Fitodepuración en humedales. Conceptos generales. En J. Fernández, E. Beascochea, J. Muñoz, & M. D. Curt, *Manual de Fitodepuración. Filtros de macrófitas en flotación* (pp. 61–78). Fundación Global Nature. https://fundacionglobalnature.org/wp-content/uploads/2020/01/manual_fitodepuracion.pdf

Dávila, M. T., & Ramírez, C. A. (1996). *Lombricultura en pulpa de café. Avances Técnicos Cenicafé*, 225, 1–12. <http://hdl.handle.net/10778/4248>

DeBusk, T. A., Peterson, J. E., & Ramesh Reddy, K. (1995). Use of aquatic and terrestrial plants for removing phosphorus from dairy wastewaters. *Ecological Engineering*, 5(2), 371–390. [https://doi.org/10.1016/0925-8574\(95\)00033-X](https://doi.org/10.1016/0925-8574(95)00033-X)

Delgadillo, O., Camacho, A., Pérez, L. F., & Andrade, M. (2010). *Depuración de aguas residuales por medio de humedales artificiales* (N. Antequera, Ed.). Centro Andino para la Gestión y Uso del Agua (Centro AGUA).

Dirección General de Recursos Hídricos. (2011). *Manual de diseño e instalación de sistemas autónomos de depuración* (p. 35). Govern Illes Balears. https://www.caib.es/sites/aigua/es/manual_de_diseno_e_instalacion_de_sistemas_autonomos_de_depuracion-28644

Espinosa, C. F., Caicedo, J. R., Sanabria, J. (2002, octubre 27–31). Desempeño de un sistema experimental de lagunas duckweed en serie con y sin pretratamiento anaeróbico. *XXVIII Congreso Interamericano de Ingeniería Sanitaria y Ambiental*. Cancún, México. <https://docplayer.es/96806535-Desempeno-de-un-sistema-experimental-de-lagunas-duckweed-en-serie-con-y-sin-pretratamiento-anaerobico.html>

Fernández, J. (2004). Humedales artificiales para depuración. En J. Fernández, E. Beascochea, J. Muñoz, & M. D. Curt, *Manual de Fitodepuración. Filtros de macrófitas en flotación* (pp. 79–90). Fundación Global Nature. https://fundacionglobalnature.org/wp-content/uploads/2020/01/manual_fitodepuracion.pdf

Gajalakshmi, S., & Abbasi, S. A. (2002). Effect of the application of water hyacinth compost/vermicompost on the growth and flowering of *Crossandra undulaefolia*, and on several vegetables. *Bioresource Technology*, 85(2), 197–199. [https://doi.org/10.1016/S0960-8524\(02\)00096-2](https://doi.org/10.1016/S0960-8524(02)00096-2)

Gauss, M. (2008). Constructed wetlands: a promising wastewater treatment system for small localities: experiences from Latin America. *World Bank Policy Research Working Paper*, (44120). https://papers.ssrn.com/sol3/papers.cfm?abstract_id=1149070

Grueso, J. R., & Jaramillo, L. M. (1998). *Seguimiento y evaluación del prototipo de planta de tratamiento de aguas residuales domésticas* [Tesis de pregrado]. Universidad Nacional de Colombia.

Guerrero, J. (2010, febrero 22–24). *Saneamiento en Colombia y Latinoamérica* [Presentación]. Conferencia internacional sobre humedales construidos para el tratamiento de aguas residuales: Transferencia de conocimiento a Latinoamérica, Universidad Tecnológica de Pereira, Pereira, Colombia. <https://prensarural.org/spip/spip.php?article3612>

Hammer, D. A. (1991). *Constructed wetlands for wastewater treatment*. Lewis Publishers.

Hasan, M. R., & Chakrabarti, R. (2009). *Use of algae and aquatic macrophytes as feed in small-scale aquaculture: A review*. Food and agriculture organization of the United nations (FAO). <http://www.fao.org/docrep/012/i1141e/i1141e.pdf>

Hazlip, E. (1998). Depuración natural de aguas residuales. Bioconstrucción. Revista Estacional La Osa. Guía de vida natural del Cántabro. España.

Henry-Silva, G. G., Monteiro-Camargo, A. F. (2002). Nutritive value of free-floating aquatic macrophytes (*Eichhornia crassipes*, *Pistia stratiotes* and *Salvinia molesta*), used in aquaculture waste treatment. *Acta Scientiarum–Biological and Health Sciences*, 85(2), 519-526.

Hoffmann, H., Platzer, C., Winker, M., & von Muench, E. (2011). *Technology Review of Constructed Wetlands. Subsurface flow constructed wetlands for greywater and domestic wastewater treatment* (p. 36). Sustainable sanitation–ecosan program. https://www.susana.org/_resources/documents/default/2-930-giz2011-en-technology-review-constructed-wetlands.pdf

Howard, V. (2008). *Pistia stratiotes*. USGS Nonindigenous Aquatic Species Database, Gainesville, FL. On line. Internet. Disponible en <https://nas.er.usgs.gov/queries/FactSheet.aspx?speciesID=1099>

Jerez, E. (2007). El cultivo de las heliconias. *Cultivos Tropicales*, 28(1), 29–35. <https://www.redalyc.org/pdf/1932/193215858005.pdf>

Jing, S., Lin, Y., Wang, T., & Lee, D. (2002). Microcosm wetlands for wastewater treatment with different hydraulic loading rates and macrophytes. *Journal of Environmental Quality*, 31(2), 690–696. <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/11931463/>

Klute, A., & Dirksen, C. (1986). Hydraulic Conductivity and Diffusivity: Laboratory Methods. En *Methods of Soil Analysis* (pp. 687–734). John Wiley & Sons, Ltd. <https://doi.org/10.2136/sssabookser5.1.2ed.c28>

Körner, S., Lyatuu, G. B., & Vermaat, J. E. (1998). The influence of Lemna gibba L. on the degradation of organic material in duckweed-covered domestic wastewater. *Water Research*, 32(10), 3092–3098. [https://doi.org/10.1016/S0043-1354\(98\)00054-2](https://doi.org/10.1016/S0043-1354(98)00054-2)

Lara, J. A. (1999). *Depuración de aguas residuales municipales con humedales artificiales*. Instituto Catalán de Tecnología. Universidad Politécnica de Cataluña [Tesis de maestría]. Universidad Politécnica de Cataluña. <https://agua.org.mx/biblioteca/depuracion-de-aguas-residuales-municipales-con-humedales-artificiales/>

Lord, R. D. (1982). *Uso de plantas acuáticas para el tratamiento de aguas residuales*. Centro Panamericano de Ecología Humana y Salud; Organización Panamericana de la Salud; Organización Mundial de la Salud.

Machado, R., Lamela, L., & Gerardo, J. (1979). Hierba elefante (*Pennisetum purpureum Schumacher*). *Pastos y Forrajes*, 2(2), 10–16 [https://payfo.ihatuey.cu/index.php?journal=pasto&page=article&op=view&path\[\]=1728](https://payfo.ihatuey.cu/index.php?journal=pasto&page=article&op=view&path[]=1728)

Martín, I. (1993). Sistemas de aplicación al suelo. Filtros verdes. En Colegio Oficial de Ingenieros Agrónomos de Centro y Canarias & Curso sobre Tratamiento de Aguas Residuales Basuras y Escombros en el Ámbito Rural (Eds.), *Tratamiento de aguas residuales, basuras y escombros en el ámbito rural* (pp. 155–185). Editorial Agrícola Española.

Mereles, F., Egea, J., Céspedes, G., Peña-Chocarro, M. C., & Degen, R. (Eds.). (2015). *Plantas acuáticas y palustres del Paraguay* (Vol. 1). WWF- World Wildlife Fund Inc. http://awsassets.panda.org/downloads/libro_acuaticas_web_1.pdf

Metcalf & Eddy Inc. (1995). *Ingeniería de aguas residuales: tratamiento, vertido y reutilización* (A. García, Ed.; 3a ed.). McGraw-Hill.

Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. (2021). *Resolución 1256 del 2021 Por la cual se reglamenta el uso de las aguas residuales y se adoptan otras disposiciones*. <https://www.minambiente.gov.co/wp-content/uploads/2021/12/Resolucion-1256-de-2021.pdf>

Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. (2021). *Resolución 699 del 2021 Por la cual se establecen los parámetros y los valores límites máximos permisibles en los vertimientos puntuales de Aguas Residuales Domésticas Tratadas al suelo, y se dictan otras disposiciones*. <https://www.minambiente.gov.co/images/normativa/app/resoluciones/cb-Res%200699%20de%202021%20-%20Establecen%20par%C3%A1metros%20aguas%20residuales.pdf>

Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. (2018). *Decreto Número 50 de 2018. Por el cual se modifica parcialmente el Decreto 1076 de 2015, Decreto único Reglamentario del Sector Ambiente y Desarrollo Sostenible en relación con los Consejos Ambientales Regionales de la Macrocuenca (CARMAC), el Ordenamiento del Recurso Hídrico y Vertimientos y se dictan otras disposiciones*. <https://www.funcionpublica.gov.co/eva/gestornormativo/norma.php?i=85084>

Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. (2012). *Decreto Número 1640 de 2012. Por medio del cual se reglamentan los instrumentos para la planificación, ordenación y manejo de las cuencas hidrográficas y acuíferos, y se dictan otras disposiciones*. https://www.minambiente.gov.co/images/normativa/decretos/2012/dec_1640_2012.pdf

Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. (2012). *Decreto Número 2667 de 2012 la tasa retributiva por la utilización directa e indirecta del agua como receptor de los vertimientos puntuales, y se toman otras determinaciones*. <http://www.emserchia.gov.co/PDF/Decreto2667.pdf>

Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. (2015). *Resolución 631 del 2015 por la cual se establecen los parámetros y los valores límites máximos permisibles en vertimientos puntuales a cuerpos de agua superficiales y a los sistemas de alcantarillado público y se dictan otras disposiciones*. https://www.minambiente.gov.co/images/normativa/app/resoluciones/d1-res_631_marz_2015.pdf

Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. (2014). *Resolución 1207 del 2014. Por la cual se adoptan disposiciones relacionadas con el uso de aguas residuales tratadas*. https://www.minambiente.gov.co/images/GestionIntegraldelRecursoHidrico/pdf/normativa/Res_1207_2014.pdf

Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial. (2010). *Alternativas tecnológicas en agua y saneamiento para el sector rural*. (Título J.; Reglamento Técnico del Sector de Agua

Potable y Saneamiento Básico RAS., p. 282). https://minvivienda.gov.co/sites/default/files/documentos/100811_titulo_j_ras-_.pdf

Ministerio de Desarrollo Económico, & Dirección de Agua Potable y Saneamiento Básico. (2000). *Tratamiento de Aguas Residuales*. (Sección II Título E.; Reglamento Técnico del Sector de Agua Potable y Saneamiento Básico RAS-2000., p. 144). https://www.minvivienda.gov.co/sites/default/files/documentos/010710_ras_titulo_e_.pdf

Ministerio del Medio Ambiente. (2002). *Gestión para el manejo, tratamiento y disposición final de las aguas residuales municipales*. <http://hdl.handle.net/20.500.12324/18911>

Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio. (2017). *Resolución 0330 de 2017 por la cual se adopta el Reglamento Técnico para el Sector Agua Potable y Saneamiento Básico – RAS y se derogan las resoluciones 1096 de 2000, 0424 de 2001, 0668 de 2003, 1459 de 2005 y 2320 de 2009*. <https://www.minvivienda.gov.co/sites/default/files/documentos/0330-2017.pdf>

Murugesan, A. G., Vijayalakshmi, G. S., Sukumaran, N., & Mariappan, C. (1995). Utilization of water hyacinth for oyster mushroom cultivation. *Bioresource Technology*, 51(1), 97–98. [https://doi.org/10.1016/0960-8524\(95\)00063-K](https://doi.org/10.1016/0960-8524(95)00063-K)

Nichols, P. B., Couch, J. D., & Al-Hamdani, S. H. (2000). Selected physiological responses of *Salvinia minima* to different chromium concentrations. *Aquatic Botany*, 68(4), 313–319. [https://doi.org/10.1016/S0304-3770\(00\)00128-5](https://doi.org/10.1016/S0304-3770(00)00128-5)

Oficina Internacional de Pesas y Medidas. (2006). *El Sistema Internacional de Unidades (SI)* (8a ed.). Centro Español de Metrología. <https://www.cem.es/sites/default/files/siu8edes.pdf>

Olguín, E., Peña, C., Hernández, E., & Camacho, R. (Eds.). (1994). *Tecnologías ambientales para el desarrollo sustentable*. Instituto de Ecología. <http://bibliotecasibe.ecosur.mx/sibe/book/000008450>

Olguín, E. J., Rodríguez, D., Sánchez, G., Hernández, E., & Ramírez, M. E. (2003). Productivity, Protein Content and Nutrient Removal from Anaerobic Effluents of Coffee Wastewater in *Salvinia minima* Ponds, under Subtropical Conditions. *Acta Biotechnologica*, 23(2–3), 259–270. <https://doi.org/10.1002/abio.200390033>

ONU-Habitat. (2008). *Manual de Humedales Artificiales*. Programa Agua para las ciudades asiáticas de ONU-HABITAT.

Patiño, J. F., Zhinín, F. L. (2015). *Estudio comparativo de la capacidad depuradora de Phragmites australis y Cyperus papyrus en humedales artificiales subsuperficiales de flujo vertical para el*

tratamiento de aguas residuales en el cantón Santa Isabel [Tesis de Pregrado]. Universidad de Cuenca. <http://dspace.ucuenca.edu.ec/handle/123456789/23197>

Perkins, J., & Hunter, C. (2000). Removal of enteric bacteria in a surface flow constructed wetland in Yorkshire, England. *Water Research*, 34(6), 1941–1947. [https://doi.org/10.1016/S0043-1354\(99\)00333-4](https://doi.org/10.1016/S0043-1354(99)00333-4)

PRODUCTOS QUÍMICOS ANDINOS. S. A. (PQA). (2021). Producto Agroblack Esp 6. <https://www.pqapag.co/>

Ranunculus aquatilis. (2020, Mayo 02). *En Wikipedia*. https://es.wikipedia.org/wiki/Ranunculus_aquatilis#/media/Archivo:Ranunculus_aquatilis03.jpg.

Ramírez, J. D. (2015). *Evaluación de vetiver (Chrysopogon zizanioides) y la elefanta (Pennisetum purpureum) en el diseño de humedales artificiales* [Tesis de Pregrado]. Universidad de Medellín. <http://hdl.handle.net/11407/2175>

Reddy, K. R., & Busk, W. F. (1985). Nutrient Removal Potential of Selected Aquatic Macrophytes. *Journal of Environmental Quality*, 14(4), 459–462. <https://doi.org/10.2134/jeq1985.00472425001400040001x>

Reddy, K. R., & DeBusk, W. F. (1985). Growth characteristics of aquatic macrophytes cultured in nutrient-enriched water: II. Azolla, Duckweed, and Salvinia. *Economic Botany*, 39(2), 200–208. <https://doi.org/10.1007/BF02907846>

Reddy, K. R., & Debusk, W. F. (1984). Growth characteristics of aquatic macrophytes cultured in nutrient-enriched water: I. Water hyacinth, water lettuce, and pennywort. *Economic Botany*, 38(2), 229–239. <https://doi.org/10.1007/BF02858838>

Reed, S. C., Crites, R. W., & Middlebrooks, E. J. (1998). *Natural Systems for Waste Management and Treatment* (2a ed.). McGraw-Hill.

Richerson, M. M., & Jacono, C. C. (2005). *The Salvinia auriculata complex*. United States Geological Survey; US Department of the Interior.

Rodríguez-Valencia, N. (2009). Estudio de un biosistema integrado para el postratamiento de las aguas residuales del café utilizando macrófitas acuáticas [Tesis doctoral, Universitat Politècnica de València]. <https://doi.org/10.4995/Thesis/10251/4342>

Rodríguez-Valencia, N., & Jaramillo, C. (2005). Cultivo de hongos medicinales sobre residuos agrícolas de la zona cafetera. *Boletín Técnico Cenicafé*, 28, 1–72. <http://hdl.handle.net/10778/583>

Rodríguez-Valencia, N., & Jaramillo, C. (2005). Cultivo de hongos comestibles del género *Pleurotus* en residuos agrícolas de la zona cafetera. *Boletín Técnico Cenicafé*, 27, 1–61. <http://hdl.handle.net/10778/582>

Rodríguez-Valencia, N., Quintero-Yepes, L., & Castañeda, S. A. (2022). *Construya y opere su sistema séptico para el tratamiento de las aguas residuales de la vivienda de su finca cafetera*. Cenicafé. <https://doi.org/10.38141/cenbook-0009>

Rodríguez-Valencia, N., Quintero-Yepes, L., Osorio Ocampo, A. F., Castañeda, S. A., García, M., Harmsen, J., & Bisschops, I. (2018). *Tecnologías apropiadas para el tratamiento de aguas en fincas cafeteras*. Cenicafé. https://www.cenicafe.org/es/index.php/nuestras_publicaciones/proyecto_gia_manos_al_agua/publicaciones_tecnologias_apropiadas_para_el_tratamiento_de_aguas_en_fincas

Salas, J. J., Pidre, J.R., & Sánchez, L. (2007). *Manual de tecnologías no convencionales para la depuración de aguas residuales*. Centro de las Nuevas Tecnologías del Agua (CENTA).

Salazar, A. (1988). Sistemas elementales para el manejo de aguas residuales, sector rural y semi-rural. *Revista Empresas Públicas de Medellín*, 10(2), 11–167. <https://www.ircwash.org/sites/default/files/341.0-6821.pdf>

Sánchez, D. (2013). *Diseño y modelización de humedales para el tratamiento de efluentes de depuradora. Aplicación en el entorno del Parque Natural de las Tablas de Daimiel* [Tesis de Doctorado].

Singhal, V., & Rai, J. P. N. (2003). Biogas production from water hyacinth and channel grass used for phytoremediation of industrial effluents. *Bioresource Technology*, 86(3), 221–225. [https://doi.org/10.1016/s0960-8524\(02\)00178-5](https://doi.org/10.1016/s0960-8524(02)00178-5)

Sooknah, R. D., & Wilkie, A. C. (2004). Nutrient removal by floating aquatic macrophytes cultured in anaerobically digested flushed dairy manure wastewater. *Ecological Engineering*, 22(1), 27–42. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2004.01.004>

Stanley, T. D. (1982). Plantas acuáticas. Informe Australiano sobre malezas de importancia mundial. *Agricultura de las Américas*, 31(6), 24–25.

Tilley, E., Ulrich, L., Lüthi, C., Reymond, P., & Zurbrügg, C. (2014). *Compendium of Sanitation Systems and Technologies* (2nd ed.). Swiss Federal Institute of Aquatic Science and Technology (Eawag).

Truong, P., & Hart, B. (2001). *Vetiver system for wastewater treatment*. (Núm. 2001/2; Pacific Rim Vetiver Network Technical Bulletin, p. 26). The Vetiver Network International (TVNI). http://www.vetiver.org/PRVN_wastewater_bul.pdf

United States Environmental Protection Agency. (1988). *Design Manual. Constructed Wetlands and Aquatic Plant Systems for Municipal Wastewater Treatment*. (EPA/625/1-88/022; p. 166). Office of Research and Development.

United States Environmental Protection Agency. (2000a). *Wastewater Technology Fact Sheet Free Water Surface Wetlands* (EPA 832-F-00-024; p. 8). Office of Water.

United States Environmental Protection Agency. (2000b). *Folleto Informativo de Tecnología de Aguas Residuales. Humedales de flujo subsuperficial*. (EPA 832-F-00-023; p. 13). Office of Water.

United States Environmental Protection Agency. (2000c). *Manual. Constructed Wetlands Treatment of Municipal Wastewaters*. (EPA/625/R-99/010; p. 166). Office of Research and Development.

Whiteman, J. B., & Room, P. M. (1991). Temperatures lethal to *Salvinia molesta* Mitchell. *Aquatic Botany*, 40(1), 27–35. [https://doi.org/10.1016/0304-3770\(91\)90071-C](https://doi.org/10.1016/0304-3770(91)90071-C)

Williams, J. B., Zambrano, D., Ford, M. G., May, E., & Butler, J. E. (1999). Constructed wetlands for wastewater treatment in Colombia. *Water Science and Technology*, 40(3), 217–223. [https://doi.org/10.1016/S0273-1223\(99\)00413-8](https://doi.org/10.1016/S0273-1223(99)00413-8)

Wolverton, B. C., & McDonald, R. C. (1979). Water Hyacinth (*Eichhornia crassipes*) Productivity and Harvesting Studies. *Economic Botany*, 33(1), 1–10.

Yan, J., Wang, R., & Wang, M. (1998). The fundamental principles and ecotechniques of wastewater aquaculture. *Ecological Engineering*, 10(2), 191–208. [https://doi.org/10.1016/S0925-8574\(98\)00019-6](https://doi.org/10.1016/S0925-8574(98)00019-6)

Zúñiga, J., Chamy, R., Schiapacasse, M. C., Cerda, M., & Fuentes, J. (2003). Tratamiento de aguas residuales urbanas mediante humedales. *Memorias del XV Congreso de Ingeniería Sanitaria y Ambiental*, Concepción, Chile.



Federación Nacional de
Cafeteros de Colombia

www.cenicafe.org



ISBN: 978-958-8490-57-1



9 789588 490571