

APROVECHAMIENTO SOSTENIBLE DE ESPECIES VEGETALES PARA FITORREMEDIACIÓN DE VERTIDOS EN LA PRODUCCIÓN PORCÍCOLA DEL SENA CLEM TULUÁ

SUSTAINABLE USE OF VEGETABLE SPECIES FOR FITORREMEDIATION OF SPILLS IN PORCICULTURAL PRODUCTION OF SENA CLEM TULUÁ.



¹ Julian A. Pedroza, ² Diego F. Tirado, ³ Manuel Fco. Polanco

^{1,2,3} Universidad de Manizales

Recibido: 26/10/ 2021 Aprobado 01/12/2021

RESUMEN

La presente investigación tuvo como propósito identificar las especies vegetales que permitan la mayor descontaminación de los vertimientos generados por la porcícola del SENA-CLEM Tuluá, Valle del Cauca, convirtiéndose en un modelo piloto que pueda ser implementado por los productores porcícolas en Colombia, reduciendo los impactos negativos en el medio ambiente que generan este tipo de explotaciones pecuarias a través de tecnologías sostenibles. En la investigación se analizó y se cuantificó la capacidad de remoción de contaminantes de cinco especies vegetales: limoncillo (*Cymbogogon citratus*), albahaca (*Ocimum basilicum*), heliconia (*Heliconia rostrata*), caña de azúcar (*Saccharum officinarum*) y coquito (*Cyperus rotundus*), las cuales fueron sometidas a crecimiento en los humedales de tratamiento de los vertimientos de la porcícola durante 13 meses; se valoró también los beneficios económicos a los productores que dichas plantas pueden aportar en estos biosistemas. Para evaluar la acción fitorremediadora se tomaron muestras de los vertimientos al inicio y al final del experimento, estas fueron analizadas por el laboratorio Water Technology Engineering ubicado en la ciudad de Cali-Valle del cauca. Al realizar el análisis se evidenció que las plantas que mayormente soportaron las condiciones de estrés fueron la heliconia (*H. rostrata*) y la caña de azúcar (*S. officinarum*) y presentaron remoción en los contaminantes provenientes de la demanda química de oxígeno, demanda biológica de oxígeno, sólidos suspendidos totales, sólidos sedimentables, grasas y aceites.

Palabras clave: contaminación, efluente, fitoacumulación, medio ambiente, remoción.

ABSTRACT

The purpose of this research is to identify the plant species that allow greater decontamination of the discharges generated by the SENA-CLEM Tuluá pig farm, Valle del Cauca, becoming a pilot model that can be implemented by

Citación: Pedroza Vivas, J. A., Tirado, D., & Polanco, M. F. . Aprovechamiento Sostenible De Especies Vegetales Para Fitorremediación De Vertidos En La Producción Porcícola Del Sena Clem Tuluá. Publicaciones E Investigación. <https://doi.org/10.22490/25394088.4835>

¹Japedroza@sena.edu.co, <https://orcid.org/0000-0002-8912-8443>

²Tiradoo585@hotmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-6178-5660>

³mpolanco@umanizales.edu.co, <https://orcid.org/0000-0002-4810-0081>

<https://doi.org/10.22490/25394088.4835>

pig producers in Colombia, reducing the negative impacts on the environment generated by this type of livestock operations through sustainable technologies. In the research, the pollutant removal capacity of five plant species was analyzed and quantified: Lemongrass (Cymbogogon citratus), basil (Ocimum basilicum), heliconia (Heliconia rostrata), sugar cane (Saccharum officinarum) and coquito (Cyperus rotundus), which were subjected to growth in the swine discharge treatment wetlands for 13 months; The economic benefits to producers that these plants can provide in these biosystems were also valued. To evaluate the phytoremediation action, samples of the discharges were taken at the beginning and at the end of the experiment, these were analyzed by the laboratory Water Technology Engineering located in the city of Cali-Valle del Cauca.

When performing the analysis, it was evidenced that the plants that most withstood the stress conditions were Heliconia (H. rostrata) and Sugarcane (S. officinarum) and presented removal of pollutants from chemical oxygen demand, biological demand oxygen, total suspended solids, sedimentary solids, fats and oils.

Keywords: Phytoremediation, maximum allowable value, porcicola.



1. INTRODUCCIÓN

La fitorremediación es un conjunto de tecnologías que reducen *in situ* o *ex situ* la concentración de diversos compuestos a partir de procesos bioquímicos realizados por las plantas y microorganismos asociados a ellas; para remover, reducir, transformar, mineralizar, degradar, volatilizar o estabilizar contaminantes (Delgadillo-López *et al.*, 2011). Tiene como objetivo la restauración de las características del suelo y agua a través de la capacidad de contrarrestar contaminantes orgánicos e inorgánicos. Por medio de bioacumulación, translocación y degradación, las plantas mantienen su capacidad inherente de neutralizar los contaminantes, actuando como sumideros vitales de residuos biológicamente peligrosos (Méndez, 2020). Esta técnica ha tenido gran acogida puesto que es tecnología emergente y ambientalmente sostenible así mismo presenta muchas ventajas frente a otras técnicas de remediación, puesto que es aplicable a una amplia gama de contaminantes (Gonzales, 2017) y representa un gran desarrollo puesto que muchos cuerpos de agua sufren de contaminación ya que se realizan vertidos

inadecuados, donde independiente de su naturaleza implica problemas para la salud humana y el medio ambiente. La contaminación no solo se produce por generar un tipo de vertimiento, sino cuando este supera o destruye la capacidad de autodepuración de la fuente; es por ello que en Colombia se ha establecido un límite máximo permisible para las sustancias contaminantes vertidas al agua, el cual está reglamentado a través de la resolución 0631 del 2015 de Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, donde se establecen los límites de acuerdo al tipo de actividad económica. Para esta investigación se centró principalmente la atención en la producción pecuaria, puesto que trae consigo problemáticas ambientales y de contaminación de las fuentes hídricas donde deben tener opciones para contribuir a la conservación y minimización de los impactos ambientales, así que cada opción que se maneje puede aportar a la conciencia ambiental y cumplimiento normativo ante la autoridades ambientales y entidades de control. Es por ello que el presente trabajo se enfocó en la técnica de fitorremediación a

través de las plantas limoncillo (*Cymbogogon citratus*), albahaca (*Ocimum basilicum*), heliconia (*heliconia ros-trata*), caña de azúcar (*saccharum officinarum*). Donde el objetivo principal fue aprovechar sosteniblemente la eficiencia fitorremediadora de las especies vegetales; como control de agentes contaminantes del vertimiento de la porcícola SENA CLEM Tuluá Valle del Cauca, determinando la capacidad de adaptación, desarrollo y la remoción de contaminantes de las especies vegetales en el humedal artificial de la granja porcícola y dar cumplimiento a la normatividad ambiental cumplimiento a los límites permisibles y mostrar liderazgo en remediaciones sostenibles.

2. MARCO TEÓRICO

2.1 Efecto de la contaminación

Según Rodríguez (2011) una de las preocupaciones de carácter nacional e internacional es el mal manejo de los residuos descargados en los cuerpos de agua sin ningún tratamiento, lo que ha disminuido la calidad de la oferta hídrica en las diferentes localidades y por ende desmejorado las condiciones de vida de la población por la inadecuada recolección, transporte, tratamiento y disposición final de las aguas residuales domésticas.

La Corporación Autónoma Regional del Valle del Cauca (CVC), afirmó en el 2018 que la descarga de aguas residuales domésticas de todas las poblaciones ubicadas a lo largo del recorrido del río cauca y el crecimiento industrial ha contribuido al deterioro ambiental. Pese a disposiciones legales, tanto las industrias oficiales como privadas, continúan descargando en los ríos toneladas de basura, aguas negras, desechos industriales y pesticidas residuales, sin ningún tipo de control o tratamiento, lo que causa el daño a los ecosistemas. El sena CLEM tiene un vertido aproximado mensual de 0.026 L/s, cuenta con una planta de

tratamiento de agua residual que, aunque ayuda a disminuir la carga de los vertimientos; con tratamientos adicionales se puede lograr mejorar su calidad. Estas cargas son principalmente de producción porcícola; según la guía ambiental para el subsector porcícola, del Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, la actividad porcina es una de las actividades más antiguas de la producción animal, la cual se ha sostenido hasta nuestros días constituyéndose en la principal fuente de proteína de origen animal en el mundo con una producción del 38.9% de las carnes y un consumo per cápita de 15.01 kg (PAMPA, 2016).

2.2 Características de las excretas porcícolas

Las aguas residuales de las porquerizas están formadas por heces fecales y orina mezcladas con el material utilizado como cama, residuos de alimento, polvo, otras partículas y una cantidad variable de agua proveniente de las labores de limpieza y por pérdidas desde los bebederos. La orina representa aproximadamente el 45% de la excreta y las heces el 55%. El contenido de humedad de la excreta es de alrededor del 88% y el contenido de materia seca es del 12%. Cerca del 90% de los sólidos se excretan en las heces; la orina contiene el 10% de los sólidos. La densidad de la excreta fresca es levemente menor de 1.0 (aunque son comunes las referencias de valores ligeramente superiores). El total de los sólidos tiene una densidad baja, de 0.84 kg/l, los cuales pueden flotar, sedimentarse y/o suspenderse (PAMPA, 2016), es así que estas características tienden a producir por día 0,25 kg de demanda biológica de oxígeno (DBO) y 0,75 kg de demanda química de oxígeno (DQO) por cada 100 kg de peso vivo. Por lo general, la DBO es un tercio de la DQO y cerca de un tercio de los sólidos totales (STT) en las excretas porcinas frescas (Ministerio del Medio Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial; 2002). El pH varía entre 6 y 8. Cuanto más frescas sean las excretas, más neutro será su pH (Alexander *et al.*, 2007).

TABLA 1.

Problemas ambientales significativos en la producción porcícola

Componente ambiental	Problemas ambientales significativos	Relación con el programa de fitorremediación propuesto
Aire	Generación de olores ofensivos	La fitorremediación ayuda a la mitigación de olores ofensivos.
Agua	Generación de vertimientos	Brinda herramientas para disminuir la contaminación de aguas, mediante el uso del vertimiento como riego después del proceso.
Suelo	Afectación de calidad del suelo	Brinda herramientas para mitigar el impacto de la explotación en el suelo con el fin de evitar la erosión y alteración de la calidad del mismo. Además de mejoramiento de la calidad del suelo.

Fuente: Asociación Colombiana de Porcicultores *et al.* (2006).

El SENA CLEM (Centro latinoamericano de especies menores), se orienta a la producción de las especies menores bajo criterios de producción que garanticen la seguridad alimentaria de la población rural y urbana de Colombia y Latinoamérica, por tanto su actividad es principalmente porcícola y por ende proporciona una carga contaminante de acuerdo al caudal generado, es por ello importante generación de tratamientos de aguas residuales que lo puedan convertir en un modelo piloto que pueda ser implementado por los productores porcícolas en Colombia.

2.3 Remoción de los contaminantes

La fitorremediación es una función conjunta entre la planta y los microorganismos de la rizósfera. Algunas especies de bacterias degradan, de manera selectiva, ciertos compuestos que son tóxicos para las plantas. Los productos metabólicos del proceso microbiano son asimilados y convertidos, por las especies vegetales, en compuestos menos tóxicos (Díaz Recio & Ospina Vargas, 2019).

2.4 Fitorremediación

El término fitorremediación hace referencia a una serie de tecnologías que se basan en el uso de plantas para limpiar o restaurar ambientes contaminados, como aguas, suelos, e incluso aire. Es un término relativamente nuevo, adoptado en 1991. Se compone de dos palabras, *fito*, *ta*, que en griego significa planta o vegetal, y *remediar* (del latín *remediare*), que significa poner remedio al daño, o corregir o enmendar algo.

Fitorremediación significa remediar un daño por medio de plantas o vegetales (Núñez López & Vong, 2004).

2.5 Tipos de fitorremediación

La fitodegradación consiste en la transformación de los contaminantes orgánicos en moléculas más simples. En determinadas ocasiones, los productos de la degradación le sirven a la planta para acelerar su crecimiento, en otros casos los contaminantes son biotransformados (López-Martínez *et al.*, 2005).

- **Fito extracción.** La fito extracción o fito acumulación, consiste en la absorción de metales contaminantes mediante las raíces de las plantas y su acumulación en tallos y hojas, el primer paso para la aplicación de esta técnica es la selección de las especies de plantas más adecuadas para los metales presentes y las características del emplazamiento (Kidd *et al.*, 2007)
- **Fito estabilización.** Permite inmovilizar contaminantes en el suelo a través de su absorción y acumulación en las raíces o bien, por precipitación en la zona de la rizosfera. Este proceso reduce la movilidad de los contaminantes y evita su migración a las aguas subterráneas o al aire (Lobos, 2008).
- **Fitobiodegradación.** Las plantas y los microorganismos asociados a ellas degradan los contaminantes orgánicos en productos inofensivos, o

bien, mineralizarlos hasta CO_2 y H_2O . En este proceso los contaminantes son metabolizados dentro de los tejidos vegetales y las plantas producen enzimas como la de halogenasa y la oxigenasa, que ayudan a catalizar la degradación (Bernal Figueroa, 2014).

- **Rizo filtración.** Utiliza las plantas para eliminar

del medio hídrico contaminantes través de la raíz (Delgadillo-López *et al.*, 2011).

Una de las aplicaciones de esas técnicas se puede visualizar en la Tabla N° 2 Aplicaciones de la fitorremediación, allí se puede observar de acuerdo al tipo de mecanismo y planta que contaminante se puede mitigar y/o eliminar en una fuente determinada.

TABLA 2.
Aplicaciones de la fitorremediación

Mecanismo	Contaminante	Fuente	Planta
Degradación	Atrazina, nitratos	Agua superficial	Álamo
	Tricoloro etileno	Agua subterránea	
Extracción	Aceite	Tierra	Mostaza india

Fuente: Epa (2019).

Existen plantas que actualmente han sido foco de investigación, por ejemplo, las hiperacumuladoras que ayudan a recuperar suelos contaminados con metales pesados (elementos potencialmente fitotóxicos). Este término (hiperacumulador) se les atribuyó ya que, a diferencia de otras plantas, absorben activamente cantidades excesivamente grandes de uno o más metales pesados de la tierra.

Los metales no se retienen en sus raíces, se trasladan al brote y se acumulan en los de la superficie, especialmente en las hojas en concentración de 100 a 1.000 veces más altas que las plantas no hiperacumuladoras (Rascio & Navari-Izzo, 2011) por ejemplo (100 $\mu\text{g/g}$ (0.01 % peso seco) de Cd y As; 1.000 $\mu\text{g/g}$ (0.1 % peso seco) de Co, Cu, Cr, Ni y Pb; y 10.000 $\mu\text{g/g}$ (1.0 % peso seco) (Espinosa *et al.*, 2011). Dado el gran interés que representa este tipo de plantas se han realizado estudios donde se han logrado identificar alrededor de 450 especies angiospermas que son hiperacumuladoras de As, Cd, Co, Cu, Mn, Ni, Pb, Sb, Se, Tl, Zn; y representan el 0.2 % de todas las especies conocidas (Rascio & Navari-Izzo, 2011).

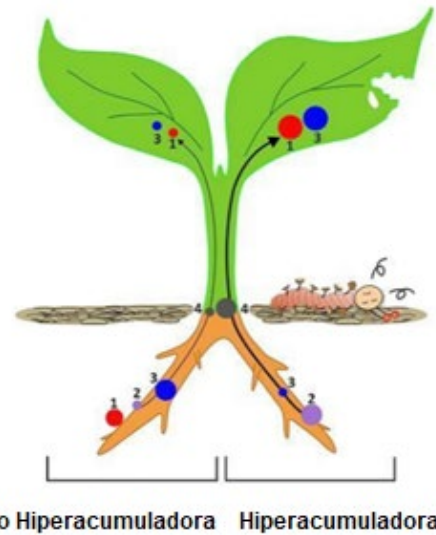


Figura 1. Mecanismos implicados en la hipertolerancia a metales pesados y distribución del metal en una planta excluyente no hiperacumuladora (izquierda) y en una planta hiperacumuladora (derecha). (1) Unión del metal pesado a la pared celular y/o a los exudados de la planta; (2) absorción por la raíz; (3) quelación en el citosol y/o acumulación en vacuolas; (4) transporte desde la raíz hasta la hoja. Los puntos de color indican el órgano de la planta donde ocurren los diferentes mecanismos y el tamaño del punto el nivel de cada uno de ellos. De acuerdo con la hipótesis elemental de defensa, las elevadas concentraciones de metales pesados convierten a las hojas hiperacumuladoras en veneno para los herbívoros.

Fuente: tomada de Rascio & Navari-Izzo (2011)

2.6 Humedales

Este tipo de sistemas con macrófitas emergentes, consiste en un filtro biológico relleno de un medio poroso (por ejemplo, piedra volcánica, grava), en el cual las plantas macrófitas se siembran en la superficie del lecho filtrante y las aguas residuales pretratadas atraviesan de forma horizontal o vertical el

lecho filtrante, en estos sistemas el nivel del agua se mantiene por debajo de la superficie del medio granular. Estos humedales se clasifican a su vez en humedales artificiales de flujo horizontal y humedales artificiales de flujo vertical, según la manera como las aguas residuales pretratadas atraviesen el lecho filtrante (Arias & Betancur, 2010).

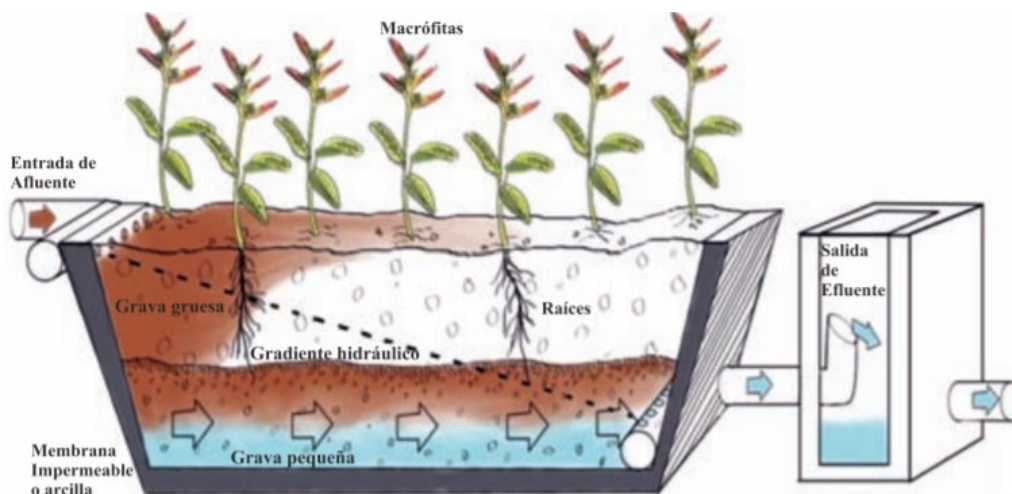


Figura 2. Elementos de un humedal artificial con flujo subsuperficial.

Fuente: Dolores *et al.* (2018)

2.7 Identificación de las especies fitorremediadoras

2.7.1 Caña de azúcar *Saccharum officinarum*

Ofrece el potencial de ser una especie fitorremediadora debido a su alta producción de biomasa, alta eficiencia en el uso del agua, amplia adaptabilidad ambiental, pequeño aporte de energía y buena capacidad de reproducción (Salam *et al.*, 2017), pertenece a la familia poáceas o graminias y género *Saccharum*. El cultivo de caña de azúcar en su ciclo de plantilla tiene un desarrollo vegetativo de duración variable, dado a que depende de la variedad y de la influencia del clima. De la siembra a la cosecha el cultivo puede durar desde 14 y hasta 17 meses. En este periodo la caña de azúcar pasa por

cuatro etapas: germinación y/o emergencia, amacollamiento o ahijamiento, rápido crecimiento y maduración (Figura 3). En tanto, el desarrollo de las socas (segundo corte de la caña) tiene una duración de 11 a 13 meses y se distinguen tres etapas: brotación y amacollamiento, rápido crecimiento y maduración (Conadesuca, 2015). Es una planta que se reproduce asexualmente, de adulto, la planta tiene una altura entre 2 y 6 metros. Las partes principales son tallos, hojas y raíces. El tallo de una planta madura contiene en promedio un 70 % de agua y un 30 % de materia seca, componentes de proporción variable según la especie. Las variedades cultivadas son híbridos de la especie *officinarum* y otras afines (*spontaneum*), (De Souza Barbosa *et al.*, 2019).

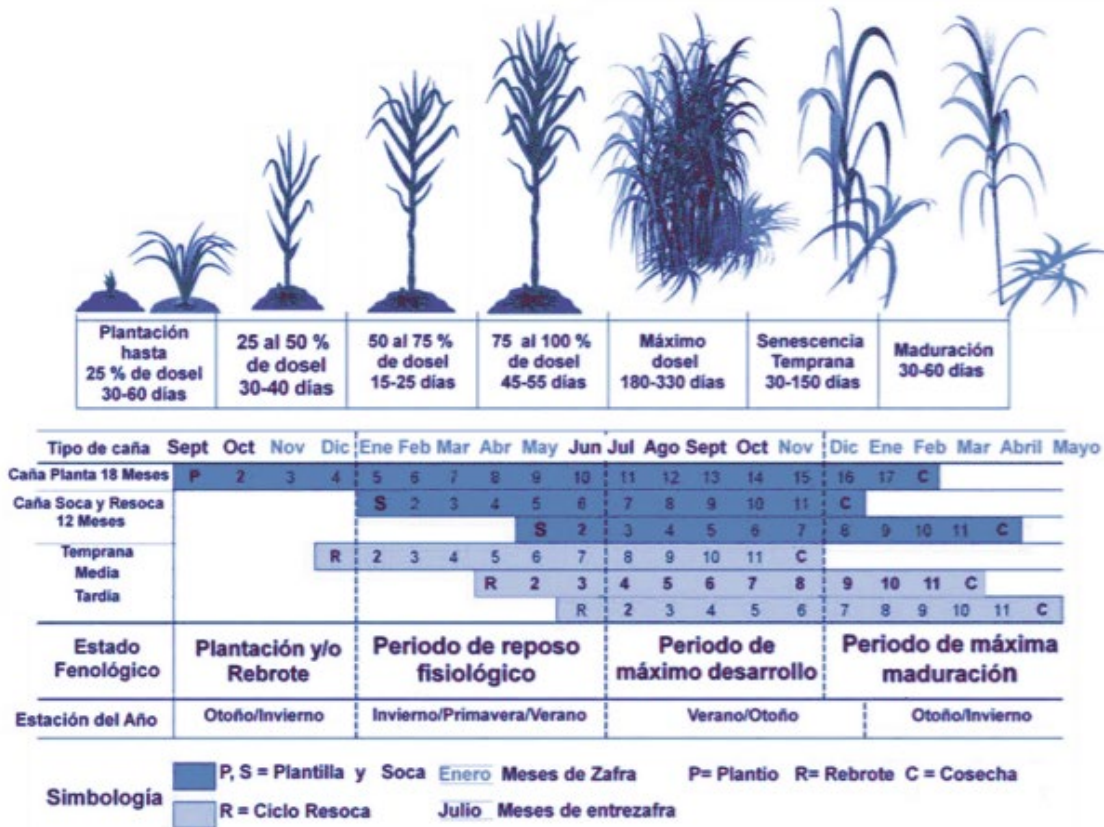


Figura 3. Etapas fenológicas del cultivo de caña de azúcar

Fuente: Luiz & Ramme (2008).

En un estudio sobre la fitorremediación de suelos con petróleo crudo nuevo e intemperizado, los resultados demostraron que la caña de azúcar puede ser utilizada en la fitorremediación de suelos contaminados por compuestos orgánicos como el petróleo y sus derivados (Rivera-Cruz & Palma-López, 2010). También se han encontrado estudios sobre la utilización de derivados de la caña de azúcar donde la cachaza resultó ser una alternativa para ser utilizada en los procesos de remoción de contaminantes como los hidrocarburos totales del petróleo e hidrocarburos aromáticos policíclicos de suelos contaminados con hidrocarburos del petróleo, al igual que el bagazo de caña de azúcar. La cachaza además de funcionar como enmienda, presenta la ventaja de aportar microorganismos al suelo con la capacidad de biotransformar los tóxicos, y de nutrientes en mayor concentración que los encontrados en bagazo de caña de azúcar, en especial del fósforo (García-Torres *et al.*, 2011).

2.7.2 *Heliconia rostrata*

Constituye, junto a las alpinias, lirio antorcha, anturios, entre otros, un grupo de flores tropicales nativas de la América tropical, presentan amplias posibilidades florísticas, calidades insuperables y durabilidad sobresaliente, dicha especie presenta condiciones agronómicas interesantes, como su alta resistencia a las características climáticas del país 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 objetivos de fitorremediación. El género *Heliconia* presenta de 225 a 250 especies en el mundo; Colombia es el 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 (Jerez, 2007). Se

han encontrado estudios que han evaluado el papel de las heliconias en la remediación de aguas residuales, como por ejemplo, una investigación realizada en el año 2016 que se tituló Diseño y evaluación de un sistema piloto para la descontaminación de aguas residuales generadas en la Universidad Francisco de Paula Santander, Ocaña, empleando las especies *Costus spicatus* y *Heliconia psittacorum*, elaborado por las estudiantes Luisa Fernanda Sánchez Gil y Yermis Fabián Vélez de la Facultad de Ciencias Agrarias y del Ambiente, programa de Ingeniería Ambiental de la universidad antes mencionada; así mismo otro estudio realizado en el año 2017 por las estudiantes Paula Daniela Coral Ceballos Lenny y Lorena Gómez Ángulo de la Corporación Universitaria Autónoma del Cauca, Facultad de Ciencias Ambientales y Desarrollo Sostenible, programa de Ingeniería Ambiental y Sanitaria, el cual se tituló Evaluación de la eficiencia de la especie *Heliconia psittacorum* en la remoción de mercurio proveniente de los efluentes mineros en un entable de Suárez. En otras investigaciones realizadas con *Heliconia psittacorum* para evaluar su potencial fitorremediador, se ha logrado demostrar que la especie presenta características adecuadas a las condiciones en los humedales construidos para el tratamiento de aguas residuales, a partir de su capacidad de eliminación de DBO₅, DQO y SST, por encima del 70 % de remoción sin detrimento de sus propiedades fisiológicas (Ibers & Schomaker, 1953); así mismo se realizó un proyecto en Tauramena (Casanare), donde emplearon *Heliconia psittacorum* como planta control, se obtuvo un porcentaje de remoción de contaminantes mayor al 70 % (Araque Niño *et al.*, 2020).

2.7.3 Coquito. *Cyperus rotundus*

Es una de las 500 especies de la familia de las *Ciperáceas* que existen en el mundo. la *Cyperus rotundus* se le conoce comúnmente bajo diferentes nombres: coquito, cebollín, cebolleta, coyolillo, tiritita, coquillo, nutgrass, purple nutsedge y nutsedge,

entre otros. El coquito ha sido reconocido como la maleza más dañina del mundo. Esta ciperácea, de origen asiático (India), se encuentra ampliamente distribuida en el trópico y sub-trópico; su agresividad, gran capacidad de competencia y adaptación a diversos medios y condiciones y su difícil control, hacen de esta maleza uno de los peores problemas en la agricultura (Centro Internacional de Agricultura Tropical, 1988). La característica sobresaliente de esta especie es la producción prolífica de tubérculos, mediante los cuales se reproduce vegetativamente; estas estructuras pueden permanecer latentes y sobrevivir a condiciones extremas de altas temperaturas, sequia, anegamiento y falta de aireación. Se ha determinado el potencial de acumulación de metales pesados de doce especies de malezas nativas (Pajoy Muñoz, 2017), como por ejemplo, un estudio realizado en la Universidad Nacional de Trujillo, afirma que la planta *C. Rotundus* absorbe el metal, indicando de tal modo que el agua contaminada, en este caso con cobre, se puede purificar del metal con esta especie vegetal (Ordoñez Rodríguez, 2016); otras investigaciones demuestran que el *cyperus* acumula en sus raíces distintas concentraciones de plomo, cobre y cromo (Kamal *et al.*, 2004). La investigación de Gutiérrez Mosquera, Peña Varón & Aponte Reyes (2010), mostró una remoción de nitratos y fosfatos de 41.67% y 28.71% respectivamente.

2.7.4 Albahaca blanca *Ocimum basilicum*

El género *Ocimum* está representado por más de 150 especies y tiene una amplia distribución geográfica por todas las regiones de clima tropical y subtropical; una de ellas especie *Ocimum basilicum* L. (albahaca blanca) perteneciente a la familia de las *Labiadas*, presente en diferentes partes del mundo (Sánchez Govín *et al.*, 2000) presenta gran variabilidad en la tolerancia a distintos tipos de estrés (Dolores *et al.*, 2018).

En otros estudios se ha podido evidenciar que la *Ocimum basilicum* puede utilizarse como planta

hiperacumuladora de cobre y manganeso. Lo que representa un gran avance para la investigación de este tipos de plantas puesto que también se pudiera extrapolar a otros tipos de contaminantes como pueden ser otros metales pesados, químicos orgánicos e inorgánicos o derivados de hidrocarburos (Dolores *et al.*, 2018)

2.7.5 El limoncillo (*Cymbopogon citratus*)

Es una planta perenne de la familia *Poaceae* nativa del sur de la India y Sri Lanka, pero actualmente distribuida alrededor del mundo principalmente en las sabanas y regiones tropicales (Morales & Salazar, 2014). En Colombia es cultivado de 0 a 1.900 msnm (Alarcón, 2011), siendo la zona cafetalera el área más representativa, encontrándose como cercas vivas alrededor de los lotes del cultivo o como cultivo protector en áreas degradadas debido a su efecto favorable en la conservación de suelos (Serrato-Castillo & Moreno-Berrocal, 2003). Esta planta es reconocida por sus propiedades medicinales y ampliamente utilizada en la extracción de aceites esenciales con diversos fines, como aromatizantes y repelentes de insectos (Morales & Salazar, 2014).

2.8 Marco legal

El ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible mediante la Resolución 0631 del 17 de marzo de 2015 reglamentó la Norma de Vertimientos y actualizó el Decreto 1594 de 1984 (vigente desde hace 30 años) para ejercer el control de las sustancias contaminantes que llegan a los cuerpos de agua, vertidas como consecuencia de 73 actividades productivas, agrupadas en ocho sectores económicos del país (Minambiente, 2015) dentro de esta resolución se encuentra el Artículo 9 para la actividad ganadería de bovino, bufalino, equino, ovino y/o caprino-beneficio el cual es aplicable al SENA CLEM para la evaluación de sus vertimientos y se comparó el tratamiento antes y después por fitorremediación.

TABLA 3.

Artículo 09. Ganadería de bovino, bufalino, equino, ovino y/o caprino-beneficio

Parámetros	Unidades	Valores permisibles
Demanda química de oxígeno	mgO ₂ /L	900
Demanda bioquímica de oxígeno	mgO ₂ /L	450
Sólidos suspendidos totales	mg/L	200
Sólidos sedimentables	mL/L	5
Grasas y aceites	mg/L	50
Ortofosfatos	mg/L	Análisis y reporte
Sustancias activas al azul de metileno	mg/L	
Fosforo total	mg/L	
Nitratos	mg/L	
Nitritos	mg/L	
Nitrógeno amoniacal	mg/L	
Nitrógeno total	mg/L	
Nitrógeno total Kjeldahl	mg/L	Análisis y reporte
Cloruros	mg/L	
Sulfatos	mg/L	
Acidez total	mg/L	
Alcalinidad total	mg/L	
Dureza cálcica	mg/L	
Dureza total	mg/L	
Color real (436 nm, 525 nm, 620 nm)	m ⁻¹	

3. METODOLOGÍA

3.1 Materiales y métodos

• Condiciones experimentales

La investigación se realizó en la granja del SENA CLEM Tuluá, la cual se localiza en el departamento del Valle del Cauca, municipio de Tuluá en la cuenca hidrográfica del río que lleva su mismo nombre, a 2 kilómetros de la vía Tuluá-Buga. Cuenta con un clima templado y frío en las noches con temperatura

promedio de 23° C y precipitación entre 900mm y 2.350 mm anuales y una altura sobre el nivel del mar de 1.000 m, en esta granja el SENA y su CLEM brindan capacitación permanente a los productores porcícolas de la región, por lo tanto, es un sitio de referencia para la transferencia de tecnología.

El SENA cuenta con una planta de tratamiento de aguas residuales la cual se puede apreciar en las figuras 4 y 5.

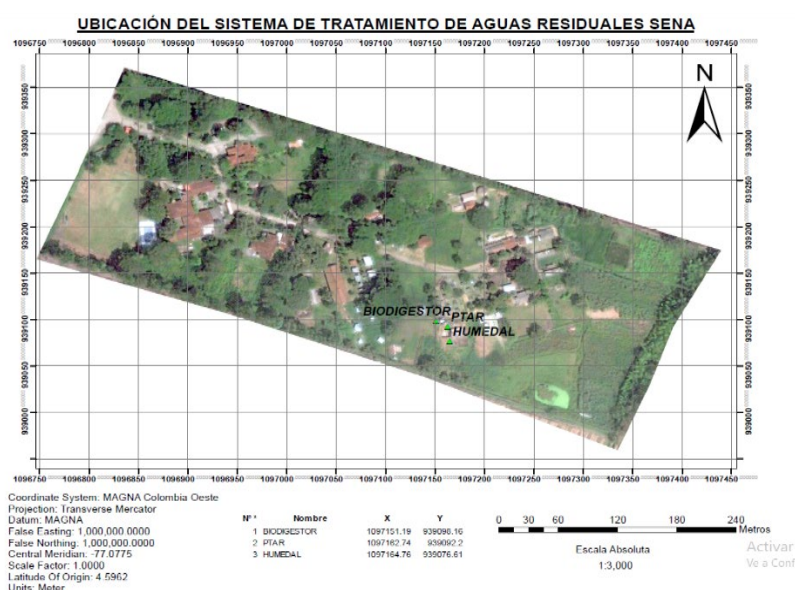


Figura 4. Ubicación del sistema de tratamiento de aguas residuales SENA



Figura 5. Imágenes aéreas del SENA CLEM en sus inicios 1975. Instalaciones locativas - Granja CLEM Localización del humedal del SENA CLEM y el humedal continuo Fuente: Pablo Emilio Flores (Biólogo CVC - Dirección Técnica Ambiental Grupo Biodiversidad) - (20/11/2013).

• Material vegetal y simulación del humedal

Se seleccionaron cinco (5) especies vegetales de limoncillo (*Cymbogogon citratus*), albahaca (*Ocimum basilicum*), heliconia (*Heliconia rostrata*), caña de azúcar (*Saccharum officinarum*) y coquito (*Cyperus rotundus*), se plantaron en el humedal artificial (Figura 4) y se evaluó su crecimiento y respuesta durante cinco (5) meses. La siembra se realizó en dos ciclos; en el

primero se sembró la heliconia y la albahaca, en la segunda el coquito, limoncillo y la caña de azúcar; inicialmente fueron regadas con agua y vertimiento de la porcícola que le permitiera la adaptación al medio. Posteriormente con aguas residuales porcinas para identificar la capacidad de las especies para adaptarse a cada medio filtrante y la utilización de las aguas residuales realizada. Figura 6.



Figura 6. Plantación y desarrollo de las especies vegetales en los humedales artificiales utilizados en el tratamiento del vertimiento porcícola

• Caracterización fisicoquímica antes y después del tratamiento

Para tener un punto de partida y realizar un adecuado análisis de datos, se realizó una caracterización fisicoquímica de los vertimientos antes del tratamiento comparándolo con el Artículo 09 de la Resolución 0631 del 2015 Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, Tabla 3, se realizó durante 06 horas con composición única, midiendo el caudal cada 15 minutos y realizando medición de pH, y temperatura *in situ*, a la vez que se tomaban las alícuotas para un total de 24 alícuotas en toda la jornada. Posteriormente, estas muestras fueron analizadas por el laboratorio Water Technology Engineering ubicado en la ciudad de Cali, que a su vez

subcontrató al laboratorio CIAN LTDA., ubicado en la ciudad de Bogotá para realizar el análisis de los parámetros que no tenía alcance (Informe 9063 y 002980). Después del tratamiento con fitorremediación se realizó otra caracterización de vertimientos con igual características y así lograr evaluar los % de remoción.

4. DISCUSIÓN Y RESULTADOS

Las características de los vertimientos líquidos al inicio de la investigación presentaron resultados por encima del valor máximo permisible de acuerdo al Artículo 09 de la Resolución 0631 del 2015 ver Tabla 4.

TABLA 4.

Resultados de la caracterización de vertimientos antes y después de la fitorremediación

Parámetro evaluado	Unidades	Resultados 2018		
		Inicial sin fitorremediación	Fitorremediación heliconia	Fitorremediación caña de azúcar
pH máximo	Unidad	6,82	8,2	0
pH mínimo	Unidad	6,41	7,51	0,2
Temperatura máxima	°C	24,9	28,6	0,7
Demanda química de oxígeno	mgO ₂ /L	8640	101,2	410,8
Demanda bioquímica de oxígeno	mgO ₂ /L	2476	153,2	227
Solidos suspendidos totales	mgSST/L	168	138	53
Solidos sedimentables	mL/L	350	< 0,1	0,1
Grasas y aceites	mg/L	86,6	6,1	16,2
Ortofosfatos	mg/L	15,6	94,93	94,91
Sustancias activas al azul de metileno	mg/L	11,24	< 0,2	< 0,2
Fosforo Total	mg/L	1,7	33,03	32,56
Nitratos	mg/L	< 0,05	5,83	-0,33
Nitritos	mg/L	429,91	1,94	100,5
Nitrógeno amoniacal	mg/L	672,31	186,21	29,67
Nitrógeno total	mg/L	671,93	187,68	33,1
Nitrógeno total Kjeldahl	mg/L	50	179,9	119,9
Cloruros	mg/L	5,22	788,6	786,39
Sulfatos	mg/L	472,79	2,8	70,53
Acidez total	mg/L	< 6,8	76,3	69,5
Alcalinidad Total	mg/L	1078,5	1116,65	901,85
Dureza cálcica	mg/L	246,7	203,42	158,32
Dureza total	mg/L	728,8	372,56	178,86
Color real 436 nm	m-1	31,8	8,23	5,47
Color real 525 nm		26,3	3,5	2,98
Color real 620 nm		20,6	1,58	1,68

De acuerdo a la Tabla 4, el porcentaje de los sólidos sedimentables detectados en los vertimientos antes del inicio de la investigación fueron 6.900 % por encima del valor permisible, la demanda química de oxígeno 980 %, demanda bioquímica 450 % y grasas y aceites 189 %; en ese mismo sentido

se presentaron resultados por debajo del valor límite permisible como por ejemplo sólidos suspendidos totales 2.5 %, cloruros y sulfatos de 99 y 5 % respectivamente, lo cual evidencia que es un vertimiento con características especialmente orgánicas, estos valores se representan en la Figura 7.

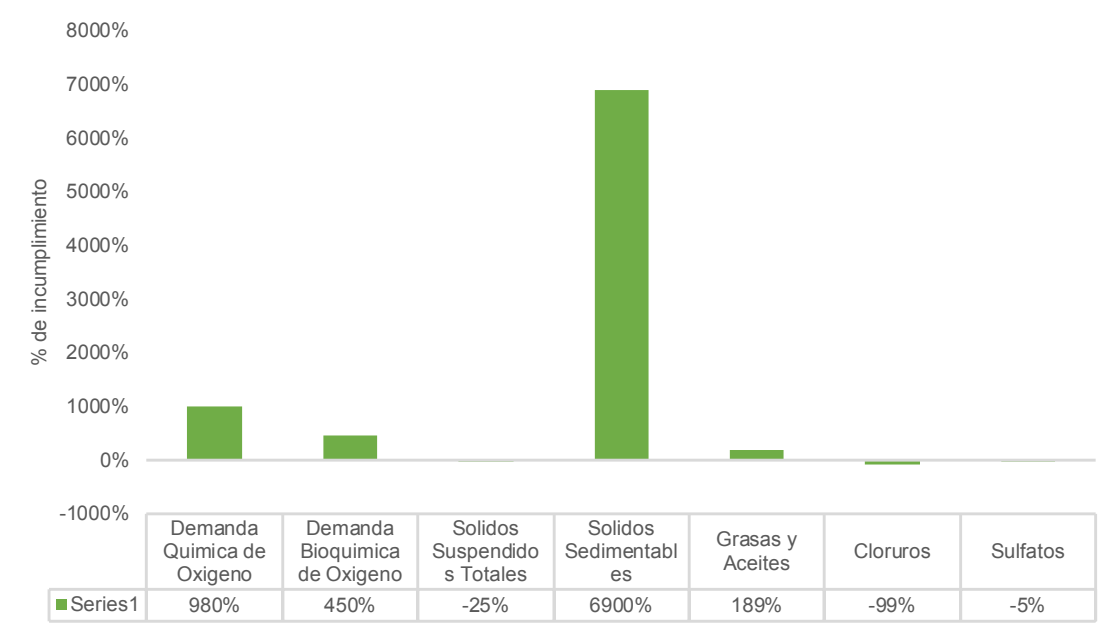


Figura 7. Porcentaje de incumplimiento.

Se realizó la plantación de cinco (5) especies y su posterior análisis cualitativo, donde se observó y determinó que únicamente las especies que soportaron las condiciones de estrés fueron: heliconia (*Heliconia rostrata*) y caña de azúcar (*Saccharum officinarum*).

El limoncillo (*Cymbogon citratus*) no logró germinar, la albahaca (*Ocimum basilicum*) germinó en un 70 % en 21 días, posterior de iniciar su crecimiento; quince (15) días de haber germinado, se detuvo su crecimiento y se debilitó. El coquito (*Cyperus rotundus*) tuvo una tasa de germinación del 2%, con un adecuado crecimiento, sin embargo, a los 30 días no se adaptó a las condiciones y dejó de crecer.

Dada las condiciones anteriores de las plantas que no soportaron las condiciones, se tomó la decisión de

no usarlas en los ensayos, ya que precisamente se buscaba identificar las plantas más resistentes a estas características de vertimiento.

Posteriormente se llevó a cabo nuevamente la caracterización de vertimientos líquidos, pero en esta ocasión para evaluar el proceso de fitorremediación de la heliconia y caña de azúcar y así hacer el contraste de una respecto a la otra y evidenciar aquella con mejor desempeño en este tipo de vertimiento. Los resultados se presentan en la Tabla 5; de acuerdo a ello se puede resaltar que la heliconia presenta mayor fitorremediación que la caña de azúcar y se puede validar con el porcentaje de remoción (ver Tabla 6), donde se consideró únicamente los parámetros que tienen valor máximo permisible y no aquellos con análisis y reporte.

TABLA 5.
Resultados con fitorremediación

Parámetro evaluado	Unidades	Resultados 2018	
		Fitorremediación heliconia	Fitorremediación caña de azúcar
pH máximo	Unidad	8,2	7,51
pH mínimo	Unidad	7,51	6,96
Temperatura máxima	°C	28,6	26,75
Demanda química de oxígeno	mgO ₂ /L	101,2	410,8
Demanda bioquímica de oxígeno	mgO ₂ /L	153,2	227
Solidos suspendidos totales	mgSST/L	138	53
Solidos sedimentables	mL/L	< 0,1	0,1
Grasas y aceites	mg/L	6,1	16,2
Ortofosfatos	mg/L	94,93	94,91
Sustancias activas al azul de metileno	mg/L	< 0,2	< 0,2
Fosforo total	mg/L	33,03	32,56
Nitratos	mg/L	5,83	-0,33
Nitritos	mg/L	1,94	100,5
Nitrógeno amoniacal	mg/L	186,21	29,67
Nitrógeno total	mg/L	187,68	33,1
Nitrógeno total Kjeldahl	mg/L	179,9	119,9
Cloruros	mg/L	788,6	786,39
Sulfatos	mg/L	2,8	70,53
Acidez total	mg/L	76,3	69,5
Alcalinidad total	mg/L	1116,65	901,85
Dureza cálcica	mg/L	203,42	158,32
Dureza total	mg/L	372,56	178,86
Color real 436 nm	m-1	8,23	5,47
Color real 525 nm		3,5	2,98
Color real 620 nm		1,58	1,68

TABLA 6.

Porcentaje de remoción de heliconia y caña azúcar

Parámetro evaluado	% de remoción	
	Heliconia	Caña de azúcar
Demanda química de oxígeno	99%	95%
Demanda bioquímica de oxígeno	9381%	90.8%
Sólidos suspendidos totales	1786%	68.5
Sólidos sedimentables	9997%	100
Grasas y aceites	9296%	81.3

Teniendo en cuenta los resultados de la Tabla 6, se analizó que la heliconia posee una mayor característica para hacer el proceso de fitorremediación respecto a la caña de azúcar, puesto que en general presenta porcentajes de remoción por encima del 100%.

Gutiérrez (2009) sometidos a una carga de 5,68 g N m⁻² d⁻¹ y un tiempo nominal de retención de

1,0 día. Los resultados indicaron una mayor eficiencia de eliminación de la carga de N en los microcosmos plantados (29,6% registró un mejor desempeño de estas plantas en la eliminación de DQO y DBO₅ aplicada al sembrado con la especie *Heliconia sp.*, lo que también se ve reflejado en la presente investigación aún con una especie diferente.

TABLA 7.

Diferencia respecto al valor permisible

Parámetro evaluado	Diferencia respecto al valor permisible		
	Sin fitorremediación.	Fitorremediación con heliconia	Fitorremediación con caña de azúcar
Demanda química de oxígeno	980%	-87%	-48,7%
Demanda bioquímica de oxígeno	450%	-66%	-49,6%
Sólidos suspendidos totales	-25%	-39%	-76,4%
Sólidos sedimentables	6900%	-98%	-98,0%
Grasas y aceites	189%	-80%	-46,0%

Todas estas observaciones se relacionan también en la Tabla 7 donde se evidencia que la especie que permitió mayor cumplimiento con respecto al límite permisible del Artículo 09 de la Resolución 0631 del 2015 Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible

fue la heliconia; estando entre 80 y 90 % por debajo de este valor. La heliconia es una especie macrófita que presenta facilidad de crecimiento y adaptación al clima tropical, esto se da por el buen estado de las raíces y rizomas, puesto que tienen una gran capacidad

colonizadora además proporciona una superficie adecuada para el crecimiento de la biopelícula, aumentando los microorganismos depuradores en la remoción de contaminantes (Carvajal Arias *et al.*, 2018), permitiendo así, una fitorremediación mayor. Ahora bien la caña de azúcar realizó un proceso de fito extracción presentando una fitorremediación aceptable en un vertimiento con características principalmente orgánicas, puesto que tiene un porcentaje por debajo del límite permisible muy favorable entre 48 y 90 % (ver Tabla 7), esto se da puesto que esta especie posee una alta producción de biomasa, es decir la planta absorbe los contaminantes a través de las raíces y los acumula en grandes cantidades retirándose los contaminantes del suelo a través de su cosecha. Si bien es cierto que la heliconia presenta valores de favorabilidad respecto a la caña de azúcar de aproximadamente 50 %, conviene enfatizar que en casos futuros donde se tengan vertimientos con baja carga orgánica sería muy favorable hacer uso de la caña de azúcar, sin embargo, para la industria porcícola no se recomienda.

5. CONCLUSIONES

Se evaluó la eficiencia fitorremediadora de cinco (5) especies vegetales, determinando la capacidad de adaptación, desarrollo y remoción de contaminantes en el humedal artificial de la granja agrícola.

Se determinó que la caña de azúcar (*S. officinarum* L) y la heliconia (*H. rostrata*) pueden ser aprovechadas sosteniblemente dentro de un sistema fitorremediador para el beneficio del productor porcícola.

La planta con mejor eficiencia fitorremediadora fue la heliconia (*H. rostrata*.)

La caña de azúcar (*S. officinarum* L) presentó un efecto fitorremediador, aunque en vertimientos con una baja carga orgánica para así garantizar cumplimiento normativo.

En consecuencia, con el efecto fitorremediador la heliconia permite dar cumplimiento al Artículo 09.

Ganadería de bovino, bufalino, equino, ovino y/o caprino-beneficio de la Resolución 0631 del 2015 Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible.

REFERENCIAS

- Araque Niño, I. D., Britto Aponte, M. C., Cuellar Rodríguez, L. A., & Perico Granados, N. R. (2020). Fitorremediación en aguas residuales sin tratamiento previo. Caso: Tierra Negra, Boyacá. *Revista de Tecnología*, 17(1), 37–48. <https://doi.org/10.18270/rt.v17i1.2950>
- Arias, S. Betancur, F. (2010). Fitorremediación con humedales artificiales para el tratamiento de aguas residuales porcinas. *Revista Informador Técnico*, 11. http://revistas.sena.edu.co/index.php/inf_tec/article/view/5/3214
- Minambiente (2006). *Lineamientos y recomendaciones para el programa de buenas prácticas pecuarias para el subsector porcícola colombiano en el marco de las evaluaciones ambientales estratégicas según metodología del Departamento Nacional de Planeación*. 44.
- Bernal Figueroa, A. A. (2014). Fitorremediación en la recuperación de suelos: una visión general. *Revista de Investigación Agraria y Ambiental*, 5(2), 245. <https://doi.org/10.22490/21456453.1340>
- Carvajal Arias, C. E., Ortiz, P., & Vega Beltran, A. L. (2018). Propuesta de tratamiento de aguas residuales domésticas implementando un humedal artificial de flujo subsuperficial empleando bambusa sp en la finca el recreo ubicada en Tau-ramena, Casanare. *Revista de Tecnología*, 16(1), 65. <https://doi.org/10.18270/rt.v16i1.2317>
- Centro Internacional de Agricultura Tropical, C. (1988). El coquito (*Cyperus rotundus* L.): Biología, Manejo y Control. *CIAT - Centro Internacional de Agricultura Tropical*, 2(4), http://ciat-library.ciat.cgiar.org/Articulos_Ciat/Digital/AV_SB_615_C6_C6_1998_GUIA_C.1_El_coquito_Cyperus_rotundus_L._Biología,_manejo_y_control.pdf
- Conadesuca. (2015). Ficha técnica del cultivo de la caña de azúcar (*Saccharum Officinarum* L.) Comité Nacional para el Desarrollo Sustentable de la Caña de Azúcar. *Ficha Técnica*, México, 19.
- De Souza Barbosa, G. V., Dos Santos, J. M., Diniz, C. A., Cursi, D. E., & Hoffmann, H. P. (2019). Energy cane breeding. *Sugarcane Biorefinery, Technology and Perspectives*. Elsevier Inc. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-814236-3.00006-8>
- Delgadillo-López, A. E., González-Ramírez, C. A., Prieto-García, F., Villagómez-Ibarra, J. R., & Acevedo-Sandova, O. (2011). Phytoremediation: An alternative to eliminate pollution. *Tropical and Subtropical Agroecosystems*, 14(2), 597–612.
- Díaz Recio, J. & Ospina Vargas, M. L. (2019). *Estudio preliminar de la técnica de Fitorremediación en vertimientos relacionados con aguas residuales industriales*. (Tesis de grado). UNAD, Palmira. <https://repository.unad.edu.co/handle/10596/25310>

- Dolores, M., Espinosa, G., Miranda, N. C., Catalina, M., Morales, R., Karime, A., & Ortiz, F. (2018). Phytoremediation of soils contaminated with Mn and Cu from *Ocimum basilicum*. *Revista Latinoamericana El Ambiente y las Ciencias*, 9(22), 76-89.
- [http://cmas.siu.buap.mx/portal_pprd/work/sites/rlac/resources/LocalContent/55/2/9\(22\)-6.pdf](http://cmas.siu.buap.mx/portal_pprd/work/sites/rlac/resources/LocalContent/55/2/9(22)-6.pdf)
- Jerez, E. (2007). El cultivo de las heliconias. *Cultivos Tropicales*, 28(1), 29-35.
- Epa, U. S. (2019). *Introduction to Phytoremediation*. 1-7. <https://doi.org/10.4018/978-1-5225-9016-3.ch001>
- Espinosa, L. F., Parra, J. P., & Villamil, C. (2011). Determinación del contenido de metales pesados en las fracciones geoquímicas del sedimento superficial asociado a los manglares de la ciénaga grande de Santa Marta, Colombia. *Boletín de Investigaciones Marinas y Costeras*, 40(1), 7-23.
- García-Torres, R., Rios-Leal, E., Martínez-Toledo, Á., Ramos-Morales, F. R., Cruz-Sanchez, J. S., & del María, C. C. D. (2011). Uso de cachaza y bagazo de caña de azúcar en la remoción de hidrocarburos en suelo contaminado. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*, 27(1), 31-39.
- Gutiérrez Mosquera, H. Peña Varón, M. & Aponte Reyes, A. (2010). Estimación del balance de Nitrógeno en un humedal construido subsuperficial plantado con *Heliconia psittacorum* para el tratamiento de aguas residuales domésticas. *Revista Facultad de Ingeniería Universidad de Antioquia*, 56, 87-98. http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0120-62302010000600009&lng=en&nrm=iiso. ISSN 0120-6230.
- Ibers, J. A., & Schomaker, V. (1953). The structure of oxygen fluoride. *Journal of Physical Chemistry*, 57(7), 699-701. <https://doi.org/10.1021/j150508a023>
- Kamal, M., Ghaly, A. E., Mahmoud, N., & CoteCôté, R. (2004). Phytoaccumulation of heavy metals by aquatic plants. *Environment International*, 29(8), 1029-1039. [https://doi.org/10.1016/S0160-4120\(03\)00091-6](https://doi.org/10.1016/S0160-4120(03)00091-6)
- Kidd, P. S., Becerra Castro, C., García Lestón, M., & Monterroso, C. (2007). Aplicación de plantas hiperacumuladoras de níquel en la fitoextracción natural : el género *Alyssum* L. *Ecosistemas*, 2(2), 1-18.
- Lobos, M. J. (2008). *Efectividad de biosólidos para la fitoestabilización de un tranque de relaves minero, en la comuna de Nogales*. (Tesis de grado). Universidad de Chile, Santiago.
- López-Martínez, S., Gallegos-Martínez, M. E., Pérez Flores, L. J. & Gutiérrez Rojas, M. G. (2005). Mecanismos de fitorremediación de suelos contaminados con moléculas orgánicas xenobióticas. <http://www.scielo.org.mx/pdf/rica/v21n2/0188-4999-rica-21-02-91.pdf>
- Méndez, N. L. (2020). *Procesos de fitorremediación en suelos contaminados con cadmio: revisión de Literatura*. (Tesis de grado). Escuela Agrícola Panamericana, Zamorano.
- Minambiente. (2015). *Resolucion 0631 del 2015. Por la cual se establecen los parámetros y los valores límites máximos permisibles en los vertimientos puntuales a cuerpos de aguas superficiales y a los sistemas de alcantarillado público y se dictan otras disposiciones*. <https://fenavi.org/wp-content/uploads/2018/05/Resolucion-631-2015.pdf>
- Morales, L. Á., & Salazar, Y. (2014). Caracterización morfológica de las royas (pucciniales) que afectan el limoncillo (*Cymbopogon citratus* (DC.) Stapf) en Colombia. *Bioagro*, 26(3), 171-176. <http://www.scielo.org.ve/pdf/ba/v26n3/art06.pdf>
- Ordoñez Rodríguez, D. E. (2016). *Efecto biorremediador de Cyperus rotundus en aguas contaminadas con cobre en condiciones de laboratorio*. (Tesis de grado). Universidad Nacional de Trujillo, Trujillo.
- Ososrio Saraz, J. A., Ciro Velásquez, H. J. & González, H. (2007). Evaluación de un sistema de biodigestión en serie para clima frío. *Revista Facultad Nacional de Agronomía*, 60(2). <http://www.scielo.org.co/pdf/rfnam/v60n2/a17v60n2.pdf>
- Pajoy Muñoz, H. M. (2017). *Potencial fitorremediador de dos especies ornamentales como alternativa de tratamiento de suelos con metales pesados*. <http://bdigital.unal.edu.co/61056/1/10307327.2017.pdf>
- PAMPA, R. (2016). Introducción. *Pampa*, 13, 7-8. <https://doi.org/10.14409/pampa.v0i13.5904>
- Ramme, F. L. P. (2008). *Perfis temporais NDVI e sua relação com diferentes tipos de ciclos vegetativos da cultura da cana-de-açúcar*. (Tesis de grado). Universidade Estadual de Campinas. Campinas. https://bdtd.ibict.br/vufind/Record/CAMP_5723ffb8c1810fbce35c50adf6286571
- Rascio, N., & Navari-Izzo, F. (2011). Heavy metal hyperaccumulating plants: How and why do they do it? And what makes them so interesting? *Plant Science*, 180(2), 169-181. <https://doi.org/10.1016/j.plantsci.2010.08.016>
- Rivera-Cruz, M. C., & Palma-López, D. J. (2010). Efectos de rizosfera, microorganismos y fertilización en la cruda nuevo e intemperizado. *Universidad y Ciencia*, 26(2), 121-136. <http://www.scielo.org.mx/pdf/uc/v26n2/v26n2a1.pdf>
- Núñez López, R. A. & Vong, Y. M. (2004). Fitorremediación fundamentos y aplicaciones.pdf. *Biotecnología y Biología Molecular*. https://www.revistaciencia.amc.edu.mx/images/revista/55_3/Fitorremediacion.pdf
- Rodríguez. (2011). Gestión integral de los residuos hospitalarios y vertimientos generados en las unidades de atención básica del instituto nacional de medicina legal y ciencias forenses, nivel nacional, 2009- 2015. *Prevención Integral*. <https://www.prevenccionintegral.com/canal-orp/papers/orp-2011/gestion-integral-residuos-hospitalarios-vertimientos-generados-en-unidades>
- Salam, J. A., Hatha, M. A. A., & Das, N. (2017). Microbial-enhanced lindane removal by sugarcane (*Saccharum officinarum*) in doped soil-applications in phytoremediation and bioaugmentation. *Journal of Environmental Management*, 193, 394-399. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2017.02.006>

Sánchez Govín, E., Leal López, I., Fuentes Hernández, L., & Rodríguez Ferrada, C. A. (2000). Estación experimental de plantas medicinales. *Revista Cubana Farmacia*, 34(3), 187–195.

Schwitzguébel, J. (2001). Hype or Hope: The Potential of Phytoremediation as an Emerging Green Technology. *Remediation Journal*, 11(4), 63–78. https://www.researchgate.net/publication/227496433_Hype_or_Hope_The_Potential_of_Phytoremediation_as_an_Emerging_Green_Technology

Serrato-castillo, A., & Moreno-berrocal, A. M. (2003). Efecto del abono orgánico y de la edad del inicio del corte en la producción de biomasa y de aceite esencial de limoncillo. *Cenicafe*, 54(4), 273–277. <https://www.cenicafe.org/es/publications/arc054%2804%29273-277.pdf>