

**Estudio comparativo entre un sistema combinado de biofiltración y un sistema del tipo tradicional como alternativa al tratamiento de aguas residuales para viviendas rurales en Colombia**

Autor:

Javier Eduardo Jaimes Bermúdez

Universidad Nacional Abierta y a Distancia

Escuela de Ciencias Agrícolas, Pecuarias y del Medio Ambiente

Ingeniería Ambiental

Bucaramanga, 2020

## Resumen

En las áreas rurales del país la gestión del recurso hídrico depende en gran medida de la apropiación de las comunidades en la administración y en el uso eficiente de este recurso. En el país menos del 5% de las viviendas ubicadas en las zonas rurales cuentan con un sistema de tratamiento de aguas residuales (MAVDT, 2004). Estas viviendas no cuentan con un sistema para el tratamiento de aguas residuales y éstas son descargadas a los cuerpos receptores sin tratamiento previo o son descargadas al terreno aledaño, produciendo la contaminación de las aguas subterráneas. Los sistemas de tratamiento convencionales requieren de gran inversión para su implementación, mantenimiento y operación, difícilmente costeables para las comunidades pequeñas. Debido a esto, son indispensables los sistemas de tratamiento con bajo costo, tanto en inversión como en su operación y mantenimiento. En la actualidad se han desarrollado sistemas como los biofiltros y los humedales artificiales estos son sistemas viables para el tratamiento de las aguas residuales por su bajo costo, operación simple y mínimo mantenimiento. La implementación de estos sistemas deriva en altas eficiencias de remoción de los contaminantes típicamente presentes en ellas. El presente estudio tiene como objetivo combinar las ventajas de la biofiltración utilizando un material orgánico (fibra de coco) y un sistema de humedales para tratar un caudal medio de 800 L/día producido por una familia tradicional del área rural colombiana (5 habitantes) a nivel doméstico.

## **Abstract**

In rural areas of the country, the management of water resources depends to a great extent on the appropriation of the communities in the administration and in the efficient use of this resource. In the country, less than 5% of the homes located in rural areas have a wastewater treatment system (MAVDT, 2004). These homes do not have a system for the treatment of wastewater and these are discharged to the receiving bodies without previous treatment or are discharged to the surrounding land, causing contamination of the groundwater. Conventional treatment systems require a large investment for their implementation, maintenance and operation, which are difficult to afford for small communities. Because of this, low-cost treatment systems are essential, both in investment and in their operation and maintenance. At present, systems such as biofilters and artificial wetlands have been developed, these are viable systems for the treatment of wastewater due to their low cost, simple operation and minimal maintenance. The implementation of these systems results in high removal efficiencies for the pollutants typically present in them. The present study aims to combine the advantages of biofiltration using an organic material (coconut fiber) and a wetland system to treat an average flow of 800 L / day produced by a traditional family from the Colombian rural area (5 inhabitants) to domestic level.

## Tabla de contenido

1.	Planteamiento del problema .....	10
2.	Justificación.....	11
3.	Objetivo general .....	13
3.1.	Objetivos específicos.....	13
4.	Marco teórico .....	14
4.1.	Marco conceptual .....	15
4.1.1.	Agua Residual.....	15
4.1.2.	Biofiltración.....	15
4.1.3.	Humedales Artificiales .....	15
4.1.4.	Lagunaje.....	15
4.1.5.	Área Rural.....	15
4.1.6.	Microorganismo.....	15
4.1.7.	Filtración.....	16
4.1.8.	Plantas acuáticas en el tratamiento de aguas residuales .....	16
4.1.9.	Sistema de biofiltración sobre cama de material orgánico para el tratamiento de aguas residuales .....	16
4.1.10.	Sistemas de tratamiento por aplicación del suelo .....	17
4.1.11.	Filtros biológicos intermitentes y con recirculación.....	17

4.1.12.	Biofiltros .....	18
4.1.13.	Sistemas de tratamiento con humedales artificiales .....	18
5.	Metodología .....	19
5.1.	Tipo de estudio .....	19
5.2.	Fuentes de información .....	19
5.3.	Diseño metodológico.....	19
5.3.1.	Fase de consulta y documentación.....	20
5.3.2.	Fase de evaluación .....	20
5.3.3.	Fase de proyección.....	20
6.	Resultados .....	22
6.1.	Fase 1: Descripción de los sistemas sometidos a estudio.....	22
6.1.1.	Sistema convencional de tratamiento de aguas residuales domesticas.....	22
6.1.2.	Sistema combinado propuesto .....	23
6.2.	Fase 2: Diseño del sistema combinado propuesto .....	28
6.2.1.	Diseño Biofiltro .....	28
6.2.2.	Diseño del sistema de lagunaje propuesto .....	30
6.3.	Fase 3: Sistema combinado propuesto.....	30
7.	Evaluación de parámetros del sistema propuesto.....	31
7.1.	Comparativo por parámetros del sistema propuesto frente al sistema	

7.2. Ventajas, consideraciones y aplicabilidad del sistema propuesto .....	34
8. Conclusiones .....	36
9. Recomendaciones.....	37
10. Bibliografía.....	38

### Lista de tablas

Tabla 1 Límites de descarga a un cuerpo de agua dulce Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Sostenible, 2004. ....	21
Tabla 2 .Propiedades físicas y mecánicas de la fibra de coco. Fuente: autor.....	25
Tabla 3 Propiedades funcionales de la fibra de coco. Fuente: Rincón, 2016.....	25
Tabla 4 Producción de agua residual aproximada en un hogar compuesto por 5 personas en el área rural colombiana. Fuente: Autor .....	31
Tabla 5 Detalle de caracterización del afluente y efluente del Biofiltro experimental. Fuente: Reyes, 2016. ....	32
Tabla 6 Comparación de los dos sistemas propuestos en el estudio. Fuente: Autor. ....	33
Tabla 7 Ventajas comparativas del sistema combinado propuesto con el sistema convencional. Fuente: Autor. ....	34

**Lista de ilustraciones**

Ilustración 1. Fases del proyecto .....	20
Ilustración 2. Etapas del tratamiento de aguas residuales convencional. Fuente: Autor.....	22
Ilustración 3 Distribución y composición de las capas en el Biofiltro. Fuente: Autor.....	26
Ilustración 4. Humedales artificiales de flujo superficial HHAA FS. Fuente: Blázquez, 2016.....	27
Ilustración 5 Biofiltro propuesto. Fuente: Autor. ....	29
Ilustración 6. Biofiltro propuesto. Fuente: Autor. ....	30

## Introducción

Las aguas residuales en la mayoría de zonas rurales del país se originan por los desperdicios que genera el ser humano, estos desechos sino son tratados adecuadamente se vuelven contaminantes de fuentes de aguas y suelos que pueden llegar a ocasionar enfermedades que afectan a la población, razón por la cual el presente proyecto tiene como objetivo comparar un sistema combinado de biofiltración utilizando un material orgánico como lo es la fibra de coco y un sistema tipo tradicional como posible tratamiento de aguas residuales para viviendas rurales.

Durante este documento encontraremos el marco conceptual en el cual se desarrolla el proyecto, fijando objetivos de este con el fin de comparar el sistema combinado de biofiltración propuesto con el tradicional usado para el tratamiento de aguas residuales. Posteriormente de acuerdo con lo que se requería lograr en este estudio se propusieron tres fases así: consulta y documentación, evaluación, estudio comparativo y resultados que permitieran identificar el sistema adecuado de tratamiento combinado como posible alternativa al tratamiento de agua residual.

Finalmente se presentarán algunas conclusiones y recomendaciones del sistema propuesto en cuanto al funcionamiento, efectividad y aplicabilidad del sistema propuesto con biofiltración, es decir se desglosará el beneficio que el sistema brindará a estas comunidades como una alternativa para disponer el agua residual producto de sus actividades diarias permitiendo el reúso de agua.

### **Planteamiento del problema**

Las zonas rurales del país son poblaciones vulnerables que no tienen la misma atención por parte de las entidades estatales en comparación a las zonas urbanas. inversión social casi nula, servicios básicos deficientes o inexistentes y la precaria infraestructura de acueducto y alcantarillado, han originado problemas de sanidad y contaminación. Las viviendas unifamiliares rurales no cuentan con un sistema de acueducto y alcantarillado que permita la correcta disposición de las aguas residuales generadas en sus actividades diarias (MAVDT, 2004).

La falta de recursos e inversión para el tratamiento de agua residual que presentan estas áreas no permite la construcción e implementación de un sistema convencional de tratamiento ya que estos presentan un elevado costo de construcción, operación y mantenimiento, esto sumado a que la mayoría de las viviendas están muy alejadas una de las otras, dificultarían la operación de estas plantas.

La disposición sin tratamiento previo de estas aguas deteriora la calidad de la fuente receptora, contaminando y afectando el suelo y el recurso hídrico generando problemas de salubridad y de contaminación ambiental (Castiblanco, 2017). Como medida sostenible para el tratamiento de agua residual en viviendas unifamiliares ubicadas en áreas rurales, un sistema combinado de biotratamiento se convierte en un recurso factible y una solución práctica y real para el territorio colombiano usado en la depuración de contaminantes, evaluando las condiciones necesarias para su aplicación.

## Justificación

En la actualidad el estado ha buscado aumentar la cobertura en servicios de acueducto, alcantarillado y saneamiento básico, pero a pesar de estos esfuerzos muchas comunidades siguen sin contar con estos servicios y no se vislumbra una solución a corto y mediano plazo (DANE, 2016). Por lo tanto, las aguas residuales que se generan en estas comunidades no son dispuestas en una red de alcantarillado que las conduzca a una planta de tratamiento de aguas residuales y, por ende, carecen del tratamiento adecuado. La construcción e implementación de un sistema convencional de tratamiento para estas aguas es un desafío enorme para estas comunidades, debido a esto es de vital importancia la búsqueda de sistemas que se adapten al contexto socioeconómico de estas poblaciones.

Gran parte de los sistemas de tratamiento de aguas residuales domésticas para sistemas unifamiliares de tipo convencional están cimentados en fosas o tanques sépticos, el costo de instalación es elevado ya que se realiza con materiales tradicionales “arena, cemento y triturado” “estos sistemas generan impactos como malos olores, acumulación de gases desborde en casos de inundaciones, proliferación de vectores y no se logra una completa mineralización de la materia orgánica, a esto se le suma un costo adicional a causa de su mantenimiento ya que se necesita una empresa especializada. El efluente de estos sistemas contiene concentraciones considerables de materia orgánica, por lo que es necesario complementar el tratamiento; es decir, sólo funcionan como un pretratamiento (Crites y Tchobanoglous, 2004).

Por lo anteriormente expuesto, en el presente estudio se pretende realizar una comparación entre dos sistemas de tratamiento uno alternativo y otro tradicional “ptar” ya que este sistema cuenta con un proceso establecido y funcional que cumple con los parámetros exigidos por la normatividad colombiana para el tratamiento de aguas residuales y así concluir

cuál de los dos sistemas se ajusta a las condiciones y criterios que se buscan; bajo costo, mínima operación y mantenimiento a un nivel unifamiliar o para un grupo mínimo de viviendas, garantizando calidad del efluente que permita la reutilización de las aguas residuales tratadas en el riego de cultivos o en otros usos similares.

## **Objetivo general**

Realizar un estudio comparativo entre un sistema combinado de biofiltración y un sistema del tipo tradicional como alternativa al tratamiento de aguas residuales para viviendas rurales en Colombia.

### **3.1. Objetivos específicos**

- ✓ Comparar un sistema combinado de biofiltración y un sistema tradicional usado en el tratamiento de aguas residuales.
- ✓ Proponer una alternativa sostenible para el tratamiento de aguas residuales en áreas rurales del país.
- ✓ Analizar los impactos y beneficios que tendrá el biofiltro combinado en el proceso de depuración de agua residual en el territorio rural colombiano.

## Marco teórico

El tratamiento de las aguas residuales consiste en la aplicación de unas operaciones básicas (físicas, químicas o biológicas) cuya elección y secuencia vienen definidas por el tipo de proceso que las produce. Para el tratamiento de estas aguas se han desarrollado una serie de procesos convencionales, con un alto costo de implementación, operación y mantenimiento, por esto en los últimos tiempos han surgido tratamientos alternativos de fácil aplicación como lo es la biofiltración combinada. Sistema fácilmente aplicable a poblaciones alejadas y de condiciones difíciles para la implementación de los sistemas convencionales.

Un sistema de biofiltración combinado está caracterizado principalmente porque en este la depuración se realiza mediante la acción conjunta del suelo, los microorganismos y las plantas por medio de una triple acción: física (filtración), química (intercambio iónico, precipitaciones, fenómenos de óxido-reducción) y biológica (degradación de la materia orgánica) (Merino, 2003).

Estos sistemas también son llamados “sistemas naturales” los cuales basan su tratamiento en elementos principalmente proporcionados por componentes del medio natural, en los cuales el efecto depurador se debe a la acción de la vegetación, suelo y/o de los microorganismos (terrestres y/o acuáticos). Estos sistemas se dividen en dos grandes grupos: los sistemas de tratamiento mediante la aplicación en el terreno y los sistemas acuáticos.

Con el uso de estos sistemas se logran altos niveles de remoción sin necesidad del uso de mano de obra muy especializada y requieren de muy poco mantenimiento (Crites y Tchobanoglous, 2004). Entre los sistemas de tratamiento naturales para aguas residuales se pueden resaltar los sistemas de tratamiento en el suelo, sistemas de tratamiento con lagunas y filtros intermitentes y con recirculación.

## **Marco conceptual**

### ***4.1.1. Agua Residual***

Es aquella que contiene material disuelto y en suspensión, luego de ser usada por una comunidad o industria, generalmente conducidas por sistemas de alcantarillado y tratadas en una planta de tratamiento de aguas para su depuración antes de su vertido (PTAR) como medio para evitar un problema de salud pública, del medio ambiente o de bienestar social (RAS, 2000).

### ***4.1.2. Biofiltración***

Degradación biológica de componentes presentes en la fase gaseosa de una corriente residual.

### ***4.1.3. Humedales Artificiales***

Construcciones hechas por el hombre que buscan simular un humedal natural que permanece parcial o permanentemente inundado (Álvarez, 2002).

### ***4.1.4. Lagunaje***

Son un medio artificial en el que el agua residual a tratar pasa por un conjunto de balsas dispuestas en serie bajo condiciones anaerobias y aerobias (Álvarez, 2002).

### ***4.1.5. Área Rural***

Se caracterizan por la disposición dispersa de viviendas realización de actividades del campo (agricultura, ganadería, porcicultura, etc.) que no dispone, por lo general, de servicios públicos y otro tipo de facilidades propias de las áreas urbanas (DNP, 2016).

### ***4.1.6. Microorganismo***

Organismo biológico o ser vivo que no puede ser visto por el ojo humano.

#### **4.1.7. Filtración**

Proceso físico de separación de dos fases (sólido y líquido) presentes en una sustancia.

#### **4.1.8. Plantas acuáticas en el tratamiento de aguas residuales**

Los sistemas de plantas acuáticas se ubican en los estanques poco profundos como plantas acuáticas flotantes o sumergidas. Los sistemas más completamente estudiados son aquellos que usan la lenteja de agua. Estos sistemas incluyen dos tipos los cuales se basan en los tipos de plantas dominantes (Delgadillo, 2010):

- Plantas flotantes.
- Plantas sumergidas.

#### **4.1.9. Sistema de biofiltración sobre cama de material orgánico para el tratamiento de aguas residuales**

Este sistema para el tratamiento de efluentes líquidos industriales o domésticos es una tecnología de reciente aplicación que está adaptada a partir de los filtros percoladores, pero con la diferencia que son empacados con algún medio orgánico (trozos de madera, bambú, paja turba).

Consiste en un tratamiento combinado biológico y físico a la vez en el cual, de forma general, el efluente escurre a través de una cama de material poroso orgánico de forma lenta, lo que permite la colonización del cama o empaque por microorganismos adaptados a los contaminantes presentes en el agua residual, así como la retención física de los mismos (Garzón y Zúñiga, 2002).

#### ***4.1.10. Sistemas de tratamiento por aplicación del suelo***

Estos sistemas se basan en el empleo del suelo como elemento depurador a través de infiltraciones, el agua residual percola vertical y lateralmente a través del suelo, que puede recuperar sus condiciones aerobias gracias a los procedimientos cíclicos de aplicación. La cubierta vegetal juega un importante papel en el proceso de tratamiento (ALA 2008). Este tipo de tratamiento está compuesto por tres procesos:

- Tasa baja.
- Infiltración rápida.
- Flujo superficial.

#### ***4.1.11. Filtros biológicos intermitentes y con recirculación***

Estos filtros son unidades de tratamiento físico y biológico que consisten en un lecho formado por un medio sumamente permeable en el que se adhieren desarrollan los microorganismos y a través del cual se filtra el agua residual. Entre los filtros empleados en el tratamiento de aguas residuales están los siguientes:

- Filtros percoladores convencionales de alta tasa (Crites y Tchobanoglous, 2004).
- Filtros de alta tasa con medio granular y poroso, usados en la filtración de efluentes tratados (Crites y Tchobanoglous, 2004).
- Filtros de tasa baja con medio granular y poroso, son los que se utilizan en el tratamiento de aguas residuales provenientes de viviendas aisladas y de pequeños sistemas descentralizados de tratamiento (Crites y Tchobanoglous, 2004).

#### **4.1.12. Biofiltros**

Estos dispositivos son utilizados para la remoción de contaminantes en el agua. Su uso contribuye a evitar la contaminación de cuerpos de agua superficiales y subterráneos, causada por verter directamente el agua residual. A nivel doméstico se utilizan comúnmente para el tratamiento de aguas residuales, particularmente de aguas grises (provenientes de la cocina, lavadero y baño). Se le conoce también como “biojardinería” o “lavadero ecológico”. Este tratamiento se lleva a cabo mediante microorganismos que degradan biológicamente los contaminantes.

#### **4.1.13. Sistemas de tratamiento con humedales artificiales**

Es una de las técnicas de bajo costo en el campo del tratamiento de aguas residuales a la que se le ha encontrado mayor aplicación. Estas no son más que cuerpos de agua creados artificialmente, diseñados para el tratamiento de aguas residuales mediante la acción de macrófitas enraizadas sobre un lecho fijo de grava impermeabilizado, con la intervención de otros procesos y factores naturales que facilitan los procesos llevados a cabo dentro de estas. La acción de las macrófitas hace posible una serie de complejas interacciones físicas, químicas y biológicas a través de las cuales el agua residual afluyente es depurada progresiva y lentamente (Delgadillo, 2010). Son el método más simple de tratamiento de aguas residuales que existe. Están constituidos por excavaciones poco profundas cercadas por taludes de tierra. Generalmente tiene forma rectangular o cuadrada (Durán y Luna, 1998).

Los humedales suelen clasificarse en estos 3 tipos:

- Sistemas de tratamiento basados en macrófitas de hojas flotantes.
- Sistemas de tratamiento basados en macrófitas sumergidas.
- Sistemas de tratamiento basados en macrófitas enraizadas emergentes.

## **Metodología**

### **Tipo de estudio**

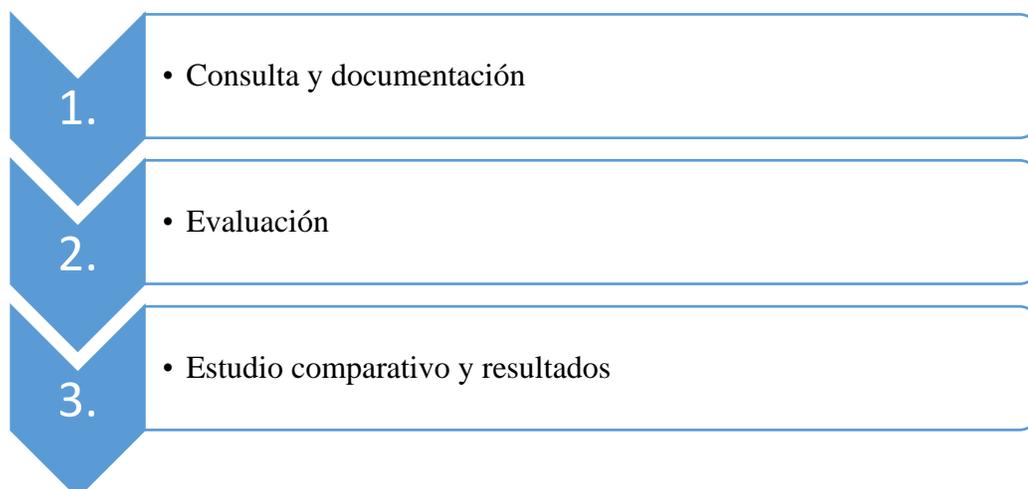
El documento basa su desarrollo en la investigación documental del funcionamiento de un sistema combinado para el tratamiento de aguas residuales, las prioridades de las zonas rurales en el país para tratar el agua residual, el análisis de las condiciones de un rendimiento óptimo para una posible implementación de este sistema sostenible.

### **Fuentes de información**

Revisión e indagación bibliográfica detallada de manuales, artículos científicos, libros, tesis, entre otros; complementada por información sobre las características de las regiones rurales de Colombia mediante base de datos de organismos estatales y privados.

### **Diseño metodológico**

De acuerdo con lo que se requería lograr en este estudio se propusieron tres fases que permitieran identificar el sistema adecuado de tratamiento combinado como posible alternativa al tratamiento de agua residual en zonas rurales. La *ilustración 1* describe el proceso desarrollado en cada una de las fases:



*Ilustración 1. Fases del proyecto*

### **5.3.1. Fase de consulta y documentación**

Periodo en el que se adquirió la información que permitió entender el procedimiento y funcionamiento del sistema como alternativa sostenible para la depuración de agua residual en áreas rurales.

### **5.3.2. Fase de evaluación**

Evaluación y diagnóstico comparativo de las condiciones del sistema tradicional y de las del sistema propuesto, que permitieron estructurar las características del sistema más eficaz en el tratamiento de aguas residuales para viviendas rurales.

### **5.3.3. Fase de proyección**

Por último, se desarrolló una documentación detallada de los procesos sometidos a estudio, se compararon, y se concluyó cual fue el sistema que mejor se adaptó a las condiciones del área rural colombiana para el tratamiento de agua residual como mecanismo sostenible. Dentro de los parámetros fisicoquímicos más relevantes para caracterizar el agua residual producto de los sistemas a comparar se destacan color, olor, temperatura, pH, materia orgánica,

grasas, aceite, demanda bioquímica de oxígeno (DBO), demanda química de oxígeno (DQO) y detergentes.

En Colombia, la resolución 635 de 2015 del Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible es el instrumento legal aplicable a la siguiente investigación, que corresponde al libro VI Anexo 1. En la *tabla 1* Se detallan los límites máximos permisibles establecidos para las descargas líquidas a un cuerpo de agua dulce.

Parámetros	Expresado como	Unidad	Límite máximo permisible
Potencial de Hidrogeno	pH	-	5-9
Temperatura	°C	-	<35
Sólidos suspendidos totales	-	mg/l	100
Sólidos totales	-	mg/l	1600
Demanda química de oxígeno	D.Q. O	mg/l	250
Demanda química de oxígeno (5 días)	D.B. O <sub>5</sub>	mg/l	100
Hierro total	Fe	mg/l	10
Coliformes fecales	NMP/100 ml	-	Remoción > al 99,9 %
Aceites y grasas	Sustancias solubles en Hexano	mg/l	0,3

*Tabla 1 Límites de descarga a un cuerpo de agua dulce Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Sostenible, 2004.*

## Resultados

A continuación, se describe los sistemas propuestos, se analizaron los resultados y se cotejaron las razones por las cuales se propuso este sistema como medida sostenible para el tratamiento de agua residual en viviendas unifamiliares ubicadas en áreas rurales. El sistema consta de un biofiltro combinado con un sistema de lagunaje tradicional, sistema que va a ser comparado con un sistema tradicional de tratamiento de aguas residuales. Los elementos que componen estos sistemas sometidos a comparación se van a pormenorizar y especificar en tres (3) fases para poder cumplir los objetivos propuestos en este estudio.

### Fase 1: Descripción de los sistemas sometidos a estudio

#### 6.1.1. Sistema convencional de tratamiento de aguas residuales domesticas

El sistema convencional que se va a analizar en este estudio es el usado en la mayoría de las plantas de tratamiento de aguas residuales designado normalmente como de tratamiento primario, secundario, o avanzado según el grado de purificación.

Su diseño está basado en la calidad con la que se desea entregar el agua al cuerpo receptor, por tanto, se apoya en un tratamiento por etapas (físicas, químicas y biológicas) caracterizadas por retener o eliminar las partículas, contaminantes y sustancias química y orgánicas presentes en el agua a tratar.



Ilustración 2. Etapas del tratamiento de aguas residuales convencional. Fuente: Autor.

- **Pretratamiento:** El agua es conducida por la red de alcantarillado hasta la estación de tratamiento.
- **Tratamiento primario:** Se utilizan métodos físicos para reducir la materia orgánica.
- **Tratamiento secundario:** Se aprovecha la capacidad de los microorganismos para que los residuos orgánicos se estabilicen en compuestos de baja energía.
- **Tratamiento terciario:** Se eliminan los nutrientes y la materia orgánica no biodegradable mediante métodos físicos, químicos y/o biológicos para tratar contaminantes específicos.

### ***6.1.2. Sistema combinado propuesto***

Este sistema es una combinación entre un biofiltro a base de carbón activado obtenido de las fibras de coco y un sistema de humedal artificial con flujo superficial.

#### **6.1.2.1. Biofiltro.**

En este proceso, mediante el uso de materiales de filtración biológicos o derivados de materia biodegradable, se realizará la depuración de aguas residuales provenientes de diferentes actividades domésticas. Así mismo, este proceso se puede desarrollar mediante los siguientes mecanismos:

##### ***6.1.2.1.1. Por gravedad O presión.***

Este proceso se lleva a cabo por efectos de la gravedad. Son filtros contenidos en recipientes y en los cuales el agua fluye forzada por efectos de presión a través del medio filtrante.

#### **6.1.2.1.2. De torta o en profundidad.**

Se desarrolla una torta filtrante en la cual la filtración se lleva a cabo por mecanismos físicos y biológicos. La eficiencia y calidad del filtro mejora con la profundidad.

#### **6.1.2.2. Mecanismos de filtración presentes en el biofiltro.**

Por el tamaño de las partículas en suspensión presentes en el agua tratada, diámetro desde 1 mm hasta inferiores a 10<sup>-3</sup> mm, el mecanismo de filtración se produce mediante dos etapas diferentes pero que se complementan:

- **Transporte:** Se genera por parámetros de transferencia de masa, es un fenómeno superficial en el que intervienen fenómenos físicos y químicos. Su ocurrencia es posible gracias a los siguientes mecanismos: cernido, sedimentación, intercepción, difusión, impacto inercial y acción hidrodinámica
- **Adherencia:** Es un mecanismo puramente físico. Su ocurrencia es posible gracias a los siguientes mecanismos: fuerzas de Van der Waals, fuerzas electroquímicas y puente químico.

#### **6.1.2.3. Parámetros del biofiltro.**

Está compuesto por materiales de origen biodegradable o de origen biológico 0.15m y 0.5 m. Los medios filtrantes de soporte pétreo tendrán un espesor entre 0.15 y 0.2 m.

##### **6.1.2.3.1. Primera Capa.**

Debe estar compuesta por materiales que permitan el flujo uniforme del efluente. En este caso fibras vegetales de coco.

- **Fibra de coco:** Es un producto 100% natural y orgánico, con bajo impacto ambiental, más ligero que otros materiales de origen natural y renovable, se obtiene de los residuos del fruto del cocotero.
- **Propiedades de la fibra de coco:** El coco se compone de tres capas de material fibroso la primera es el mesocarpio, seguida por el endocarpio y finalmente el endospermo. La fibra que se va a analizar en este estudio se obtiene de la corteza del coco.

La fibra de coco se extrae del mesocarpio, el cual está constituido de un 90% de fibras, compuestas principalmente por lignina y celulosa. Las fibras miden entre 15 y 30 cm (Reyes, 2016). En la *tabla 2* Se detallan las propiedades físicas y mecánicas de la fibra de coco:

Fibra	Densidad (g/cm <sup>3</sup> )	Resistencia a la tracción (g/cm <sup>3</sup> )	Módulo de elasticidad (Gpa)	Elongación a la ruptura (%)	Absorción de humedad (%)	Diámetro promedio (um)	Absorción de agua (%)	Contenido de carbón (%)	Contenido de humedad (%)
Coco	1,29	175-220	4-6	15-30	10	397	169	51,5	27,1

*Tabla 2 .Propiedades físicas y mecánicas de la fibra de coco. Fuente: autor.*

Capacidad	Fibra de coco
Absorción de agua (g de agua/g de muestra seca)	7,16
Retención de agua (3,86 ml de agua/muestra seca)	3,86
Absorción de aceite (g aceite/g muestra seca)	4,9

*Tabla 3 Propiedades funcionales de la fibra de coco. Fuente: Rincón, 2016.*

#### 6.1.2.3.2. Segunda capa

Es la capa principal de filtración. Se llevan a cabo procesos fisicoquímicos que derivan en la filtración de los contaminantes. Para este estudio se va a usar carbón activado obtenido de las fibras de coco.

#### Carbón activado de coco

Se fabrica carbonizando la fibra de coco y activándola a una temperatura de 280 °C en presencia de vapor de agua. El carbón activado obtenido de la fibra de coco presenta una amplia distribución de los poros, dureza, resistencia y un mayor porcentaje de cenizas que la mayoría de las fibras vegetales. Este material tiene la capacidad de absorber gran cantidad de los contaminantes presentes en las aguas residuales como el cloro, pesticidas, herbicidas, nitratos y sulfuros.

#### 6.1.2.3.3. Tercera y cuarta capa

Se constituyen de material pétreo, su función principal es servir de soporte a las capas anteriores y auxiliar de depuración. Arena, grava y gravilla fueron los materiales elegidos para este caso.

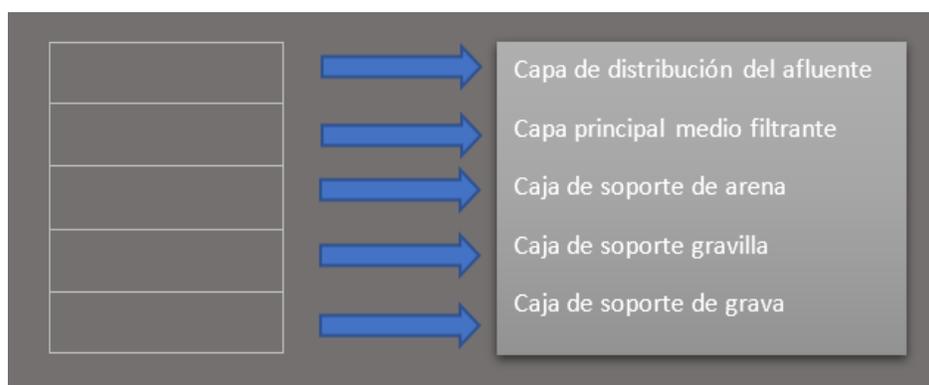
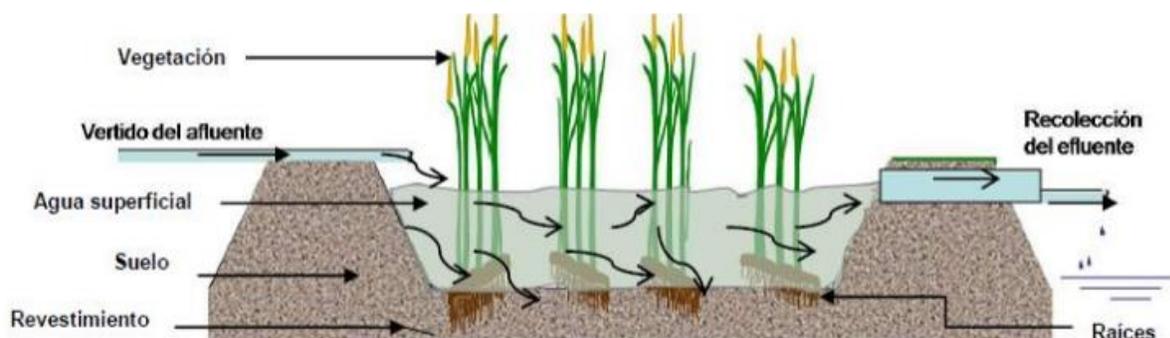


Ilustración 3 Distribución y composición de las capas en el Biofiltro. Fuente: Autor.

#### 6.1.2.4. Sistema de humedal artificial con flujo superficial.

En este tipo de humedales el agua fluye sobre la superficie del sustrato desde la entrada hasta la salida del flujo de agua, y la vegetación se desarrolla en condiciones de inundación total o parcial (véase *ilustración 4*). Es el tipo de humedal de tratamiento que más se asemeja a un humedal natural, con profundidades de agua inferiores a los 60 cm (generalmente en el rango de los 30 a 50 cm) (Blázquez, 2016).



*Ilustración 4. Humedales artificiales de flujo superficial HAA FS. Fuente: Blázquez, 2016.*

La alimentación es de forma continua y la depuración se da en el tránsito del agua a través de los tallos y raíces de la vegetación implantada. Este sistema se usa para efluentes que ya han recibido un tratamiento previo.

El flujo superficial del agua permite un mayor intercambio con la atmósfera y el desarrollo de procesos de carácter aeróbico. Además, el humedal está más expuesto a las condiciones meteorológicas, por lo que la precipitación y la evapotranspiración alteran el régimen de caudales y la propia superficie inundada por el humedal, que puede llegar a ser muy fluctuante y estacional (Blázquez, 2016).

## Fase 2: Diseño del sistema combinado propuesto



### 6.2.1. Diseño Biofiltro

El diseño del Biofiltro se realizó en dos partes, la primera consta de la identificación de los materiales necesarios para su elaboración y la segunda las instrucciones de ensamble de este.

A continuación, se detallan cada una de las partes.

#### Materiales:

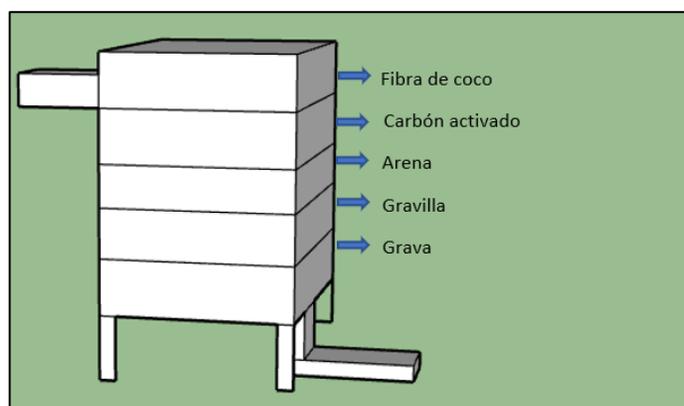
Estructura metálica en acero inoxidable de 1,2 metros de altura y 0.7 m2 de base.	250.000
Recipiente contenedor de agua de 40 litros.	50.000
80 cm de tubo PVC de ½.	10.000
Un codo de ½.	1.000
2 acoples de ½.	2.300
Fibras vegetales de coco.	40.000
Carbón activado de fibras de coco.	500.000
Arena.	15.000
Gravilla	14.000
Grava	15.000

Subtotal	918.000
A.I.U 5%	<b>963.900</b>

*Materiales y costos aproximados. Fuente: revista construdata.*

### **Ensamble:**

Se debe retirar o cortar la parte superior del recipiente para facilitar el ingreso y acomodamiento de las capas de material, para el filtro se realiza la conexión desde el ducto de salida de aguas residuales al recipiente contenedor realizando una perforación de entrada de 1,27 cm de diámetro se instala el acople al ducto de salida y se une con 45 cm de tubo de PVC que van a la entrada del recipiente y se realiza un orificio de salida de 1,27 cm de diámetro en el fondo del recipiente, en el punto medio de este se pone un acople al orificio de salida, se une con el codo y 35 cm de tubo de PVC. Se pone una capa de 20 cm de grava en el fondo después una capa de gravilla de 20 cm y una capa de material de arena fina de 20 cm. Posterior se coloca una capa de carbón activado de 20 cm y por último se pone una capa de 20 cm de fibra de coco.



*Ilustración 5 Biofiltro propuesto. Fuente: Autor.*

### 6.2.2. *Diseño del sistema de lagunaje propuesto*

El sistema que se propuso es el de macrófitas emergentes de flujo superficial. Las macrófitas no sólo juegan un importante papel en la eliminación de nutrientes por sí mismas, sino que además constituyen el principal soporte para las comunidades microbianas y crean un ambiente favorable para la eliminación de contaminantes (Kadlec y Wallace, 2009).

La macrófita emergente que se usará será el junco de agua o lentejas de agua. Este sistema se complementa perfectamente con el Biofiltro propuesto, elimina la materia orgánica que pueda quedar en el efluente por medio de procesos de degradación biológica. Elimina el fosforo, nitrógeno, metales y patógenos mediante procesos bacterianos, asimilación y filtración vegetal.

A continuación, se describe los materiales del sistema de lagunaje propuesto:

- Juncos de agua o lentejas de agua.
- Pala.
- 50 cm de tubo PVC de ½.

#### **Fase 3: Sistema combinado propuesto**



*Ilustración 6. Biofiltro propuesto. Fuente: Autor.*

Se realizó el montaje con la finalidad de verificar el tiempo y complejidad de instalación, funcionalidad y posibles mantenimientos a realizar. Este diseño se caracteriza por su sencillez y su no dependencia de tratamientos previos, así como la no necesidad de adicionar nutrientes, coagulantes, floculantes u otro aditivo. Solo requiere que el efluente llegue con características tales que permita la existencia de organismos vivos, entre ellos pH no inferiores a 4,5 y no mayor a 8 (Thalosso y Olmedo, 2002).

El efluente que se va a tratar se hace pasar por el medio filtrante reteniéndose los contaminantes mediante tres mecanismos principales: Filtración pasiva, Adsorción y Absorción, e Intercambio iónico. Los parámetros retenidos son biodegradados por la biocenosis que se instala en el filtro. Este es una combinación de un sistema cerrado y abierto, con múltiples lechos de soporte teniendo cada uno una altura de entre 0.15 y 0,5 m. En la *tabla 4* Se muestra la producción de agua residual aproximada en un hogar compuesto por 5 personas en el área rural Colombiana por día.

Uso	Consumo propio	Ducha	Sanitario	Lavamanos	Lavaplatos	Lavado ropa	Aseo vivienda	Total (5 personas)
Cantidad (L)	4	21	20	4	16	26	5	86*5=430

*Tabla 4 Producción de agua residual aproximada en un hogar compuesto por 5 personas en el área rural colombiana. Fuente: Autor*

### **Evaluación de parámetros del sistema propuesto**

Debido a la emergencia sanitaria por la cual atraviesa el país y teniendo en cuenta las medidas de prevención adoptadas por el gobierno no fue posible realizar las pruebas de laboratorio dentro de las instalaciones de la universidad por tal razón se tomaron de estudios

realizados. De acuerdo con la literatura encontrada, en la Tabla 5 se reporta un análisis de laboratorio encontrado en la literatura donde nos permite evidenciar la evaluación de cada parámetro en el afluente y efluente del biofiltro así como evaluar la eficiencia del biofiltro y su cumplimiento o no comparado con los límites máximos permisibles del decreto 631 de 2015 del Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible.

Parámetro	Unidad	Afluente	Efluente del Biofiltro	Eficiencia del Biofiltro
Temperatura	°C	27	26	Cumple
pH	pH	6,2	6,9	Cumple
Sólidos suspendidos totales	mg/l	223	40	80,06%
Sólidos totales	mg/l	757	603	98,34%
Coliformes fecales	NMP/100 ml	1,00E+07	1,10E+05	99,90%
Aceites y grasas	mg/l	50	0,3	99,40%
DBO	mg/l	583	174	70,15%
DQO	mg/l	200	23	88,50%
Hierro	mg/l	160	0,19	99,80%

*Tabla 5 Detalle de caracterización del afluente y efluente del Biofiltro experimental. Fuente: Reyes, 2016.*

Aunque el Biofiltro propuesto cumple con la normativa vigente (*Tabla 5*), para aumentar la efectividad de remoción de contaminantes, este se combina con el sistema de humedales artificiales propuesto lo que permitirá elevar el porcentaje de eficiencia de remoción de contaminantes.

### Comparativo por parámetros del sistema propuesto frente al sistema convencional

En la tabla 6 se comparan los resultados del Biofiltro propuesto con fibras de coco y los de una planta de tratamiento de aguas residuales tradicional.

Parámetro	Unidad	Eficiencia de la planta de tratamiento convencional	Eficiencia del Biofiltro Propuesto	Observaciones
Temperatura	°C	Cumple	Cumple	Los dos sistemas cumplen la normativa legal vigente aplicable
pH	pH	Cumple	Cumple	Los dos sistemas cumplen la normativa legal vigente aplicable
Sólidos suspendidos totales	mg/l	90,03%	80,06%	El sistema convencional tiene un mayor porcentaje de remoción que el sistema propuesto.
Sólidos totales	mg/l	99,9%	98,34%	Los niveles de eficiencia en ambos sistemas son altos.
Coliformes fecales	NMP/100 ml	99,92%	99,90%	Los dos sistemas reportan un alto porcentaje de efectividad en la remoción de estos agentes patógenos.
Aceites y grasas	mg/l	99,60%	99,40%	Ambos sistemas tienen gran efectividad en la remoción de estos.
DBO	mg/l	80,25%	70,15%	Los niveles de eficiencia en ambos sistemas son altos
DQO	mg/l	89,40%	88,50%	Los niveles de eficiencia en ambos sistemas son altos
Hierro	mg/l	99,10%	99,80%	Los niveles de eficiencia en ambos sistemas son altos

Tabla 6 Comparación de los dos sistemas propuestos en el estudio. Fuente: Autor.

De manera general el sistema convencional reporta un mayor porcentaje de efectividad en la remoción de contaminantes, sin embargo, los resultados no difieren demasiado del sistema propuesto, lo que hace a este último una alternativa confiable y aplicable.

### Ventajas, consideraciones y aplicabilidad del sistema propuesto

La implementación de este sistema no requiere de una gran inversión por su simplicidad operativa y de mantenimiento lo cual lo convierten en una alternativa viable para el tratamiento de las aguas residuales generadas por los hogares ubicados en el área rural del país.

En la *tabla 7* se muestran las ventajas comparativas del sistema combinado propuesto con el sistema convencional.

Sistema propuesto	Sistema convencional
La inversión inicial que necesita este sistema puede llegar a ser inferior al 75% de un sistema convencional.	Inversión inicial en función de la demanda o a escala.
Mantenimiento muy básico < 20%	Mantenimiento con elevados costos y especializado
Consumo energético muy escaso o nulo <90%	Gastos energéticos elevados
Impacto paisajista positivo	Impacto paisajista negativo
Nula proliferación de olores e insectos	Generación de olores ofensivos
Producción escasa o nula de lodos	Se deben gestionar los lodos producidos

*Tabla 7 Ventajas comparativas del sistema combinado propuesto con el sistema convencional. Fuente: Autor.*

De los resultados obtenidos en estudios experimentales analizados, el sistema propuesto se constituye en una tecnología sostenible, segura, simple, eficaz y adaptable a la problemática de las regiones aisladas del país. Igualmente, el sistema es netamente natural y no necesita adición de productos químicos o tratados de manera habitual y constante, produciendo muy pocos lodos. Todo esto hace de la gestión un proceso de costos mínimos.

La combinación de procesos de eliminación de contaminantes del sistema deriva en un efluente de calidad que permitiría contemplar su reúso en el riego, lavado, agricultura y recarga

de mantos freáticos. Estas aguas tratadas igualmente se pueden descargar en fuentes hídricas sin afectar la calidad del agua del cuerpo receptor.

En el contexto de desarrollo sustentable que se viene imponiendo en el mundo, la adaptación de esta tecnología en el país sería oportuna. Su simplicidad, utilización de materiales de fácil adquisición y autosustentables la convierten en una vitrina de demostración tecnológica.

## **Conclusiones**

El análisis efectuado a las alternativas sometidas a estudio permitió evidenciar que el sistema combinado propuesto se convierte en una alternativa viable y real al tratamiento de aguas residuales en el área rural colombiana.

La puesta en marcha y aplicación de esta propuesta combinada, de forma adecuada, generará no solo un beneficio económico sino también un gran beneficio para el ecosistema y un aporte de gran valía para el desarrollo sostenible de la población rural colombiana.

El mantenimiento del sistema propuesto combinado es muy mínimo, reduciéndose a comprobaciones periódicas de los componentes. Al aprovechar la fuerza de gravedad se evita la colocación de bombas. La parte final del sistema (humedal), con agua ya depurada, evita la generación de olores y la proliferación de insectos.

## **Recomendaciones**

En las áreas rurales de Colombia, la población al no contar con un sistema para el tratamiento de aguas residuales realiza una descarga de estas a pozos sépticos, el suelo o fuentes hídricas. Este sistema brindará a estas comunidades una opción práctica para disponer este tipo de aguas y permitirá el reúso de estas en el riego de cultivos, principal actividad económica de estas comunidades.

El uso de esta tecnología amigable con el medio ambiente promueve prácticas eco-sustentables. Hoy en día, se debe promover el uso de tecnologías que no afecten el medio ambiente, si no por el contrario ayuden a mitigar los impactos ocasionados por el desarrollo.

## Bibliografía

- Alianza por el agua. (2008). manual de depuración de aguas residuales urbanas. s.n. isbn 8497171721. [disponible en: http://alianzaporelagua.org/documentos/monografico3.pdf](http://alianzaporelagua.org/documentos/monografico3.pdf).
- Álvarez, F. (2002). filtros verdes. un sistema de depuración ecológico. ingeniería hidráulica y ambiental, vol. XXIII, no. 1, pp. 25-29.
- Blázquez, J. (2016). análisis de los modelos de diseño de los sistemas naturales de depuración. trabajo fin de master. universidad de alicante. disponible en: <https://iuaca.ua.es/es/master-agua/documentos/-gestadm/trabajos-fin-de-master/tfm10/tfm10-jorge-rabat-blazquez.pdf>
- Castiblanco, M. (2017). diseño del sistema de tratamiento de aguas residuales domesticas para el sector el palmar municipio de Flandes – Tolima. proyecto de grado, universidad minuto de dios, facultad de ingeniería civil. recuperado de: <https://repository.uniminuto.edu/bitstream/handle/10656/6691/t.ic%20castiblanco%20poveda%20maria%20camila.pdf?sequence=1&isallowed=y>
- Conagua (2005). inventario nacional de plantas municipales de potabilización y de tratamiento de aguas residuales en operación. pub. comisión nacional del agua, México D.F, México.
- Crites, R.W.; Tchobanoglous, G. (2004). tratamiento de aguas residuales en pequeñas poblaciones. Ed MC Graw Hill, 1ª edición.
- Delgadillo, O., Camacho, A., Pérez, L., y Andrade, M. (2010). depuración de aguas residuales por medio de humedales artificiales. centro andino para la gestión y uso del agua (centro agua). Cochabamba, Bolivia. disponible en: <https://core.ac.uk/download/pdf/48017573.pdf>
- Departamento nacional de planeación. (2016). construcción de unidades sanitarias para vivienda rural dispersa. proyectos tipo. soluciones ágiles para un nuevo país. vol. 1.0, pp. 43.

disponible en:

<https://proyectostipo.dnp.gov.co/images/pdf/unidadesanitarias/ptunidadesanitarias.pdf>.

Dof (1995). nom-004-recnat-1996, que establece los procedimientos, criterios y especificaciones para realizar el aprovechamiento, transporte y almacenamiento de raíces y rizomas de vegetación forestal. diario oficial de la federación. agosto 8. México D.F., México.

Dof (1996). nom-005-recnat-1997, que establece los procedimientos, criterios y especificaciones para realizar el aprovechamiento, transporte y almacenamiento de corteza, tallos y plantas completas de vegetación forestal. diario oficial de la federación. diciembre 13. México D.F., México.

Durán-Domínguez, C., Luna-Pabello, V. M. (1998). humedales artificiales de flujo horizontal o vertical, procedimiento para tratar aguas residuales. patente núm. 9810668. solicitud de registro: noviembre 26, 1998. instituto mexicano de la propiedad industrial. dirección divisional de patentes. México D.F., México.

J.F. Rincón, J.F. (2016). caracterización fisicoquímica y funcional de la fibra de mesocarpio de coco (cocos nucifera l.). rincón et al. vol.1, N° 2, pp. 279-284. 2016. disponible en:

<http://www.fcb.uanl.mx/idcyta/files/volume1/2/3/49.pdf>

Kadlec, R.H. y Wallace, s. (2009). treatment wetlands, second edition. crc press, taylor & francis group. boca raton, fl.

Koen, B. V. (1985). definition of the engineering method, monograph of the american society for engineering education.

Merino, L.M., Fernández Jurado, M.A., Rubio Campos, J.C., Calaforra Chordi, J.M., López Geta, J.A., Beas Torroba, J., Alcaín Martínez, G., Murillo Díaz, J.M. y Gómez López, J.A. (2003). los métodos naturales de depuración de aguas residuales urbanas. en: L.M. Merino (ed.), la depuración de aguas residuales urbanas de pequeñas poblaciones mediante infiltración directa

en el terreno fundamentos y casos prácticos. pp. 13-27. disponible en:

[http://aguas.igme.es/igme/publica/depuracion\\_aresidual/2.pdf](http://aguas.igme.es/igme/publica/depuracion_aresidual/2.pdf).

Ministerio de ambiente, vivienda y desarrollo sostenible. (2004). plan nacional de manejo de aguas residuales municipales en Colombia. Bogotá, Colombia. disponible en:

[http://www.minvivienda.gov.co/documents/viceministerioagua/plan\\_nacional\\_de\\_manejo\\_de\\_aguas\\_residuales\\_municipales\\_en\\_colombia.pdf](http://www.minvivienda.gov.co/documents/viceministerioagua/plan_nacional_de_manejo_de_aguas_residuales_municipales_en_colombia.pdf)

Ministerio de ambiente, vivienda y desarrollo sostenible. (2004). resolución 631 de 2015. Bogotá, Colombia. disponible en:

[https://docs.supersalud.gov.co/portalweb/juridica/otranormativa/r\\_mads\\_0631\\_2015.pdf](https://docs.supersalud.gov.co/portalweb/juridica/otranormativa/r_mads_0631_2015.pdf)

Pineda, L. (2017). diagnóstico de la planta de tratamiento de agua residual (ptar) de Tunja – Boyacá. universidad católica de Colombia. programa de ingeniería civil. disponible en:

<https://repository.ucatolica.edu.co/bitstream/10983/14554/1/diagnostico%20de%20la%20planta%20de%20tratamiento%20de%20agua%20ptar%20residual%20de%20tunja%20-%20boyac%c3%a1.pdf>

Reyes, J. (2016). determinación de la eficiencia del aserrín y la fibra de coco utilizados como empaques para la remoción de contaminantes en biofiltros para el tratamiento de aguas residuales. *enfoque ute*, 7(3), 41-56. disponible en:

<https://dx.doi.org/10.29019/enfoqueute.v7n3.104>

Thalosso y Olmedo, R. (2002). biofiltración: tratamiento biológico del aire contaminado .disponible en:[https://www.researchgate.net/profile/frederic\\_thalasso/publication/228594656\\_biofiltracin\\_tratamiento\\_biologico\\_de\\_aire\\_contaminado/links/54c79ae60cf22d626a36b3f5.pdf](https://www.researchgate.net/profile/frederic_thalasso/publication/228594656_biofiltracin_tratamiento_biologico_de_aire_contaminado/links/54c79ae60cf22d626a36b3f5.pdf).