



**EFICIENCIA DE LOS HUMEDALES ARTIFICIALES DE FLUJO SUBSUPERFICIAL  
(HAFS) EN LA REMOCIÓN DE CONTAMINANTES MICROBIOLÓGICOS DE AGUAS  
RESIDUALES DOMÉSTICAS: UNA REVISIÓN.**

Karol Melisa Galeano Tellez  
Daniel Felipe Albornoz Ramirez

Universidad El Bosque  
Facultad de Ingeniería  
Programa Ingeniería Ambiental  
Bogotá, 04 de abril de 2019

**EFICIENCIA DE LOS HUMEDALES ARTIFICIALES DE FLUJO SUBSUPERFICIAL  
(HAFS) EN LA REMOCIÓN DE CONTAMINANTES MICROBIOLÓGICOS DE AGUAS  
RESIDUALES DOMÉSTICAS: UNA REVISIÓN.**

Karol Melisa Galeano Tellez  
Daniel Felipe Albornoz Ramirez

Trabajo de investigación presentado como requisito parcial para optar al título de:  
**Ingeniero Ambiental**

Directora:  
Carel Elizabeth Carvajal Arias

Codirector:  
Wilmar Alirio Botello Suárez

Línea de Investigación:  
Salud Ambiental

Universidad El Bosque  
Facultad de Ingeniería  
Programa Ingeniería Ambiental  
Bogotá, Colombia  
2019.

# ACTA DE SUSTENTACIÓN



## SUSTENTACIÓN DE TRABAJO DE GRADO

ACTA No: 1090

El día **28 OCT 2019**, en las instalaciones de la Universidad El Bosque, se desarrolló la sustentación del trabajo de grado titulado **EFICIENCIA DE LOS HUMEDALES ARTIFICIALES DE FLUJO SUBSUPERFICIAL (HAFS) EN LA REMOCIÓN DE CONTAMINANTES MICROBIOLÓGICOS DE AGUAS RESIDUALES DOMÉSTICAS**, escrito por **DANIEL FELIPE ALBORNOZ RAMÍREZ, C.C. 1020830377** y **KAROL MELISA GALEANO TELLEZ, C.C. 1032496073**, bajo la dirección de **CAREL ELIZABETH CARVAJAL ARIAS, C.C. 1032411403** y la codirección de **WILMAR ALIRIO BOTELLO, C.C. 88031185**, como requisito parcial para optar por el título de Ingeniero Ambiental. El trabajo fue evaluado por los jurados **SANDRA CECILIA BAUTISTA RODRÍGUEZ, C.C. 52233309** y **YINA PATRICIA SALAMANCA BLANCO, C.C. 52354819**, quienes deliberaron y concluyeron que cumple con los criterios de calidad, por lo que se determina que el trabajo es **Aprobado**.

En constancia, se firma en Bogotá, D.C.,

**28 OCT 2019**

**KENNETH OCHOA VARGAS**  
Director  
Programa de Ingeniería Ambiental



**GERMÁN AGUDELO ASCENCIO**  
Secretario Académico  
Facultad de Ingeniería



## **Nota de Salvedad de Responsabilidad Institucional**

La Universidad El Bosque, no se hace responsable de los conceptos emitidos por los investigadores en su trabajo, solo velara por el rigor científico, metodológico y ético del mismo en aras de la búsqueda de la verdad y la justicia.

## *Dedicatoria*

*A Dios y a la Virgen de Chiquinquirá por siempre bendecirnos enormemente con salud, fortaleza, entendimiento para desarrollar este trabajo, por ser nuestro apoyo y fuerza para no desfallecer en momentos de dificultad.*

*A nuestros padres por ser nuestro eje fundamental, por brindarnos las herramientas necesarias para poder forjarnos como profesionales, por apoyar nuestros sueños y confiar siempre en nosotros.*

## **Agradecimientos**

A todos nuestros profesores por darnos las bases necesarias para nuestra formación profesional, pero en especial a nuestra directora Carel Elizabeth Carvajal Arias por apoyarnos desde el inicio de esta investigación, por ayudarnos y guiarnos con su experiencia a mejorar nuestra forma de interpretación, de igual manera a nuestro co-director Wilmar Alirio Botello Suarez por su excelente orientación para el mejoramiento continuo de este trabajo.

## Contenido

Listado de Tablas.	8
Listado de Figuras.	8
INTRODUCCIÓN.....	11
JUSTIFICACIÓN.....	13
PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	14
Descripción	14
Formulación	14
Delimitación	14
Pregunta de Investigación	14
OBJETIVOS.....	15
Objetivo general	15
Objetivos específicos	15
MARCOS DE REFERENCIA. ....	16
Antecedentes y Estado del arte.....	16
Marco Teórico .....	19
Marco Conceptual .....	21
Marco Normativo .....	26
Normativa Nacional.	26
Normativa internacional.	28
Marco Institucional y geográfico. ....	29
METODOLOGÍA .....	31
Búsqueda y selección de los estudios	31
Selección de referencias	32
Recopilación de datos	33
Análisis de la información	34
RESULTADOS Y ANÁLISIS.....	38
Mecanismos de remoción de contaminantes microbiológicos	38
Factores que favorecen la remoción de contaminantes microbiológicos	41
Eficiencias de remoción de contaminantes microbiológicos en los HAFS.	50
CONCLUSIONES.....	58
RECOMENDACIONES .....	58
BIBLIOGRAFÍA.....	59

## **Listado de Tablas.**

<i>Tabla 1. Valores máximos permisibles para reúso agrícola.</i>	27
<i>Tabla 2. Valores máximos permisibles para el reúso en áreas verdes.</i>	27
<i>Tabla 3. Valores máximos permisibles para reúso industrial.</i>	28
<i>Tabla 4. Valores máximos permisibles para el reúso de aguas.</i>	28
<i>Tabla 5. Límites máximos permisibles de contaminantes en aguas tratadas según el tipo de reúso.</i>	29
<i>Tabla 6. Consultas realizadas en los motores de búsquedas con descriptores.</i>	32
<i>Tabla 7. Cantidad de documentos encontrados por motores de búsqueda.</i>	32
<i>Tabla 8. Cantidad de documentos para resultados por motor de búsqueda.</i>	33
<i>Tabla 9. Artículos seleccionados por motor de búsqueda.</i>	33
<i>Tabla 10. Registro de referencias.</i>	33
<i>Tabla 11. Registro de la eficiencia.</i>	34
<i>Tabla 12. Matriz de objetivos.</i>	36
<i>Tabla 13. Mecanismos de remoción de patógenos en humedales artificiales.</i>	38
<i>Tabla 14. Efectos de las macrófitas en la remoción de DBO5, DQO y CF.</i>	41
<i>Tabla 15. Eficiencias de la remoción de indicadores microbiológicos de la calidad del agua en los HAFS.</i>	47
<i>Tabla 16. Eficiencias de la remoción de indicadores microbiológicos de la calidad del agua en los HAFS.</i>	48
<i>Tabla 17. Eficiencias de la remoción de indicadores microbiológicos de la calidad del agua en los HAFS.</i>	48
<i>Tabla 18. Eficiencias de remoción de contaminantes microbiológicos.</i>	49
<i>Tabla 19. Eficiencias de remoción de contaminantes microbiológicos.</i>	50
<i>Tabla 20. Comparación de valores máximos permisibles para concentraciones de E. Coli.</i>	51
<i>Tabla 21. Comparación de valores máximos permisibles para concentraciones de Coliformes fecales.</i>	53
<i>Tabla 22. Comparación de valores máximos permisibles para concentraciones de Coliformes Totales.</i>	54

## **Listado de Figuras.**

<i>Figura 1. Tipos de plantas empleadas en humedales artificiales.</i>	21
<i>Figura 2. Humedal artificial de flujo superficial.</i>	22
<i>Figura 3. Humedal artificial de flujo subsuperficial.</i>	23
<i>Figura 4. Composición típica del agua residual doméstica.</i>	24
<i>Figura 5. Fases de resistencia de los parásitos.</i>	24
<i>Figura 6. Ubicación del Centro de Investigación.</i>	30
<i>Figura 7. Evaluación de la calidad de los estudios.</i>	32
<i>Figura 8. Diagrama de fases de la investigación.</i>	34



## RESUMEN

En la última década los Humedales Artificiales de Flujo Subsuperficial han sido una propuesta económica y fácil de implementar para el tratamiento de los distintos tipos de aguas residuales, las cuales sin un óptimo tratamiento se convierten en una problemática relevante de salud pública. El propósito de esta investigación fue establecer la eficiencia de los humedales artificiales de flujo subsuperficial en la remoción de contaminantes microbiológicos en aguas residuales domésticas, mediante la identificación de los principales mecanismos de remoción físicos, químicos y biológicos. Las eficiencias de remoción más altas fueron de *Canna Flaccida* el 90% para DBO<sub>5</sub>, y para DQO el 89% para los coliformes totales y fecales *Phragmites karka* reporto una eficiencia del 99%, en *Escherichia coli* la macrófita más eficiente fue *Phragmites astralis* con 99% de remoción, al igual que para *Enterococcus faecalis*, por último, la eficiencia de *Typha Dominguesnsis* para *Salmonella* fue de 91%. Aunque se tienen estudios sobre reportes de las eficiencias en diferentes combinaciones, no se encuentran revisiones sistemáticas que logren agrupar datos de eliminación de microorganismos patógenos a nivel mundial, en el periodo comprendido entre los años 2010 y 2019.

**Palabras claves:** Humedal artificial, Contaminantes microbiológicos, Aguas residuales, Salud pública, Mecanismos de remoción.

## Abstract

*In the last decade, Artificial Wetlands of Subsurface Flow have been an economic proposal and easy to implement for the treatment of different types of wastewater, which without optimal treatment become a relevant public health problem. The purpose of this research was to establish the efficiency of artificial subsurface flow wetlands in the removal of microbiological contaminants in domestic wastewater, by identifying the main physical, chemical and biological removal mechanisms. The highest removal efficiencies were Canna Flaccida 90% for BOD<sub>5</sub>, and COD 89% for total and fecal coliforms Phragmites karka reported an efficiency of 99%, in Escherichia coli the most efficient macrophyte was Phragmites astralis with 99 % removal, as for Enterococcus faecalis, finally, the efficiency of Typha Dominguesnsis for Salmonella was 91%. Although there are studies on reports of efficiencies in different combinations, there are no systematic reviews that manage to group data on the elimination of pathogenic microorganisms worldwide, in the period between 2010 and 2019.*

## INTRODUCCIÓN

En la actualidad, los humedales artificiales se han convertido en una de las alternativas más atractivas para el tratamiento de Aguas Residuales Domésticas (ARD); en especial en zonas rurales, debido a su bajo costo de operación y mantenimiento, la simplicidad en el diseño y la reducción de impactos ambientales (Caballero & Osorio, 2016). Adicionalmente, en las zonas apartadas que no cuentan con recursos económicos y técnicos para la implementación de sistemas convencionales, tales como las Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales (PTAR), esta tecnología juega un papel fundamental (Granados, 2018).

Los Humedales Artificiales (HA) reproducen los procesos que tienen lugar en un Humedal Natural (HN), depurando el agua residual a través de operaciones físicas, químicas y biológicas producto de la interacción que existe entre el agua, la matriz suelo, las plantas, los microorganismos e incluso las esferas ambientales. Esto posibilita la generación de procesos tales como la sedimentación, filtración, adsorción y degradación biológica de la materia orgánica contenida en el afluente, entre otros (Granados, 2018).

En los diferentes procesos adoptados por los HA contaminantes orgánicos asociados al agua residual doméstica, medidos como Demanda Bioquímica de Oxígeno ( $DBO_5$ ) y Demanda Química de Oxígeno (DQO), reducen significativamente la concentración de Oxígeno Disuelto (OD) en sistemas hídricos receptores, afectando la vida acuática. Por otra parte, estos efluentes; presentan alta concentración de Sólidos Suspendidos Totales (SST) y nutrientes principalmente Nitrógeno Total (NT) y Fósforo Total (PT) que provocan la eutrofización, además de sustancias químicas que ejercen toxicidad (Amoníaco, metales, orgánicos), contaminantes emergentes y microorganismos patógenos (Mihelcic & Zimmerman, 2012).

La utilización de los humedales artificiales en diferentes partes del mundo se ha venido incrementado en los últimos años, por ejemplo, en Europa se utilizan para el tratamiento de aguas residuales de pequeñas poblaciones, así como en países del norte, centro y sur de América. Mantener la calidad del recurso hídrico y disminuir los niveles de concentración de varios de sus contaminantes, es importante para preservar la salud de los seres vivos, pues las enfermedades que se pueden llegar a generar producto del consumo de estas han llegado a afectar de forma significativa a una población (Rivera, 2015).

Tratar las ARD mediante Humedales Artificiales específicamente los de flujo subsuperficial propone mejorar su calidad para atender las exigencias ambientales de disposición final en sistemas hídricos receptores o cumplir parámetros de reúso acorde a normativas ambientales (Bedoya, Ardila & Reyes, 2014). Por ello, la implementación de un sistema de tratamiento de ARD en zonas donde se requiera, puede llegar a prevenir la contaminación de aguas superficiales que pueda afectar la calidad de vida de la comunidad (Mihelcic & Zimmerman, 2012).

Uno de los parámetros fundamentales para determinar la eficiencia de un HA se relaciona con la concentración de indicadores de la contaminación microbiológica, dentro de ellos se pueden encontrar, los Coliformes Totales (CT), Coliformes Fecales (CF), *Escherichia coli*, *Salmonella*, *Streptococcus Faecalis*, entre otros (Ríos, Agudelo & Gutiérrez, 2017). La presencia de microorganismos patógenos en el agua representa para el humano un riesgo inminente, pues estos son capaces de generar enfermedades que pueden comprometer de manera negativa la salud de las mismas (Rodríguez, Ortiz, Navarro, Espinosa & Hernández, 2006). Es importante determinar dichos indicadores para establecer los niveles de eficiencia del sistema implementado y poder formular alternativas conducentes a optimizar el

tratamiento en términos de remoción de contaminantes microbiológicos. La determinación de la eficiencia de los HA usualmente se enfoca en establecer las concentraciones de materia orgánica y nutrientes, mientras que la remoción de contaminantes microbiológicos ha sido poco profundizada (Bautista, Tovar, Mancilla, Magdaleno, Ramírez & Vázquez, 2013).

El objetivo del presente estudio consiste en proporcionar a la comunidad científica una síntesis del alcance y eficiencia que tienen los Humedales Artificiales de Flujo Subsuperficial (HAFS) en la remoción de indicadores microbiológicos, durante el tratamiento de ARD. Adicionalmente se busca contribuir a la investigación y el conocimiento sobre los HAFS en la remoción de indicadores microbiológicos a través de la revisión sistemática de la literatura científica especializada.

## JUSTIFICACIÓN

Los humedales artificiales representan una de las mejores alternativas para el tratamiento de aguas residuales. Estos sistemas representan un beneficio económico comparado con los sistemas tradicionales de tratamiento. Adicionalmente, poseen gran capacidad para la disminución en la carga de contaminantes, principalmente materia orgánica, sólidos y nutrientes (Nitrógeno, Fosforo) con niveles de remoción superiores al 80% como lo demuestran los experimentos realizados por Karimi, Hassan & Hossin, 2014, Shafy & Khateeb, 2013, Mustafa, 2013, entre otros. Así mismo, pueden tener un óptimo desempeño en la remoción de metales pesados, trazas orgánicas y patógenos (Otálora, 2011).

Dentro de las tecnologías que presentan un mayor desempeño para el tratamiento de ARD se encuentra la aplicación de los Humedales Artificiales de Flujo Subsuperficial (HAFS). Estos sistemas consisten en el tratamiento de las aguas residuales a través de una matriz necesariamente porosa que se encarga de retener contaminantes físicos, químicos y biológicos. Además, cumplen un papel fundamental a la hora de querer disminuir concentraciones significativas de microorganismos (Bernal, 2014)

Es conveniente utilizar los HAFS pues son sistemas con tecnologías simples y de fácil operación, sin consumo de energía y baja producción de material residual. En Colombia y en el mundo los lugares a los cuales se es difícil tener acceso o donde exista el espacio para construir dichas tecnologías, representan una buena estrategia para mitigar los efectos de las ARDs ya que su infraestructura es simple y asequible, con un mantenimiento poco frecuente, de fácil operación y económicamente viable (Rivera, 2015).

La aplicación de los Humedales Artificiales de Flujo Subsuperficial incrementa los índices de remoción de la carga contaminante presente en el agua residual. Dentro de estos sistemas se realizan diferentes mecanismos de remoción para contaminantes producto de la utilización del agua por comunidades. Por ejemplo, para patógenos se utilizan procesos de sedimentación filtración y secreción de exudados radiculares con potencial antimicrobiano (Haro & Aponte, 2010).

La eliminación de microorganismos patógenos se asocia a la disminución de enfermedades producto del contacto con estos agentes, ya que se encuentran en mayor proporción en aguas contaminadas por actividades industriales, domésticas o de servicio. La remoción de estos depende de características tales como la carga hidráulica y el tiempo de retención. Estos humedales incrementan su eficiencia en remoción al cambiar condiciones de diseño como la profundidad del suelo, el tipo de material, la temperatura del agua, la cantidad y tipo de vegetación (Corrales & Rodríguez, 2014).

En literatura científica, la información asociada a la eficiencia de los HAFS se enfoca fundamentalmente al estudio de parámetros fisicoquímicos, principalmente Materia Orgánica (MO) y nutrientes (Nitrógeno y Fosforo). No obstante, la remoción de contaminantes microbiológicos y la comparación frente a la remoción de estos en diferentes estudios ha sido poco discutida. Consecuentemente, la presente propuesta busca determinar la eficiencia de los HAFS, comparado con estudios realizados a nivel global, enfocados al tratamiento de aguas residuales de origen doméstico. Con esto se espera tener una visión más clara del alcance de esta tecnología para la eliminación de microorganismos patógenos bajo diferentes condiciones operacionales.

## **PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA**

### ***Descripción***

Las propiedades fisicoquímicas y microbiológicas de las aguas residuales domésticas (ARD) alteran de forma significativa las características de los ecosistemas receptores (Mihelcic & Zimmerman, 2012). Generando un impacto ambiental negativo y afectando la salud de la población (Bedoya, Ardila & Reyes, 2014). Es por eso que la eficiencia de la remoción de contaminantes microbiológicos constituye un aspecto relevante para prevenir el riesgo de afectación en la salud. El enfoque del tratamiento de los humedales artificiales se ha basado en la remoción de indicadores de la calidad fisicoquímica del agua tales como Demanda Bioquímica de Oxígeno ( $DBO_5$ ), Demanda Química de Oxígeno (DQO), Sólidos Suspendidos (SS) entre otros. En consecuencia, la información acerca de la remoción de indicadores microbiológicos en sistemas de tratamiento de ARD es escasa y dispersa, lo cual dificulta la comparación de su nivel de eficiencia y las posibles variables operacionales que afectan este proceso. Esto supone el desconocimiento del alcance de esta tecnología y su posible optimización en relación con este aspecto.

### ***Formulación***

Determinar la eficiencia de los humedales artificiales de flujo subsuperficial en la remoción de indicadores microbiológicos durante el tratamiento de aguas residuales domésticas mediante la revisión sistemática de literatura científica especializada.

### ***Delimitación***

La eficiencia de la remoción de contaminantes microbiológicos en el tratamiento de aguas residuales domésticas por humedales artificiales de flujo subsuperficial estará basada en estudios publicados en revistas de alto impacto, realizados a nivel mundial, durante el periodo comprendido entre enero de 2010 y agosto de 2019.

### ***Pregunta de Investigación***

¿Cuáles son los niveles de eficiencia de sistemas de tratamiento de aguas residuales domésticas, basados en el uso de humedales artificiales de flujo subsuperficial, en términos de remoción de contaminantes microbiológicos?

## **OBJETIVOS**

### ***Objetivo general***

Establecer el potencial de los humedales artificiales de flujo subsuperficial (HAFS), para la remoción de contaminantes microbiológicos de aguas residuales domésticas mediante revisión sistemática de literatura científica.

### ***Objetivos específicos***

1. Describir los principales mecanismos de remoción de contaminantes microbiológicos asociados a sistemas HAFS.
2. Determinar los factores que favorecen la remoción de contaminantes microbiológicos en un HAFS tratando aguas residuales domésticas.
3. Establecer, mediante revisión de literatura científica reciente, las eficiencias de remoción de contaminantes microbiológicos en diversas configuraciones de humedales artificiales de flujo subsuperficial.

## MARCOS DE REFERENCIA.

### Antecedentes y Estado del arte.

El suministro de agua en el mundo para todas las personas se ha visto limitado, pues el 70% del agua superficial y subterránea es utilizada en labores netamente agrícolas para riego, un 20% se utiliza en la industria y el otro 10 % para consumo humano y doméstico (Jaramillo, 2014). Por lo anterior se ha visto la necesidad de explorar nuevas alternativas que conduzcan a mejorar el suministro de este recurso para toda la población y que contribuya al sostenimiento de esta (Silva, Torres & Madera, 2008).

Las ARD son utilizadas para irrigación de cultivos que satisfacen las necesidades alimentarias de las personas a nivel mundial no solo en países en vías de desarrollo, sino también en los industrializados, pues se estima que el 18% de las tierras donde se cultivan alimentos son irrigadas por estas aguas y que logran entre otras cosas producir el 40% de todos los alimentos (Silva, Torres & Madera, 2008). Las primeras evidencias sobre el reúso de aguas residuales se remontan a la cultura griega, los cuales utilizaban las letrinas que junto con las aguas lluvias se depositaban en lugares especiales para ser utilizadas como fertilizantes para los huertos y cultivos (Jaramillo, 2014).

Para el tratamiento de ARD existen diferentes sistemas de tratamiento de aguas residuales que van desde operaciones físicas para remoción de sólidos hasta tratamientos más específicos que buscan características aptas para la remoción de nutrientes o eliminación de microorganismos. Aunque la presencia o aumento de diferentes contaminantes en el agua, principalmente bacterias, parásitos, virus y hongos se producen de manera directa o indirecta por los cambios generados en el ambiente los cuales tienen en cuenta el crecimiento poblacional y la urbanización no controlada, este tipo de tecnología presenta novedosas ideas para su tratamiento (Ríos, Agudelo & Gutiérrez, 2017).

Las aguas residuales ya se trataban en humedales naturales por las civilizaciones China y egipcia (Espinosa, 2014). Si bien es cierto que el concepto es bastante antiguo, el término es relativamente nuevo, pues autores como Kadlec & Wallace (2009) y Espinosa (2014) aseguran que el primer registro científico sobre el tratamiento de las aguas residuales domésticas mediante Humedales Artificiales híbridos, es decir con combinaciones de flujo vertical y horizontal, lo realizaría en 1952 la doctora Käthe Seidel en Max Plank Institute Process en Alemania. Este experimento consistió en la utilización del junco común (*Schoenoplectus lacustris*) para la remoción de diferentes sustancias orgánicas e inorgánicas y para la disminución de la concentración de coliformes *Salmonella* y *Enterococcus*.

Para la década de los 50's, el trabajo realizado con junco común se ampliaría para tratar diversos tipos de vertimientos tales como las aguas residuales contaminadas de fenol. Posterior a esta década también se lograría tratar vertimientos de lugares dedicados a la producción de derivados de la leche y aguas residuales del ganado. Dicho sistema fue la base fundamental que logró establecer los sistemas artificiales de humedales que se volverían a tener en cuenta a mediados del siglo XX (Kadlec & Wallace, 2009).

Se une a la investigación de Seidel en 1960 Reinhold Kickuth de la Universidad de Göttingen también de Alemania, produciendo nuevas ideas en el desarrollo de esta tecnología lo que provocaría divisiones a los ingenieros y autoridades reguladoras de ese momento (Kadlec & Wallace, 2009). Reinhold se separaría pocos años después y que de acuerdo con Kadlec & Wallace (2009) y Espinosa (2014) desarrollaría su propio sistema, denominado Método de la Zona de Raíz (RZM) por sus siglas en inglés Root Zone Method, también conocidos como Humedales Artificiales de flujo subsuperficial.

El sistema RZM fue un experimento que se construyó en suelo arcilloso y franco-arenoso con siembra de *phragmites*, con la idea de que las raíces de esta planta ayudarían a mejorar la capacidad que tienen los medios porosos para permitir el flujo de agua a través de estos (Kadlec & Wallace, 2009). Sin embargo, lo que se realizaría en ese momento sería la elaboración ideal de un sistema que propiciaba la desnitrificación donde el crecimiento normal de las plantas ayudaba al crecimiento de las bacterias responsables de este proceso, pues la producción de carbono sería fundamental (Espinosa, 2014).

A pesar de que los primeros registros sobre la utilización de humedales artificiales sean bastante antiguos, la implementación de estos respecto a la remoción de contaminantes mediante plantas acuáticas surgió de apenas unos 20 años (Mendoza Y., Pérez J & Galindo A, 2018.) Existen diferentes artículos, revistas, folletos, textos y libros que no solo mencionan los innumerables beneficios de la utilización de humedales artificiales, sino que además consagran las condiciones específicas en diferentes metodologías para mejorar su diseño (Zapata, 2014).

En Alemania para 1970 empezaría el apoyo financiero y científico para el desarrollo de los humedales artificiales como tecnología para el tratamiento de aguas residuales por parte del gobierno, diferentes centros de investigación y algunas empresas para tres universidades localizadas en Darmstadt, Kassel y Weihestephan lo que provocaría que dichos sistemas se implementaran en diferentes estados como Baja Sajonia, Renania del Norte, Scheleswing Holstein y Bavaria (Ríos & Pabello, 2001).

El Water Research Center WRc del Reino Unido empieza para 1985 investigaciones con humedales artificiales luego de comprobar la remoción de contaminantes en el agua tratada que se conseguían en Alemania, lo que provocaría que a finales del mismo año se tratara el agua residual de 1300 personas y que para el año 1995 se realizarían más de 400 sistemas (Ríos & Pabello, 2001).

En República Checa la University of Life Sciences in Prague elaboró un sistema de tratamiento que consistía en la instalación de tres humedales artificiales, los dos primeros de flujo vertical y el otro de flujo horizontal con plantaciones de *Phragmites australis* y un tercero con *Phalaris arundinacea*. Este sistema consistía en proporcionar a la serie de humedales artificiales aguas residuales municipales pretratadas. Este sistema alternativo de tratamiento de aguas demostró que el porcentaje de remoción de DBO<sub>5</sub> y DQO de 94,5 % y 84,4% respectivamente. También evidenció una remoción del fósforo llegó al 65,4 % en todo el sistema (Rajadel, 2017).

Para el mismo año, los investigadores Zimmels, Kirzhner & Malkovskaja (2006) publican un trabajo donde estudiaron la disminución de la demanda biológica de oxígeno (DBO<sub>5</sub>), demanda química de oxígeno (DQO) y sólidos suspendidos totales del agua residual en Israel mediante las macrófitas *Eichhornia crassipes* y *Pistia stratiotes*. Sus resultados indicaron que en términos de dichos parámetros las aguas clarificadas servirían para uso en sistemas de riego.

En China, en la ciudad de Fuiten, subprovincia de Shenzhen la realización de un sistema de distintos tipos de humedales artificiales implementando mangles nativos de la zona mediante tres (3) celdas idénticas con piedra, grava y arena, con carga hidráulica fue de 5m<sup>3</sup> con tiempo de retención hidráulica de tres días. Este estudio demostró que los mangles pueden utilizarse en la implementación de humedales artificiales con el fin de tratar aguas residuales domésticas, pues muestra también las correlaciones positivas entre la eliminación de nutrientes y el crecimiento de las macrófitas (Caballero & Osorio, 2016).

En Estados Unidos las investigaciones realizadas sobre humedales artificiales surgirían a partir de lo realizado en Europa. Los primeros trabajos que se realizaron tuvieron como objetivo buscar el método más eficiente que lograra disminuir la polución del aire y la contaminación del agua en las estaciones espaciales de las colonias de la luna (Ríos & Pabello, 2001). Para el año 1973 en la Universidad de Florida, Rodríguez, Díaz, Guerra & Hernández (1996) determinaron la efectividad de las macrófitas en ensayos con *Lemna minor* o lenteja de agua, obteniendo como resultado una remoción de 89% para nitrógeno y 67% de fósforo.

En 2009 en el Estado de Durango, (México) Pérez E. establece las bases para la construcción de humedales artificiales con el fin de disminuir la carga microbiológica de las aguas residuales domésticas con pruebas en micro-humedales. El estudio arrojó una eficiencia para dos tipos de especies de plantas *Eleocharis densa* y *Schoenoplectus americanus* del 98.5 a 99.8% para remoción de Coliformes Fecales (FC), de 89 a 99% en Fosfatos Solubles y de 93 a 99% en nitrógeno amoniacal.

En México se estableció para el año 2009 un sistema piloto de humedales, gracias al Centro de Investigación en Biotecnología, pues el propósito era tratar aguas residuales mediante humedales artificiales. Este estudio determinó el porcentaje de remoción de Materia Orgánica (M.O.) diseñado con tres módulos instalados con diferentes tipos de organismos como por ejemplo *Phraformites australis* y *Typha dominguensis* (Romero, Colín, Sánchez & Ortiz, 2009).

Rajadel en el 2017 no sólo evaluó el uso de (HA) con el fin de reducir los nutrientes y el fitoplancton de aguas en proceso de eutrofización, sino que determinó la aplicabilidad como instrumentos para el mejoramiento en la calidad de las aguas de los ecosistemas acuáticos perjudicados. Determinó que dichos humedales son capaces de mejorar la calidad de aguas eutróficas y que sirven como zonas de amortiguación de la contaminación difusa, con énfasis en la escorrentía agrícola.

Otro estudio realizado por la Universidad Autónoma de México (UNAM) juntó diferentes tipos de mangles en humedales artificiales, con el fin de evaluar la capacidad de asimilación de nutrientes de dos especies de mangles (*Rhizophora racemosa* y *Rhizophora mangle*) integrado a estanques con camarón (*Litopenaeus vannamei*). El agua que nutrió a estos humedales se bombeó del estuario hacia los estanques con 20 plataforma flotantes con 720 plántulas (Caballero & Osorio, 2016).

Solo hace 10 años en Colombia se han aumentado los estudios realizados para el tratamiento de aguas residuales mediante humedales artificiales. Colombia ha importado de Europa y Estados Unidos diferentes tecnologías para adaptarlas y aplicarlas al medio presente, pues dichos sistemas de tratamiento se usan en combinación con tratamientos primario o secundarios (Estrada, 2010).

En Colombia hacia 1996 se establece el primer antecedente con macrófitas flotantes registrado por la literatura, donde se determinó la efectividad de la *Eicchornia crassipes* para la depuración de aguas residuales situadas en las zonas cálidas del valle Sinú del departamento de Córdoba. Donde los resultados reflejan remociones altamente significativas (Martelo & Lara, 2012). Para el 2002 la Universidad del Valle en Cali, Colombia a escala de laboratorio determinó la remoción de Hierro mediante la *Lemna spp.* Obteniendo valores altos de remoción y como conclusión que a mayores concentraciones menor porcentaje de remoción por saturación.

Por otra parte, la Universidad Francisco José de Caldas realizó una investigación donde determinó mediante ensayos la eficiencia de las macrófitas en la disminución de cargas contaminantes en las aguas residuales de los vertimientos en una industria lechera (Rodríguez, Ortiz, Navarro, Espinosa &

Hernández, 2006). Sin embargo, los estudios no solo están para dicha industria, pues la Universidad de la Salle elaboró un documento donde plasmaron la investigación que aborda el tema de tratamiento de aguas residuales domésticas mediante humedales artificiales de flujo subsuperficial a base de *Guadua Angustifolia* (Aponte, 2016)

En este país no solo existen estudios acerca de los humedales artificiales de flujo subsuperficial, sino que también se habla sobre humedales verticales, la universidad de la Salle presenta la remoción del Zinc en aguas residuales industriales reproduciendo condiciones reales estableciendo un análisis del comportamiento de los mecanismos de remoción que pasan dentro de un humedal artificial, exclusivamente para este elemento (Caballero & Osorio, 2016).

### **Marco Teórico**

En el manejo de los recursos hídricos se considera el riesgo que puede llegar a tener el consumo de agua de tipo colectivo, lo individual, lo inmediato y a largo plazo (Castro & Pérez, 2009). Según un informe de Lalonde existen cuatro aspectos que ayudan a establecer el efecto sobre la salud pública, dentro de ellos están presentes la biología humana, lo referente al sistema de asistencia sanitaria, el ambiente y el estilo de vida. Lo anterior ha condicionado a establecer la capacidad que tienen estos sistemas de influir en la salud de la población y de evitar la ausencia de servicios de sanidad básicos en zonas rurales y urbanas (Paz, 2008).

La contaminación fecal en lugares de abastecimiento de agua ha logrado llegar a generar una de las problemáticas de salud pública más importantes como las epidemias, especialmente en lugares donde la contaminación del agua se debe a la mala disposición de las aguas residuales domésticas e industriales en afluentes superficiales y a la disposición de basuras. Otro de los factores importantes de la contaminación del agua se realiza por la defecación a campo abierto de animales domésticos y silvestres que sirven como lugares aptos para la prevalencia de agentes patógenos (Secretaria Distrital de Salud de Bogotá, 2011).

La relación salud-ambiente depende de las relaciones entre la sociedad y la naturaleza, es decir, que la salud hace parte de las necesidades sociales básicas de una población y es aquí donde nace el concepto de salud ambiental. Según la Organización Panamericana de la Salud (OPS). La salud ambiental tiene por concepto general la incorporación de planteamientos o actividades que tienen relación con los problemas de salud asociados al ambiente, sin olvidar que este último contempla diferentes factores que afectan de manera favorable o desfavorable al individuo (Hernández, Chamizo y Mora, 2011).

La salud pública va de la mano con la salud ambiental, pues esta última está enfocada a disminuir la cantidad de los problemas de salud que tienen que ver de manera directa o indirecta con las deficiencias en las condiciones ambientales y en el estado de los servicios básicos de saneamiento, lo anterior sugiere realizar una vigilancia a la calidad del agua para consumo humano con el propósito de llegar a una disminución en los factores de incidencia de todas las enfermedades que tengan su origen en el recurso hídrico (Hernández, Chamizo, y Mora, 2011).

Las medidas que se tienen respecto al saneamiento están enfocadas a la reducción controlada de agua contaminada, el tratamiento y el mantener agua de calidad apta para el consumo humano (Espinosa, 2018). Las ***Aguas Residuales Domésticas (ARD)*** y la disposición directa sin tratamiento de estas a cuerpos de agua superficiales, subsuperficiales y en el suelo pueden llegar a generar efectos negativos en

la salud pública, especialmente en países tropicales gracias al alto riesgo de incidencia de enfermedades infecciosas las cuales tiene su origen en patógenos que se dispersan mediante las excretas de animales y personas (Silva, Torres & Madera, 2008).

La relación salud pública y ARD es un hecho que no se puede refutar pues el contacto directo afecta la salud humana. Este contacto es a través de los usos que se le da a este tipo de aguas, que se realiza con fines recreativos y reutilización. Es por esto que el acceso seguro a cualquier tipo de agua y el tener sistemas de saneamiento sanitario, logran crear ventaja a la hora de diferenciar entre países desarrollados y países en vía de desarrollo, pues los efectos de no poseer agua segura afectan principalmente a los sectores más vulnerables de la población como los niños (Martin & Pita, 2007).

La transmisión de microorganismos a través de las aguas no es específica en una región del mundo o a un nivel de desarrollo, pues la ineficiencia en los servicios de salud y la falta de apoyo de los gobiernos para garantizar la potabilización del agua, favorecen junto con otras características el aumento en la propagación, morbilidad y mortalidad referentes a las enfermedades adquiridas por el consumo de agua principalmente en países en vía de desarrollo (Ríos, Agudelo & Gutiérrez, 2017).

El rendimiento de los cultivos a los cuales se irrigan aguas residuales domésticas es relativamente superior a los cuales no se realiza, sin embargo, a pesar de tener varias ventajas se presenta el riesgo a la transmisión de enfermedades relacionadas con bacterias fecales y nematodos intestinales a las personas que consumen los alimentos y aquellas que los cultivan (Secretaria Distrital de Salud de Bogotá, 2011).

Son muchos los *Agentes Patógenos* que son excretados por el ser humano y que provocan enfermedades de tipo entérico como la diarrea, tífus, hepatitis, etc. Estos agentes son bacterias, virus, protozoos y helmintos que se encuentran a través del agua, la mala manipulación de alimentos y la mala higiene (León, 2001). Al estar presentes diferentes tipos de patógenos que son transmitidos por el agua no hay un microorganismo ideal que se constituya como indicador de la calidad del agua (Ríos, Agudelo & Gutiérrez, 2017).

Por lo general en aguas residuales los indicadores microbiológicos de contaminación son las bacterias propias de la flora saprófita intestinal en las que se encuentran bacterias mesófilas, coliformes totales y fecales (termotolerantes), *Escherichia coli* y *Streptococcus faecalis*. Algunas provienen de animales, siendo abundantes parásitos tales como, *Giardia intestinalis* y *Cryptosporidium* que presentan una mayor resistencia a la hora de reducir su concentración en el tratamiento de agua residuales (Ríos, Agudelo & Gutiérrez, 2017).

Una de las alternativas que se usan para el tratamiento de las ARD con fines de reúso en diferentes actividades, son los *métodos biológicos* (Secretaria Distrital de Salud de Bogotá, 2011). Estos métodos se basan generalmente en la utilización de microorganismos y plantas donde la interacción y el metabolismo de estos crean un ecosistema que logra disminuir concentraciones de materia orgánica, nutrientes y algunos metales, esto en condiciones de presencia o ausencia de oxígeno dependiendo de la vida de degradación empleada, logran tener eficiencias similares a los sistemas convencionales de tratamiento (León, 2001).

Los tratamientos biológicos se utilizan en la industria minera, en los centros urbanos y en sistemas avanzados de tratamiento que combinan procesos físicos y químicos. Son muchos los sistemas que se utilizan para la depuración de aguas, sin embargo, uno de los más utilizados son los tratamientos con

plantas acuáticas. Dichos sistemas pueden ser de carácter natural o artificial y se han desarrollado en principalmente en Europa (Celis, Junod & Sandoval, 2005).

Uno de los mecanismos que emplean macrófitas para el tratamiento biológico de las aguas pertenece a la tecnología de los **humedales**, sin embargo, esto se ha llevado a cabo a modificaciones, donde el objetivo es establecer un ambiente controlado con el fin de lograr aprovechar al máximo la actividad metabólica los microorganismos y las plantas para lograr reducir al máximo las concentraciones de las cargas de contaminantes (Celis, Junod & Sandoval, 2005).

El tratamiento de las aguas residuales domésticas ha tenido variaciones en cuanto al tipo de sistema que logre reproducir los mecanismos de los sistemas de tratamiento convencionales, con el fin de proporcionar agua de óptima calidad. El tratamiento de tipo natural involucra procesos biológicos que favorecen el crecimiento de microorganismos y que contribuyen al mejoramiento de la calidad del agua (Castañeda & Flores, 2003). Los humedales artificiales han sido uno de los sistemas más utilizados para el tratamiento de las aguas residuales en el mundo.

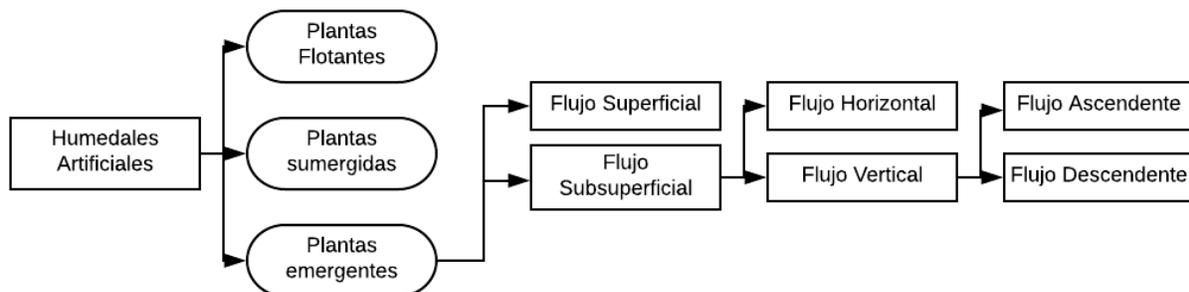
### Marco Conceptual

El convenio Internacional Ramsar de 1971 define a los **humedales** como grandes extensiones de marismas, pantanos o superficies cubiertas por agua que contengan regímenes naturales artificiales permanentes o temporales de agua dulce o salada y que incluya extensiones de agua marina a profundidades que no superen los seis metros Bernal (2014).

Los **humedales artificiales** como lo menciona Bernal (2014), son sistemas diseñados por el hombre con el objetivo de aprovechar diferentes procesos físicos, químicos y biológicos que se logran obtener en la interacción que tiene el agua, las plantas, el medio, los microorganismos y la atmósfera. Lo anterior lo afirma Rajael (2017), asegurando que son sistemas ingenieriles que logran reproducir procesos naturales de manera más controlada a diferencia de los humedales naturales. Esta definición es complementada por Estrada (2010), como una alternativa, a las tecnologías de tratamiento convencional que pueden llegar a tener un buen potencial para tratar aguas contaminadas.

Los HA se clasifican en función de varios parámetros de diseño, sin embargo, los más importantes son flujo superficial o subsuperficial en hidrología; el tipo de macrófitas entre emergentes, sumergidas y flotantes y la trayectoria de flujo horizontal o vertical (Rajael, 2017). Estos tipos de sistemas pueden ser combinados con otros tipos de sistemas con el fin de incrementar el nivel de eficiencia en remoción de contaminantes (Vymazal, 2011). Lo anterior se describe en la figura 1.

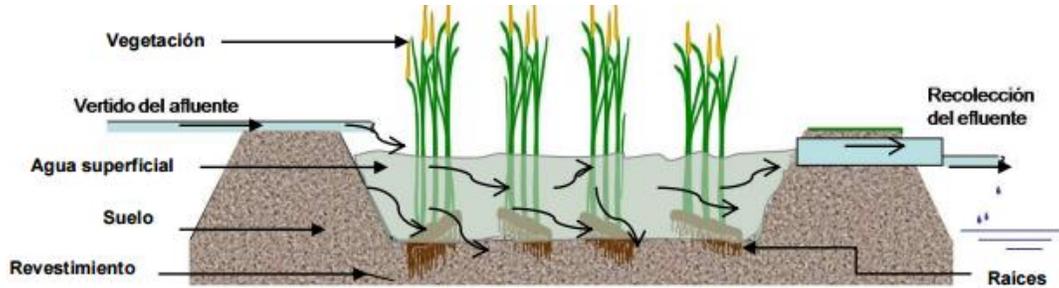
Figura 1. Tipos de plantas empleadas en humedales en humedales artificiales.



Fuente: Modificado de Rajael, 2017.

Los **humedales artificiales de flujo superficial (HAFSS)** son sistemas que se construyen por canales menor de un metro de profundidad con plantaciones vegetales de tipo sumergido o emergente. Los procesos que desarrollan estos tipos de humedales son la sedimentación, filtración, oxidación, adsorción y precipitación (Montiel, 2014). El agua que circula está expuesta a la atmósfera y pasa a través de los tallos de las plantas, se suelen aplicar para mejorar la calidad de efluentes que ya han sido tratados por algún otro método. Estos tipos de humedales son también una modificación de un lagunaje natural (García & Corzo, 2008).

Figura 2. Humedal artificial de flujo superficial.



Fuente: Tomado de García & Corzo, 2008.

Las ventajas de un humedal superficial están enfocadas en la incorporación de hábitat de vida silvestre y en algunos casos oportunidades para la recreación pública, sin embargo, con un tiempo razonable de retención pueden llegar a ser capaces de remover DBO<sub>5</sub>, DQO, SST, metales y algunos compuestos orgánicos (Acero, 2014). Estos sistemas también presentan algunas desventajas las cuales se enuncian a continuación:

1. El área de terreno de estos sistemas puede ser grandes, en especial si se quiere llegar a remover nitrógeno (Espinosa, 2014).
2. Vectores de enfermedades como mosquitos y otros insectos suelen ser un problema para este tipo de sistema (Espinosa, 2014).
3. En los climas fríos el porcentaje de eficiencia para la disminución de la DBO<sub>5</sub> suele disminuir significativamente (Espinosa, 2014).

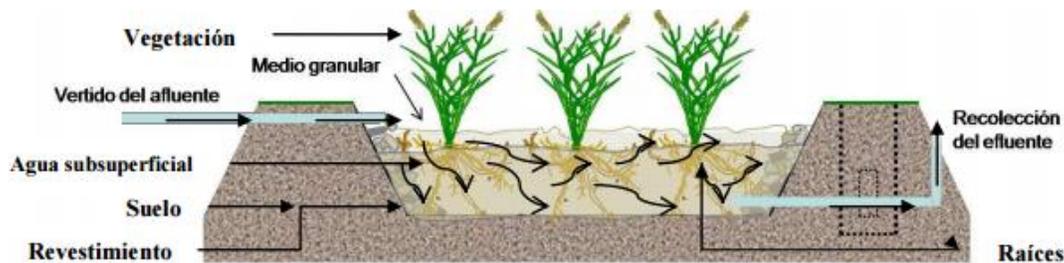
Los **Humedales Artificiales de Flujo Subsuperficial** suelen caracterizarse por la circulación del agua a través de un medio granular (Carvajal, Zapattini y Quintero, 2018). Este medio consiste en un lecho de arena o grava con un grosor que permite la circulación del agua a través de las raíces de las macrófitas acuáticas y que además sirve como matriz para las mismas. En este tipo de sistemas no existe a simple vista una lámina de agua, sino que dicho fluido circula al interior del sistema (Fernández, 2004).

Estos sistemas utilizan un flujo permanente de agua que se suministra de manera uniforme por lo general con tuberías múltiples perforadas que ingresan por un extremo en la parte superior y que vierte sus aguas en el inferior del costado opuesto (Acero, 2014). Por lo general son instalaciones con tamaños inferiores al área que pueden llegar a ocupar los humedales artificiales de flujo libre, los primeros suelen emplearse como sistemas de tratamiento secundario para pequeñas poblaciones (Carvajal, Zapattini y Quintero, 2018).

La profundidad de estos humedales se determina dependiendo de la profundidad efectiva que tienen las raíces de las macrófitas con el fin de que estas entren en contacto con el agua y tengan efectos en el tratamiento de las aguas residuales, sin embargo, su lecho suele tener un espesor en un rango de 30 a 70 cm y una profundidad total mayor a la profundidad del flujo con el fin de obtener una zona seca en la parte inferior (Comisión Nacional del Agua, 2018). Dada la profundidad de la lámina o del flujo del agua, este sistema de tratamiento posee una baja incidencia a los malos olores y a la proliferación de vectores causantes de enfermedades, además de tener una baja exposición directa a las personas (Carvajal, Zapattini y Quintero, 2018).

En el paso del agua residual a tratar a través del lecho filtrante y las raíces de las plantas, la materia orgánica se descompone de manera biológica, el nitrógeno suele ser desnitrificado, el fósforo y los metales son retenidos por el suelo, sin embargo, las macrófitas cumplen un papel fundamental al suministrar oxígeno a los microorganismos e incrementan la facilidad con la que el agua atraviesa el suelo (Fernández, 2004).

Figura 3. Humedal artificial de flujo subsuperficial.



Fuente: Tomado de Bernal, 2014.

Estos sistemas brindan mayor protección térmica a diferencia de los humedales de flujo superficial, así como la protección que brindan en cuanto a la proliferación de vectores como los mosquitos y otros insectos. También evitan el contacto del agua residual con poblaciones cercanas lo que evita afecciones a las poblaciones cercanas (Acero, 2014). Sin embargo, presentan algunas desventajas tal como:

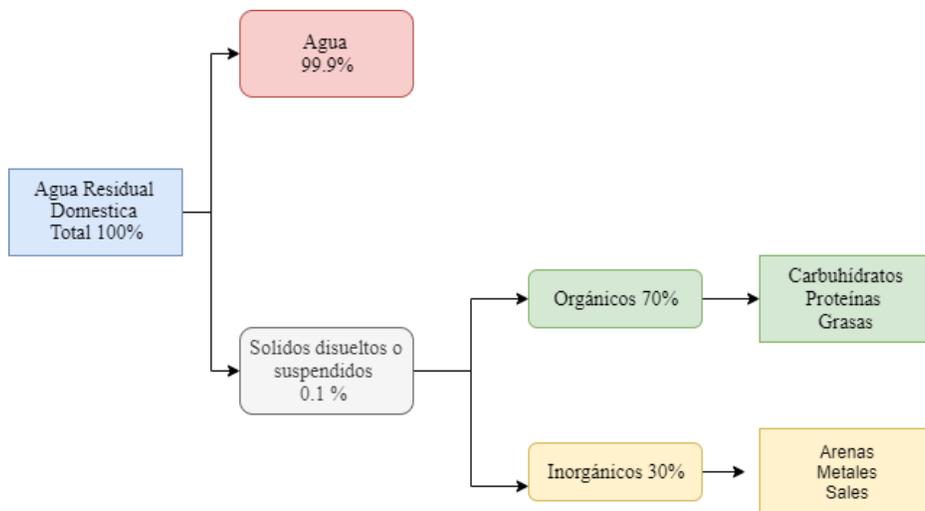
1. Costos elevados en cuanto a la construcción debido al tipo de material (Acero, 2014).
2. Los compuestos orgánicos persistentes, el fósforo y los metales permanecen en el humedal después de haber sido removidos, acumulándose con el tiempo (Acero, 2014).

Las **Aguas Residuales** como lo menciona (Díaz, Alvarado & Camacho, 2012). Son todas aquellas aguas provenientes de un sistema de abastecimiento de una población, en las que el hombre introduce materias contaminantes de manera directa e indirecta por actividades domésticas, industriales y comunitarias. Modificando sus componentes físicos (Color, temperatura, turbiedad, sólidos totales, olor); químicos (azufre, Demanda Química de Oxígeno, Demanda Bioquímica de Oxígeno, detergentes, fósforo, grasas y aceites, metales, nitrógeno, pH) y biológicos (Bacterias, hongos, protozoos, patógenos, virus) provocando alteraciones en su calidad (Valencia, 2013).

Las **Aguas Residuales Domésticas (ARD)** se generan por actividades de tipo doméstico, que proceden de orina, agua gris, heces humanas y de animales, suelen tener un alto contenido de materia orgánica, compuestos químicos domésticos y microorganismos. La clasificación de las ARD está relacionada con su composición, la cual depende de las características socioculturales de población que las genera

(Cardona & García, 2008). Las ARD están constituidas principalmente por aguas de cocina, aguas de lavadoras, aguas de baño y aguas negras, que aportan contaminantes como: grasas, materia orgánica, sólido, sales, detergentes, nutrientes y organismos patógenos (Pacto por el agua, 2008). La composición de las aguas residuales domésticas se basa de un 99.9% agua potable y de un 0.1% sólidos disueltos o suspendidos, este último porcentaje es el que se pretende remover para usos posteriores de la misma, los cuales dependen de las características socioeconómicas, climatológicas, culturales y los usos del suelo de una población (Arocutipá, 2013). En la siguiente figura se puede evidenciar la composición típica del agua residual doméstica.

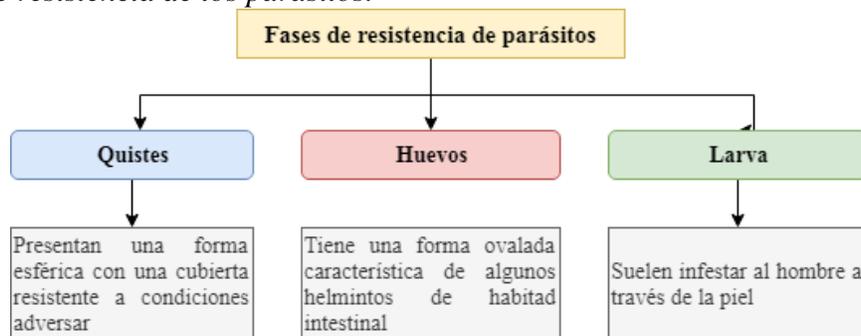
Figura 4. Composición típica del agua residual doméstica.



Fuente: Modificado de Villacis, 2011.

Los **Parásitos** son organismos de tamaño muy pequeño que pertenecen al reino animal, bacteriano, fúngico y vegetal, su ciclo de vida se desarrolla dentro de un huésped el cual es un organismo externo al parásito (Beltrán, Benavides y Páez, 2016). Para continuar con su ciclo evolutivo los parásitos tienen que salir al medio externo y desarrollarse en otro huésped asegurando la propagación de la especie, sin embargo, al ser organismos susceptibles al medio, presentan fases de resistencia para poder acceder y sobrevivir a dicho medio (Gualán, Loja y Orellana, 2014). En la figura 5 se describen las principales fases de resistencia de los parásitos.

Figura 5. Fases de resistencia de los parásitos.



Fuente: Gualán, Loja y Orellana, 2014.

Los **Indicadores Microbiológicos** de la calidad del agua son aquellos microorganismos no patógenos, pero habitualmente relacionados a estos, los cuales se usan para reconocer el riesgo de la presencia de agentes patógenos generadores de enfermedades (Cabrera & García, 2006). Los microorganismos indicadores deben cumplir unas características básicas para poder ser utilizados como indicador de contaminación, dentro de las cuales se encuentran: su concentración debe tener relación con la cantidad de microorganismos patógenos en el agua, deben ser fáciles de cultivar en el laboratorio y por último tiene que ser relativamente inocuos para el hombre y los animales. Por medio de la determinación de dichos indicadores se puede evaluar la calidad microbiológica del agua para poder ser abastecida para consumo humano (Aurazo, Maldonado & Barrenechea, 2004).

Los **Coliformes Fecales** o comúnmente conocidos como bacterias coliformes termotolerantes, porque soportan altas temperaturas en su periodo de incubación para su óptimo desarrollo (García & Iannacone, 2014). Forman parte del grupo de coliformes totales, pero a diferencia de estos, los coliformes fecales son mejores indicadores de aguas e higiene en alimentos, debido a que su presencia indica posible contaminación fecal de humanos o animales (Paredes, 2014). Estos al ser organismos termotolerantes pueden detectarse con mayor facilidad, ejerciendo como función secundaria, ser indicadores de la eficiencia de procesos del tratamiento del agua para eliminar bacterias fecales (Baldeón, 2013).

Theodor Escherich en 1885 fue el primero que describió **Escherichia coli**, estableciendo que esta bacteria toma forma de huésped habitual del ser humano, dicha bacteria patógena está relacionada con gran parte de enfermedades infecciosas que perjudican la salud del ser humano, la cual se caracteriza por ser un bacilo gramnegativo que hace parte de la flora intestinal de los seres humanos y posiblemente de los animales de sangre caliente debido a que esta bacteria es perceptible a temperaturas mayores a los 70°C y menor a 7°C. La estructura básica de **Escherichia coli** se compone de la membrana citoplasmática, la membrana externa y el espacio periplasmático, los cuales le permiten a la bacteria una estructura fuerte y resistente para posibles situaciones adversas (Gutiérrez & Sánchez, 2017).

**Salmonella sp** es una bacteria en forma de bacilos gram-negativos, no fermentadores de lactosa, principalmente patógenas que al ser parásitos intracelulares y al estar en macrófagos, se dispersan por todo el cuerpo causando afecciones en la vía linfática y sanguínea. Es la enterobacteria más importante en cuanto a temas de salud pública porque genera trastornos del tracto gastrointestinal y septicemia en los seres vivos (Pachón, 2009). Por lo que se considera uno de los patógenos entéricos más frecuentes en países desarrollados y subdesarrollados, la cual, dependiendo de su especie, tamaño, factores de virulencia, hospedero, estado inmunológico del paciente e intervención médica, puede llegar a generar una infección sistémica comprometiendo la vida del paciente (Figuroa, 2005).

En 1899 el microbiólogo francés Thiercelin habla por primera vez de **Enterococcus** refiriéndose a estos como un diplococo gram-positivo encontrado el intestino humano, estos son células esféricas u ovoides en forma de pares o cadenas cortas, anaerobios facultativos con metabolismo fermentativo. **Enterococcus faecalis** forma parte de la flora normal humana a nivel de la mucosa intestinal y genital, lo que la convierte en la especie más relevante del género **Enterococos** (Gómez & Perea, 2017). Esta especie también se considera buen indicador de contaminación fecal debido a que abunda en las excretas de humanos y animales de sangre caliente, dicha especie de **Enterococos** es la más frecuente en el agua (Méndez, 2004).

Los **Helmintos Parásitos** son microorganismos pluricelulares de forma alargada y simetría bilateral con un rango de tamaño de 1mm a 1m o mayor a este (Mamani, 2012). Como lo menciona Despommier, Griffin, Gwadz, Hotez & Knirsch, (2017), los **helmintos parásitos** pertenecen a cuatro troncos:

Los nemátodos que principalmente son gusanos redondos, los Platelmintos que se caracterizan por ser lombrices planas, los Neumatóforos que suelen ser gusanos con pelo y por último Acantocefalos que son gusanos de cabeza espinosa, los Nemátodos y los platelmintos son endoparásitos para el ser humano lo que significa que pueden empezar su ciclo de vida desde el interior del ser humano. A nivel mundial los *Helmintos* intestinales son la causa de graves infecciones generando consecuencias como alteraciones cognitivas, disentería y/o anemia (Menocal &, Caraballo, 2014).

El subreino Protozoo está integrado por un grupo de organismos unicelulares eucarióticos denominados *Protozoarios* que por lo regular tienen un tamaño de 2µm y 100µm y su estructura se conforma por un citoplasma cubierto por una membrana celular y un núcleo (Altamirano, 2017). Su ciclo de vida se representa en dos estados los cuales son trofozoíto donde se desarrolla su crecimiento vegetativo al igual que su replicación y el otro es conocido como quiste, el cual permite resistir condiciones ambientales adversas (Bohórquez, 2010). Al igual que los helmintos los Protozoarios son unas de las causas más frecuentes que pueden afectar a los seres vivos generando enfermedades infecciosas transmitidas por medio del agua de consumo forjando grandes consecuencias en el área de salud pública (Mamani, 2012).

## Marco Normativo

### *Normativa Nacional.*

En el marco regulatorio a nivel nacional, la calidad del agua ha sido un tema que se ha incluido desde 1979 y que está reglamentado mediante leyes, decretos y resoluciones. Sin embargo, el manejo que se le da al reusó de las aguas residuales domésticas tratadas no ha sido tan explorado (Dueñas, Amaya & Donado, 2015). Colombia en los últimos años ha reglamentado el reusó de las aguas residuales domésticas tratadas.

La ley **9 de 1979** enmarca las normas generales que sirven como base fundamental para reglamentar las condiciones sanitarias con el fin de preservarla, restaurarla y mejorarla pues va enfocada a la salud humana. También hace referencia a los procedimientos y medidas que se tienen que tener en cuenta para la regulación de los aspectos ambientales que puedan afectar las condiciones sanitarias del ambiente.

Esta ley consagra en el **artículo 6** la determinación de las características deseables y admisibles que se deben tener en cuenta para las aguas, pues deberá cumplir por lo menos con uno de los siguientes criterios:

1. La preservación de las características naturales de las aguas.
2. Conservar los límites que estén alineados a las necesidades del consumo humano.
3. Mejoramiento continuo de las características de las aguas con el fin de alcanzar calidades aptas para el consumo humano y a las metas propuestas para un conveniente desarrollo.

El **Plan Nacional de Manejo de Aguas Residuales Municipales en Colombia para el 2004** enmarca los antecedentes sobre la gestión relacionada con las aguas residuales domésticas, el diagnóstico general de la situación ambiental, sanitaria, potable y demás servicios del agua y que propone además acciones y estrategias que permiten reducir el impacto que se puede llegar a generar sobre el recurso hídrico, fortaleciendo la gestión institucional a corto, mediano y largo plazo.

Este documento es una base fundamental para la incorporación de la normatividad relacionada con el saneamiento y control de los criterios de calidad que permiten la utilización de las aguas residuales en diferentes usos con énfasis en el sector agropecuario. Establece como responsable al Ministerio de

Ambiente y Desarrollo Territorial el ahora Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible para el cumplimiento a mediano plazo apoyado con entidades como las Universidades para la creación de los criterios de la calidad en el reúso de las aguas residuales tratadas.

El **Decreto 3930 de 2010** tiene como objetivo establecer las disposiciones relacionadas con el uso del recurso hídrico, el ordenamiento y los vertimientos que se realizan al suelo y al sistema de alcantarillado y que define las aguas servidas como “Residuos líquidos provenientes de uso doméstico, comercial e industrial” en su **Artículo 3**.

Este documento también presenta los usos del agua, las competencias que tienen que ver con los criterios de calidad, la regulación con los vertimientos que enmarca prohibiciones, control, responsabilidades, obligaciones y permisos que se deben tener en cuenta.

Como resultado al **Plan Nacional de Manejo de Aguas Residuales Municipales en Colombia** surge la **Resolución 1207 de 2014** emitida por el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible que adopta las disposiciones relacionadas con el uso de aguas residuales tratadas la cual ratifica en el **Artículo 6** que hace mención al aprovechamiento en actividades de uso agrícola e industrial para el agua residual tratada y el **Artículo 7** que enmarca los criterios de calidad según los usos permitidos para el reúso de aguas residuales tratadas. Lo anterior se puede evidenciar en la tabla 1, tabla 2 y la tabla 3 respectivamente.

Tabla 1. Valores máximos permisibles para reúso agrícola.

Variable	Unidad de Medida	Valor límite máximo permisible
Coliformes Fecales	NMP/100mL	100000
Enterococos fecales	NMP/100mL	100
Helminetos parásitos humanos	Huevos y Larvas/L	1
Protozoos parásitos humanos	Quistes/L	1
<i>Salmonella sp</i>	NMP/100mL	1

Fuente: Modificado de la Resolución 1207 de 2014.

Tabla 2. Valores máximos permisibles para el reúso en áreas verdes.

Variable	Unidad de Medida	Valor límite máximo permisible
Coliformes Fecales	NMP/100mL	1000
Enterococos fecales	NMP/100mL	1
Helminetos parásitos humanos	Huevos y Larvas/L	1
Protozoos parásitos humanos	Quistes/L	1
<i>Salmonella sp</i>	NMP/100mL	1

Fuente: Modificado de la resolución 1207 de 2014.

Tabla 3. Valores máximos permisibles para reúso industrial.

Variable	Unidad de Medida	Intercambio de calor en torres de enfriamiento o calderas	Descargas de aparatos sanitarios	Limpieza mecánica de vías y riego de vías para control de MP	Sistemas de redes contra incendios
Coliformes Fecales	NMP/100 mL	1000	10000	1000	1
Helmintos parásitos humanos	Huevos y Larvas/L	0,1	1	1	0,1
Protozoos parásitos humanos	Quistes/L	0	1	1	1
<i>Salmonella sp</i>	NMP/100 mL	1	1	1	1

Fuente: Modificada de la resolución 1207 de 2014.

### Normativa internacional.

La base para la implementación de la normativa en varios países en todo el mundo respecto al uso de aguas residuales es proporcionada por la Organización Mundial de la Salud (OMS) y la Organización para las Naciones Unidas para la alimentación y la agricultura (FAO) donde se establece el uso seguro de las aguas servidas y que son el resultado de una revisión de estándares de calidad para el 2006.

Las anteriores son herramientas para el manejo preventivo de las aguas residuales en la agricultura con el fin de maximizar la seguridad pública. La guía no da valores para patógenos virales, bacterias o protozoarios, solo establece valores máximos permisibles para huevos helmintos con un valor <1h/L. Estos valores son únicamente para riego por goteo en cultivos de alto crecimiento. Sin embargo, las directrices sanitarias sobre el uso de aguas residuales en agricultura y acuicultura para 1989 establece valores máximos permisibles para el riego de cultivos que comúnmente se consumen crudos, campos de deporte y parques públicos con valores para nemátodos intestinales < 1 h/L y coliformes totales <1000 NMP/100 ml. Algunos países han realizado mayores avances en normatividad como por ejemplo España, que fue el primer país en contemplar en sus disposiciones la utilización de las aguas residuales tratadas para 1985 mediante la ley de aguas, sin embargo, para 2007 en el **Real Decreto 1620** que establece el régimen jurídico de la reutilización de aguas depuradas y que consagra en el Artículo 11 los criterios de calidad para la reutilización de las aguas según sus usos así:

Tabla 4. Valores máximos permisibles para el reúso de aguas.

Uso del agua previsto	Nematodos Intestinales	<i>Escherichia coli</i>
RESIDENCIAL	1Huevo /10L	0 UFC/100mL
DE SERVICIOS	1Huevo /10L	200 UFC/100mL

Fuente: Modificado del real decreto 1620 de 2007.

En Latinoamérica, México ha sido uno de los países con mayor avance respecto a investigación y normativa del reúso de aguas residuales (Dueñas, Amaya & Donado, 2015). Dentro de su regulación, se

prioriza la Norma Oficial Mexicana **NOM-003-ECOL-1997** la cual establece los límites máximos permisibles de contaminantes en aguas tratadas que se reúsen en servicio al público. Lo anterior se puede evidenciar en la tabla 5.

*Tabla 5. Límites máximos permisibles de contaminantes en aguas tratadas según el tipo de reúso.*

<b>Tipo de reúso</b>	<b>Coliformes fecales NMP/100 mL</b>	<b>Huevos de helminto (h/L)</b>
Servicios al público con contacto directo	240	1
Servicios al público con contacto indirecto	1000	5

Fuente: Modificado de la norma oficial Mexicana NOM-003-ECOL-199.

### **Marco Institucional y geográfico.**

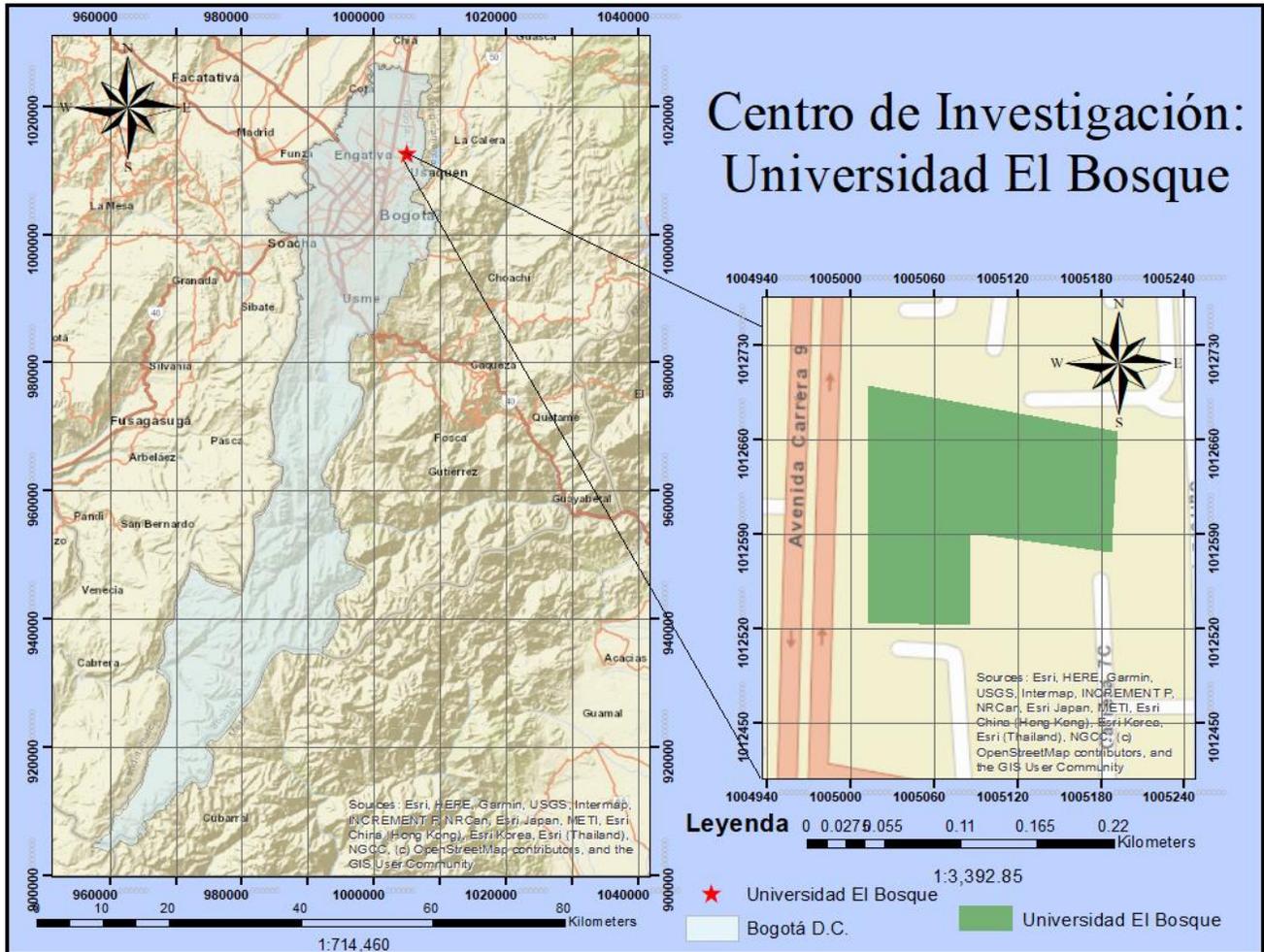
La **Universidad El Bosque** junto con la vicerrectoría de investigación han logrado gestionar la ejecución de trescientos setenta y siete proyectos de distintas áreas de investigación mediante la convocatoria interna y que para el 2017 de acuerdo con el ranking nacional que integraba a instituciones relacionadas con la investigación ocupó el número ocho a nivel nacional (Universidad del Bosque, 2018).

Este centro de investigación cuenta con una editorial que es reconocida por Colciencias desde el año 2013 y que cuatro años después tuvo 32 publicaciones que iban desde libros de investigación pasando por libros de texto, traducciones hasta manuales (Universidad del Bosque, 2018). Para el análisis que se llevó a cabo sirvió como centro de investigación donde se consultaron los artículos en bases de datos a nivel nacional e internacional y que se encuentra representado en la figura 6.

La Universidad tiene 112 programas académicos donde 13 son acreditados de alta calidad, 28 pertenecen a pregrados, 84 a posgrados, 67 especializaciones, 14 maestrías y tres doctorados (Ciencias Biomédicas, Salud Pública y Bioética). Los estudiantes gozan de dos instalaciones ubicadas en el norte de la ciudad y una en cercanías al municipio de Chía, la primera cuenta con un área construida de 52375,52 m<sup>2</sup> y la segunda con 4888,67 m<sup>2</sup> para un total de área construida de 114.585,85 m<sup>2</sup> (Universidad del Bosque, 2018).

Actualmente la Universidad cuenta con el sello de alta calidad otorgado por el Ministerio de Educación mediante la Resolución 11373 del 10 de Julio del 2016 con una planta de docentes de 1719 y 450 administrativos, de los primeros 826 son mujeres y 893 hombres, mientras que para los administrativos 170 son mujeres y 280 hombres. El 60% de los docentes poseen estudios de maestría y doctorado, los cuales logran crear 70 semilleros de investigación una patente, 48 grupos de investigación reconocidos por Colciencias y 375 publicación indexadas con impacto (Universidad del Bosque, 2018).

Figura 6. Ubicación del Centro de Investigación.



Fuente: Autores, 2019.

Este lugar está ubicado en la ciudad de Bogotá en Colombia y que sus direcciones hacia el norte colindan con la calle 138, al oriente con carrera 7ma, al sur con la calle 128 y al occidente con la Avenida Calle 9na como se puede apreciar en la figura 5. La Universidad El Bosque a su vez cumple como marco geográfico pues es lugar donde se realiza toda la investigación.

## METODOLOGÍA

Esta investigación fue de tipo teórico descriptivo documental, que planteó un procedimiento de rastreo o búsqueda, organización, evaluación y análisis de un conjunto de documentos físicos y electrónicos nacionales e internacionales sobre estudios realizados acerca de la remoción de microorganismos indicadores de la calidad del agua, evaluados en humedales artificiales de flujo subsuperficial para aguas residuales domésticas. Esta investigación tuvo un enfoque cuantitativo, ya que mantuvo un orden secuencial y riguroso con el propósito de resolver un problema de estudio concreto y delimitado, basado en hipótesis y variables medibles en un periodo de tiempo determinado (Hernández, Fernández & Baptista, 2006).

El alcance de esta investigación fue de tipo exploratorio descriptivo que logró examinar un problema de investigación del cual no se encontró suficiente información disponible en la literatura científica publicada. También logró describir procesos y fenómenos especificando propiedades de las diferentes combinaciones realizadas en los humedales artificiales de flujo subsuperficial, mediante la recolección de información de manera conjunta para la explicación de variables previamente establecidas (Hernández, Fernández & Baptista, 2006).

La primera fase consistió en plantear el problema que se investigó y que resultó esencial para determinar el enfoque con el que se dirigió. Lo anterior se obtuvo planteando preguntas claramente delimitadas expresadas sobre premisas relacionadas con la eficiencia que tienen los HAFS para disminuir la carga microbiana como indicador microbiológico de la calidad del agua, evaluadas en las aguas residuales domésticas. Para establecer el alcance de esta investigación, fue necesario conocer el avance que se tiene respecto a los estudios realizados sobre los HAFS como tecnología para la remoción de los indicadores microbiológicos mediante el siguiente procedimiento.

### ***Búsqueda y selección de los estudios***

Los documentos electrónicos fueron encontrados mediante bases de datos de artículos científicos, de tesis de pregrado y tesis doctorales tales como Science direct, ProQuest Central, Dialnet, el motor de búsqueda de Google Académico y el de la biblioteca de la Universidad El Bosque Juan Roa Vásquez, por medio de conectores como: “AND”, “OR”, “IS” y “AND NOT”. Mientras que los documentos físicos fueron obtenidos solo por la biblioteca.

Los filtros aplicados para búsqueda y selección de los estudios fueron el periodo comprendido entre los años 2010-2019 para el análisis de la eficiencia y la comparación con otras tecnologías de tratamiento biológicos de aguas domésticas y el idioma de los mismos. Para encontrar artículos que lograran acomodarse a la investigación fue necesario utilizar descriptores en idioma español tales como “Humedales Artificiales” “ARD” “Indicadores” “Aguas residuales domésticas” “Microorganismos indicadores” “Remoción”, buscados en el idioma inglés y posteriormente traducidos.

Las consultas realizadas en cada uno de los motores de búsqueda utilizando las directrices anteriormente mencionadas arrojaron un número bastante amplio, lo que ayudó a encontrar otro tipo de estrategias para lograr encontrar documentos más acordes a la problemática analizada, como el hecho de verificar cada tabla reportada, la introducción y las diferentes discusiones planteadas por los diferentes autores. En la tabla 6 se evidencian los resultados obtenidos por cada una de las consultas en idioma español e inglés abarcando todos los años encontrados. Los años encontrados antes del año 2010 se utilizaron para realizar los marcos de referencia, al igual que algunos que se encuentran en el rango de años. En la tabla 7 se encuentran la cantidad de consultas realizadas que hacen referencia a los documentos encontrados mediante los diferentes gestores de búsquedas utilizados durante la investigación

Tabla 6. Consultas realizadas en los motores de búsquedas con descriptores.

Motores de Búsquedas	Artículos científicos	Tesis de Pregrado	Libros
Google Académico	7	8	15
Science Direct	24	0	0
ProQuest Central	15	0	0
Dialnet	0	20	0
Biblioteca Juan Roa Vásquez	1	0	7

Fuente: Autores, 2019.

Las fechas de las publicaciones de los documentos encontrados se encuentran en la Tabla 7 donde se establecen periodos de 5 años, siendo el 2000 la fecha del documento más antigua y 2019 para el más reciente. La cantidad de los documentos se encuentra dividida por el tipo de documentos los cuales hacen referencia a artículos científicos, tesis de pregrado, libros electrónicos y físicos.

Tabla 7. Cantidad de documentos encontrados por motores de búsqueda.

Documentos	Años			
	2000 - 2005	2006-2010	2011-2015	2016-2020
Artículos científicos	5	5	20	15
Tesis de Pregrado	3	10	15	0
Libros Electrónicos	17	2	2	0
Libros Físicos	0	0	1	0

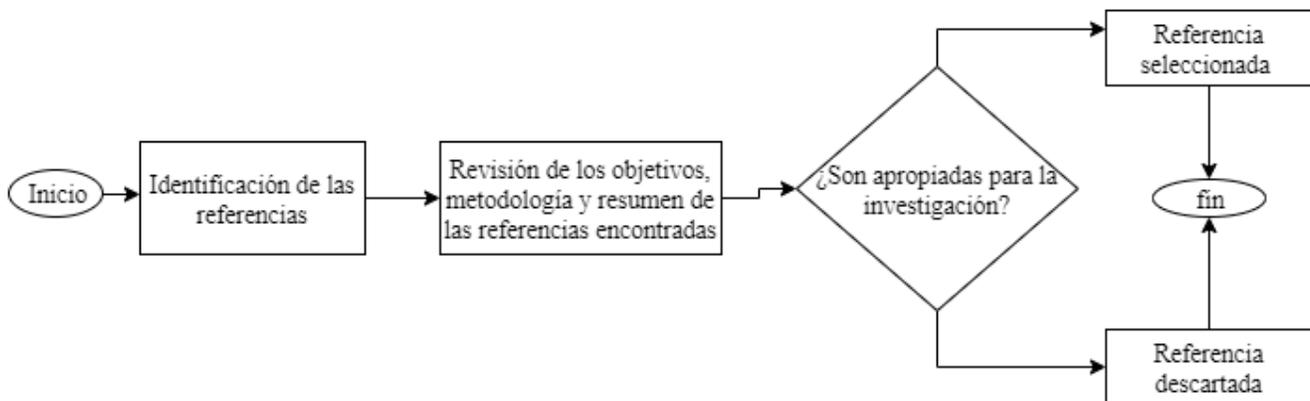
Fuente: Autores, 2019.

### Selección de referencias

Otras de las directrices que se tuvieron en cuenta para lograr filtrar de manera eficaz los artículos acordes a la investigación fue la lectura crítica de la metodología, resumen y de objetivos de cada uno de ellos con el fin de determinar cuales se relacionaban con la investigación. La siguiente figura muestra el proceso realizado.

Figura 7. Evaluación de la calidad de los estudios.

Fuente: Autores, 2019.



Se encontraron en total 97 documentos referentes a artículos científicos que fueron filtrados con las diferentes palabras clave puestas en cada uno de los gestores. La tabla 8 muestra la cantidad de documentos hallados por cada motor de búsqueda realizados para reportar los diferentes resultados. Esta

investigación tuvo en cuenta sólo documentos científicos reportados en revistas de investigación reconocidas a nivel mundial publicados en el idioma inglés, con el fin de obtener los resultados y generar una discusión. Lo anterior se encuentra expuesto en la tabla 9.

Tabla 8. Cantidad de documentos para resultados por motor de búsqueda.

<b>Motores de Búsquedas</b>	<b>Artículos científicos</b>	<b>Tesis de Pregrado</b>	<b>Libros</b>
Google Académico	20	0	5
Science Direct	20	0	0
ProQuest Central	7	0	0
Dialnet	0	0	0
Biblioteca Juan Roa Vásquez	0	0	0

Fuente: Autores, 2019.

Tabla 9. Artículos seleccionados por motor de búsqueda.

<b>Motores de búsqueda</b>	<b>Artículos científicos</b>	<b>Idioma</b>
Google Académico	20	
Science Direct	20	
ProQuest Central	7	Inglés
Dialnet	0	
Biblioteca Juan Roa Vásquez	0	

Fuente: Autores, 2019.

### **Recopilación de datos**

Luego de clasificadas las referencias que pueden ser apropiadas, en esta fase se extrae la información requerida para la investigación, es decir, si dentro del artículo se encuentra información relacionada con las diferentes temáticas de la investigación, como las configuraciones de los HAFS para la remoción de indicadores, la eficiencia reportada en los mismos y tipos de indicadores removidos, lo anterior se registra en la tabla 10 con el fin de otorgar importancia a cada una de las referencias.

Tabla 10. Registro de referencias.

\*In: Concentración Inicial: Fi: Concentración Final

Fuente: Autores, 2019.

La recopilación de datos no solo hace referencia a las concentraciones iniciales y finales de los reportes realizados, sino también las eficiencias que hay en cada uno de ellos. Para el registro de estos datos se

realiza una tabla similar a la descrita anteriormente y que se puede apreciar en la tabla 11 registros de eficiencias.

Tabla 11. Registro de la eficiencia.

Macrófitas	Indicador microbiológico 1		Indicador microbiológico 2		Indicador microbiológico 3		Reporta
	In	Fi	In	Fi	In	Fi	
*In: <i>Tipo de planta utilizada en el reporte.</i>	Concentración Inicial del indicador microbiológico 1.	Concentración Final del indicador microbiológico 1.					Cita bibliográfica del reporte.

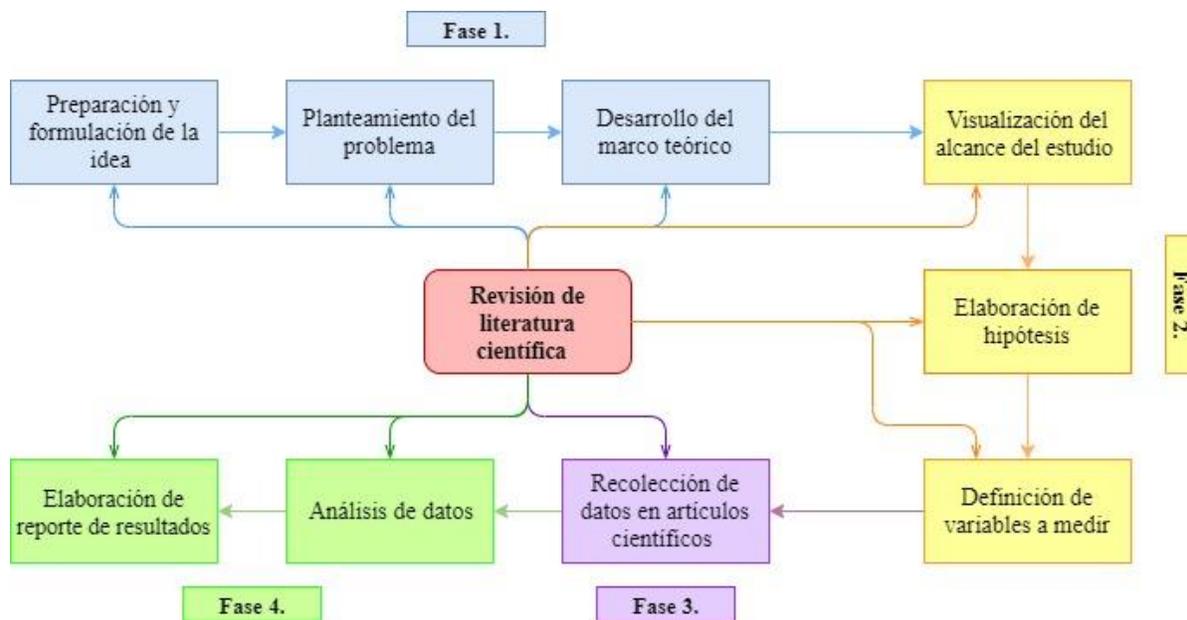
Concentración Inicial: Fi: Concentración Final.  
Fuente: Autores, 2019.

### Análisis de la información

Una vez organizadas las referencias y teniendo en cuenta el orden de importancia se realiza una lectura crítica de cada una de ellas para luego elaborar un texto argumentativo que responda a la pregunta de investigación y a cada uno de los objetivos planteados con el fin de otorgar información valiosa para desarrollo de un HAFS que se requiera para el tratamiento de indicadores microbiológicos de la calidad del agua.

Macrófitas	Indicador microbiológico 1		Indicador microbiológico 2		Indicador microbiológico 3		Reporta
	Eficiencia (%)		In	Fi	In	Fi	
<i>Tipo de planta utilizada en el reporte.</i>	concentraciones reportadas así						Cita bibliográfica del reporte.
	$\frac{In - Fi}{In} \times 100$						

Figura 8. Diagrama de fases de la investigación.



Fuente: Modificado de Hernández, Fernández & Baptista, 2006.

La primera fase de esta investigación hace referencia a la búsqueda y selección de los estudios de los cuales se desarrolla el marco teórico que sirve como sustento para determinar el alcance de la investigación, sin embargo, lo preceden la preparación y formulación de la idea junto con el planteamiento del problema de la investigación. La calidad de los estudios pertenece a la segunda fase donde se establece el alcance del estudio, las variables a medir y la elaboración de la hipótesis. La recolección de los datos pertenece a la tercera fase, mientras que el análisis de la información pertenece a la última fase donde se analizan los datos y se elabora el reporte de los resultados. Lo anterior se puede evidenciar en la figura 8.

En la tabla 12 se observan las diferentes fases, actividades, técnicas e instrumentos de cada uno de los objetivos específicos enmarcados en uno general. Todos estos objetivos compartieron una técnica documental que tuvo sus bases en hallar respuesta a diferentes planteamientos gracias a la revisión de literatura científica aplicada a un problema de investigación. Los instrumentos variaron dependiendo la fase en la que se llevaba la investigación, sin embargo, un factor común de estas fueron los artículos científicos.

Tabla 12. Matriz de objetivos.

Objetivo general	Objetivos específicos	Fase	Actividad	Técnica	Instrumento	Resultado esperado
Establecer el potencial de los humedales artificiales de flujo subsuperficial (HAFS), para la remoción de contaminantes microbiológicos de aguas residuales domésticas mediante revisión sistemática de literatura científica.	Describir los principales mecanismos de remoción de contaminantes microbiológicos asociados a sistemas HAFS.	Recolección de información.	Revisión de bibliografía científica aplicada.		Gestores de búsqueda y artículos científicos.	Caracterización de los artículos relacionados a los mecanismos de remoción de contaminantes microbiológicos.
		Filtración de información.	Lectura crítica de la literatura seleccionada.	Técnica documental.	Artículos científicos seleccionados.	Determinación de los mecanismos más importantes para la remoción de patógenos en HAFS.
		Reporte de resultados.	Elaboración de texto argumentativo.		Artículos científicos seleccionados.	Reporte de los procesos principales de remoción de contaminantes microbiológicos asociados a los HAFS.
	Determinar los factores que favorecen la remoción de contaminantes microbiológicos en un HAFS tratando aguas residuales domésticas.	Filtración de información.	Revisión de bibliografía de literatura científica aplicada.	Técnica documental.	Gestores de búsqueda y artículos científicos.	Identificación de los factores que favorecen procesos de remoción de contaminantes en HAFS.
		Reporte de resultados.	Elaboración de texto argumentativo.		Artículos científicos seleccionados y gestores de búsqueda.	Reporte de factores que favorecen remoción de patógenos en HAFS

---

<p>Establecer, mediante revisión de literatura científica reciente, las eficiencias de remoción de contaminantes microbiológicos en diversas configuraciones de humedales artificiales de flujo subsuperficial.</p>	<p>Filtración de información</p> <p>Reporte de resultados.</p>	<p>Revisión de normativa relacionada a las aguas de reúso.</p> <p>Comparación de las eficiencias obtenidas con la normativa nacional e internacional</p>	<p>Técnica documental.</p>	<p>Gestores de búsqueda y artículos científicos</p> <p>Artículos científicos, documentos con normativa ambiental relacionada al problema de investigación</p>	<p>Normativa nacional e internacional con valores máximos permisibles para patógenos en aguas de reúso.</p> <p>Tabla comparativa y análisis de eficiencias de los HAFS en la remoción de patógenos para aguas de reúso.</p>
---	--	--	----------------------------	---	---

---

Fuente: Autores, 2019.

## RESULTADOS Y ANÁLISIS

### *Mecanismos de remoción de contaminantes microbiológicos*

El proceso de eliminación de patógenos presentes en aguas residuales es complejo ya que se ve afectado por características tales como el tiempo de retención hidráulico, el régimen de agua, la vegetación y la composición de la misma (Wu, Carvalho, Müller, Remony & Dong, 2016). Los mecanismos utilizados con mayor frecuencia en humedales artificiales para la disminución de la carga microbiana hacen referencia a la depredación, sedimentación, filtración y adsorción (Shingar, Thawale, Raghunathan, Mishra & Kumar, 2019). Sin embargo, estos mecanismos no son los únicos empleados por estos sistemas, ya que como lo establece Alexandros y Akratos (2016), los procesos pueden ir desde físicos hasta biológicos como se muestra en la tabla 13. Autores como Morató, Codony, Sánchez, Martín, García & Mas (2014) aseguran que se posee limitada información acerca del destino de las posibles bacterias patógenas en humedales artificiales.

*Tabla 13. Mecanismos de remoción de patógenos en humedales artificiales.*

<b>Mecanismo de remoción</b>	<b>Proceso de remoción</b>
Físicos	Sedimentación
Químicos	Filtración
	Oxidación
	Radiación solar Ultravioleta
Biológicos	Actividad de depredación
	Exposición a exudados de plantas
	Muerte natural

Fuente: Modificado de Alexandros & Akratos, 2016.

En humedales artificiales de flujo subsuperficial, los procesos que se desarrollan de manera aeróbica están presentes en cercanías a las raíces de las plantas, así como en la superficie de las mismas. Los pelos radiculares y las raicillas de las plantas proporcionan un ambiente aeróbico que facilita la descomposición de la materia orgánica y las sustancias inorgánicas (Mthembu, Odinga, Swalaha & Bux, 2013). Los principales procesos de remoción pertenecientes a los mecanismos de remoción físicos, químicos y biológicos utilizados en humedales artificiales de flujo subsuperficial se describen a continuación.

#### *Sedimentación*

Es uno de los procesos pertenecientes a los mecanismos físicos de remoción de patógenos obedeciendo a la ley de Stokes que se basa principalmente en el proceso en que las partículas se depositan en el fondo del sistema, aumentado su eficiencia el diámetro y el peso específico comparado con el líquido que transporta la partícula (Delgadillo, Camacho, Pérez & Andrade, 2010). Sin embargo, la sedimentación de los microorganismos también depende de la velocidad de asentamiento, el tiempo que pase en el sistema y la capacidad que tiene el sustrato de lograr unirse a la columna de agua (Alufasi, Gere, Chakauya, Lebea, Parawira & Chingwaru, 2017).

La gravedad contribuye a que las partículas que se encuentran suspendidas se localicen en la parte inferior del sistema. Algunos patógenos como bacterias y protozoos deben estar sujetas a partículas

mucho más densas o agregados que luego forman flóculos que se depositan rápidamente al interior del sistema mediante este proceso físico (López, Leiva, Arismendi & Vidal, 2019).

Este proceso ha demostrado ser un mecanismo de eliminación que está controlado por los sedimentos y el tamaño de los granos de los medios utilizados en el sustrato del humedal artificial. Las tasas de sedimentación más altas dependen directamente del tamaño, es decir, a mayor tamaño, mayor eficiencia de remoción de patógenos. En general, los sistemas de flujo subsuperficial por los distintos procesos que se llevan a cabo dentro de los mismos tienden a eliminar más bacterias a diferencias de los otros tipos de flujos (García, Paredes & Cubillos, 2013). Los componentes físicos de los HAFS como las macrófitas juegan un papel importante ya que el tejido vegetal dentro del sistema actúa como medio que reduce la velocidad del agua y por lo tanto mejora la sedimentación (Saeed & Sun, 2012).

### *Filtración*

Por lo general es uno de los pasos de pretratamiento que contribuye a la eliminación de ciertos patógenos. Consiste en el paso del agua contaminada a través de los diferentes materiales de construcción de los humedales y las raíces de las plantas (Alexandros & Akratos, 2016). Los tamaños granulares del material usado dentro del sistema y el tipo de macrófitas son factores claves en el proceso de eliminación (Alufasi, et al., 2017).

La matriz suelo, juega un papel importante en la remoción de patógenos, sin embargo, por sí sola no es totalmente eficiente para poder reutilizar el agua tratada, es por esto por lo que se hace necesario incluir dentro del sistema grava, arena u otro tipo de material que logre crear espacios muchos más pequeños con el fin de remover cantidades significativas de microorganismos (López, Leiva, Arismendi & Vidal, 2019). Las plantas a su vez proporcionan filtración de tipo físico mediante los sistemas de raíces, formación de biopelículas y una gran área de gran superficie para la unión de los microorganismos (Alufasi, et al., 2017).

La filtración es el mecanismo principal de eliminación de algunos indicadores tales como *Escherichia coli*, coliformes totales, *Streptococcus faecalis* y *Enterococos*, sin embargo, los humedales de flujo subterráneo tienden a eliminar más bacterias a través de este proceso ya que en algunos casos son construidos con materiales mucho más pequeños que proporcionan mayores eficiencias de remoción (Alexandros & Akratos, 2016).

### *Oxidación*

Los diferentes tipos de plantas que se utilizan en los humedales artificiales proporcionan pequeños ambientes aeróbicos dentro del sistema, ya que estas que son capaces de transferir oxígeno de la atmósfera y exudarlo por las raíces de la misma. Las bacterias coliformes y las entéricas son anaeróbicas facultativas, así que al aumentar la concentración de oxígeno en el sistema aumenta la eliminación de algunos patógenos (Alufasi, et al., 2017).

Las tasas de oxígeno de las raíces en los humedales artificiales dependen casi siempre de la concentración interna de oxígeno, la demanda de oxígeno del medio y la permeabilidad que tienen todas las paredes de las raíces. La disponibilidad de oxígeno apoya la oxidación del amoníaco o nitrificación y la descomposición aeróbica de sustancias orgánicas junto con la formación de precipitados de hidróxidos de hierro y manganeso que adicionalmente pueden coprecipitar metales pesados (Vymazal, 2011).

### *Radiación Ultravioleta (UV)*

Aunque el tratamiento o inactivación de microorganismos patógenos mediante la radiación ultravioleta no aplique para los humedales artificiales de flujo subsuperficial, es importante conocer el funcionamiento del mismo. La eliminación de bacterias coliformes presenta sus eficiencias más altas, cuando se exponen directamente a rayos UV y a elevadas concentraciones de oxígeno disuelto en el agua (Alexandros & Akratos,2016).

La función que tienen los rayos UV sobre los patógenos presentes en aguas tratadas por humedales artificiales es formar nuevos enlaces en el ADN y ARN. Se ha demostrado que longitudes de ondas cercanas a la mitad de la radiación UV entre 290 y 320 nm y cercanas a las mismas, entre 320 y 400 nm son letales para el crecimiento de dichas bacterias. (Alexandros & Akratos, 2016). En promedio para humedales artificiales de flujo superficial o libre según Alufasi et al. (2017) el porcentaje de remoción puede llegar hasta un 72 %, sin embargo, la intensidad solar juega un papel importante, pues a mayor exposición mayor probabilidad de eliminación.

La penetración de la luz ultravioleta a la columna de agua de los humedales se ve interrumpida por el componente de la vegetación, así como lo demuestra Wu, Carvalho, Müller, Remony & Dong (2016) que encontró una reducción significativa para *E. coli* por verse interrumpido el paso de la luz por parte de la lenteja de agua o *Lemna sp.* No se encontró información acerca de la predicción del destino de los diferentes indicadores microbiológicos en los HAFS.

### *Depredación*

El pastoreo por ciliados y flagelados de protozoos o depredación, hace referencia a la eliminación de bacterias patógenas mediante protozoos o en algunos casos por bacteriófagos y organismos similares (Alexandros & Akratos,2016). La depredación se ve afectada por las características de las bacterias que son depredadas, la densidad de la población y las especies de bacterianas. Sin embargo, la eficiencia de remoción también se ve influenciada por la morfología y fisiología del depredador (Alufasi et al., 2017).

Este método puede llegar a proporcionar un ambiente óptimo para la eliminación de microorganismos indicadores de la calidad de agua, sin embargo, se desconoce en algunos casos la viabilidad de los organismos después de la ingestión. Existe evidencia de que algunas bacterias depredadoras no inactivan a microorganismos patógenos como resultado de la ingestión de protozoos como los ciliados y las amebas (Wu, et al., 2016).

### *Exudados*

Las raíces de las plantas son las encargadas de liberar una amplia gama de compuestos denominados exudados, estos tipos de compuestos juegan un papel fundamental en la regulación de la biota microbiana y su función en los humedales artificiales (Alufasi, et al.,2017). Dichas sustancias que son liberadas a través de la raíz son compuestos orgánicos como metabolitos anaerobios, alcaloides o esteroides (Vymazal,2011).

La cantidad y la calidad de los compuestos encargados de disminuir las concentraciones de organismos en los humedales artificiales dependen de las especies de plantas, la etapa de desarrollo y factores ambientales importantes como el pH, la temperatura y el tipo de suelo. Además de los factores ambientales es importante resaltar que algunas plantas excretan este tipo de exudados cuando se estimulan a moléculas específicas, tal es el caso de la *Ocimum basilicum* o albahaca dulce que al ser

infectada por *Pseudomonas aeruginosa* libera el ácido rosmarínico que se encarga de inhibir el crecimiento de estos patógenos (Alufasi, et al.,2017).

La liberación de exudados no solo es tóxica para los microorganismos patógenos, sino que suele alterar las características físicas y químicas propias de la rizosfera, produciendo así un ambiente nocivo para el desarrollo de otro tipo de microorganismos (Wu, et al., 2016). Las plantas no solo secretan este tipo de exudados, sino que, producen compuestos que crean biopelículas, las cuales influyen de una manera eficaz la disminución en la carga microbiana mediante procesos físicos como la sedimentación, la adsorción y la eliminación natural (Vymazal, 2011).

### *Muerte Natural*

La eficiencia de este mecanismo de eliminación de bacterias patógenas es superior en sistemas de flujo superficial sobre todo para la eliminación de bacterias coliformes. Este mecanismo es el resultado de muchos procesos de inactivación que se ven influenciados por factores como la depredación, la inanición y estresores físicos y químicos (Wu, et al., 2016). Además de los mecanismos de eliminación este proceso también se ve influenciado por factores ambientales como la temperatura, el pH y el oxígeno disuelto en el agua (Días,Passos & Spring, 2017).

### *Factores que favorecen la remoción de contaminantes microbiológicos*

Diferentes han sido los autores que han demostrado la eficiencia de los humedales artificiales de flujo subsuperficial en varias combinaciones de macrófitas y parámetros de diseño para la remoción de indicadores microbiológicos de la calidad del agua. Para la discusión de esta investigación se tuvo en cuenta la eficiencia de remoción de indicadores tales como Coliformes Totales, Coliformes fecales, *Escherichia coli*, *Streptococcus Faecalis* y *Salmonella* e indicadores químicos como la Demanda Química de Oxígeno (DQO) y Demanda Biológica de Oxígeno (DBO<sub>5</sub>), realizados en experimentos reportados en artículos científicos y publicados en revistas científicas, los cuales fueron filtrados en los motores de búsqueda.

Si bien es cierto que la combinación de diferentes parámetros de diseño juega un papel importante en la remoción de indicadores microbiológicos de la calidad del agua, las macrófitas que se utilizan logran alcanzar un mayor porcentaje de eficiencia en comparación con aquellos sistemas que no están plantados (Vymazal,2011). En la tabla 14 se reportan las macrófitas utilizadas que tienen diferentes efectos en la remoción de DBO<sub>5</sub>, DQO y Coliformes Fecales.

*Tabla 14. Efectos de las macrófitas en la remoción de DBO<sub>5</sub>, DQO y CF.*

<b>Macrófitas</b>	<b>Países</b>	<b>Indicadores</b>			<b>Efecto</b>
		<b>DBO<sub>5</sub></b>	<b>DQO</b>	<b>CF</b>	
<i>Typha latifolia</i>	Brasil	x	x	x	Positivo
	Canadá	x	x		
	España	x		x	
	Tanzania		x		
	U.S.A.	x			
<i>Phragmites australis</i>	Canadá	x	x		Sin efecto
	Alemania			x	Positivo

	México		x	Positivo
<i>Coix lacryma-jobi</i>	Costa Rica	x	x	Positivo
<i>Arundo donax</i>	Marruecos		x	Positivo
<i>Phragmites karka</i>	Nepal	x	x	Positivo
<i>Scirpus validus</i>	Nueva Zelanda	x	x	Sin efecto
<i>Festuca arundinaceae</i>	U.S.A.	x		Positivo

Fuente: Modificado de Vymazal, 2013.

**CF: Coliformes Fecales**

**DBO<sub>5</sub>: Demanda Biológica de Oxígeno**

**DQO: Demanda Química de Oxígeno**

Autores como Karimi, Hassan & Hossin (2014) realizaron la construcción a escala piloto de un humedal artificial de flujo subsuperficial para reducir las concentraciones de *Escherichia coli*, mientras que, Headley, Nivala, Kassa, Olsson, Wallace, Brix, Afferden, Müller (2013) diseñaron sistemas enfocados a remover partículas, materia orgánica y Nitrógeno para lograr también disminuir concentraciones significativas de este patógeno. En 2014 se trataron  $14m^3/d$  con una temperatura promedio de  $15.95^{\circ}C$  una conductividad eléctrica de  $1714 \mu S/cm$  una concentración de DBO<sub>5</sub> de 176.6 mg/L y 385.6 mg/L para DQO en aguas residuales domésticas.

A pesar de llegar a una remoción cerca de 50% en concentraciones de este patógeno para Karimi et al. (2014) en caso de querer llegar a una remoción mayor es necesario aumentar el tiempo de retención hidráulico y lograr sedimentar los sólidos en suspensión que se encuentren en el sistema. También asegura que la caza y la mortalidad de este patógeno también se puede dar en humedales artificiales de flujo subsuperficial. Estos dos autores comparten parámetros de diseño similares como el hecho de tener un tanque sedimentador como primer proceso y un sistema plantado con un tipo de macrófita.

Headley et al. (2013) llegaron a obtener eficiencias cercanas al 99% y aseguraron que los humedales artificiales son eficientes en la remoción de este patógeno para velocidades superiores de 96 L/ d. Sin embargo, la reducción más alta de las concentraciones de *Escherichia coli* en este estudio se dieron en condiciones ambientales de temperatura inferiores a  $5^{\circ}C$  que, de acuerdo con lo realizado para la investigación de 2014 por Karimi et al. (2014) aseguran que no solo la temperatura hace parte de un factor fundamental para crear ambientes desfavorables en el crecimiento de este patógeno, sino que el lecho filtrante que se utiliza es el factor diferenciador.

Las principales vías de eliminación de *E.coli* en humedales artificiales de flujo subsuperficial están asociadas a procesos físicos, como la sedimentación y el atrapamiento de biopelículas unidas al sustrato, sin embargo, los procesos biológicos como la depredación y competencia por microorganismos como los protozoos también ayudan a lograr eficiencias cercanas al 100% (Headley et al., 2013). Según Choudhary, Kumar & Chhaya, 2011 otro de los parámetros de diseño más eficientes para la remoción de este tipo de microorganismos es el sustrato poroso que varía de rocas, gravas o tierra de diferentes tamaños o una combinación de las mismas. Este mecanismo logra junto con las raíces de las plantas y la gravedad, sedimentar sólidos a los cuales se adhieren una gran cantidad de microorganismos (Mairi, Lyimo & Njau, 2012).

La eficiencia de la combinación de sustratos porosos para la remoción de *E. coli* la confirma Karimi, et al. (2014) cuando logra llegar a una eficiencia de remoción del 99% acoplando diferentes tamaños de

gravas que van desde 0.2 mm hasta 100 mm a una altura de 30 cm, sin embargo, como material receptor primario utilizaron arenas con tamaño grueso de 10 cm para lograr altas velocidades en el interior del humedal. La adherencia de *E. coli* a partículas mucho más grandes se realiza en la primera etapa del sistema artificial predominantemente en flujos anaeróbicos logrando reducir aproximadamente el 50% de las bacterias entrantes (Días, Passos & Sperling, 2017).

Aunque *E.coli* se puede eliminar mediante la sedimentación, gracias a que se logran adherir no solo a sólidos sino a materia orgánica en partículas, su remoción puede disminuir cuando el efluente a tratar contiene grandes concentraciones de sólidos suspendidos totales. Las eficiencias aumentan cuando se forman flóculos resultando un aumento en el peso del microorganismo cuando se une a un sólido suspendidos en el sistema (Días, Passos & Sperling, 2017).

Chang, et al., 2011 es el único que logra reducir de manera significativa *E. coli* cuando reporta <1 UFC/100 gracias a la macrófita *Canna Flaccida*, pues esta planta genera una biopelícula alrededor de la rizosfera, representando un lugar para que las bacterias logren la nitrificación junto con la disminución de los orgánicos solubles de manera aeróbica. Aseguran que alrededor de la raíz de las plantas, se presentan una serie de unidades de procesamiento aeróbico, anóxico y anaeróbico. La presencia de oxígeno cerca al ápice de la raíz impulsa a la nitrificación y las áreas anaeróbicas para la desnitrificación que limpian el nitrógeno residual en el afluente séptico.

En la remoción de contaminantes se utilizan diferentes tipos de macrófitas con el fin de lograr una mayor aireación en el sistema, la macrófita más utilizada hace referencia a *Phragmites australis* que es una hierba perenne tolerante a inundaciones con un crecimiento de raíz que puede llegar a penetrar generalmente de 0.6 m a 1 m. Se utiliza porque sus tallos son rígidos con un rango de altura de 0.5 m, aunque algunas veces puedan llegar a una altura máxima de 5m (Vymazal, 2011). Otros autores como Morató, Codony, Sánchez, Pérez, García & Mas (2014) obtuvieron eficiencias del 99% en la remoción de *Escherichia coli* gracias al tiempo de retención hidráulica (TRH) pues de acuerdo con Wu, Carvalho, Muller, Remony & Dong (2016) la importancia del TRH en la eliminación de bacterias indicadoras de contaminación, aumenta la exposición de las bacterias a procesos de eliminación como la sedimentación, la adsorción de materia orgánica, la depredación y el impacto de las toxinas de microorganismos y las plantas.

El TRH es un factor fundamental para la remoción de indicadores de la calidad del agua que depende del tipo de lecho, las raíces o la cantidad de macrófitas presentes en el sistema y la pendiente del mismo. No obstante, Headley et al. (2013) asegura que la profundidad del sistema y las velocidades de flujo aumentan la probabilidad de lograr sedimentar partículas más pesadas, pues en los análisis realizados dichos parámetros de diseño ayudan a la disminución de la carga microbiana con la que se cuenta al inicio del sistema.

Chang, Xuan, Dranpob & Wanielista (2011) lograron una eficiencia del 99.9% obteniendo como resultado concentraciones inferiores a 1 UFC/100ml para *E. coli*, gracias a la utilización de la planta *Canna Flaccida* y a la combinación de tamaños de gravas y arenas en el medio poroso del humedal artificial. Otro factor diferenciador es el oxígeno disuelto en el agua. Lo anterior lo confirma Vymazal (2011) cuando asegura que, al tener concentraciones elevadas de oxígeno en el agua, los espacios porosos del sistema crean ambientes aeróbicos, gracias a las tasas de liberación de las planas que son generalmente más altas en la parte superior del ápice de la raíz cuando se encuentran inmersas en el lecho filtrante del sistema.

En los HAFS no solo se logran remover patógenos como *Escherichia coli* sino también *Streptococcus faecalis* y coliformes totales, estos tipos de organismos se ven afectados por procesos físicos como la filtración y la retención en las raíces de las plantas. Karimi, Hassan & Hossin (2014) aseguran que, en la realización de la investigación, estos microorganismos tenían una cierta relación con la eliminación de sólidos en suspensión

Las construcciones de los HA varían en configuraciones, modificando una gama de parámetros de diseño. Caselles, Villafañe, Cabello & Manzano (2011) realizaron en Colombia la construcción de una serie de humedales de flujo subterráneo como tratamiento posterior al realizado por una Planta de Tratamiento de Aguas Residuales (PTAR), con el fin de determinar la eficiencia en la remoción de Coliformes Fecales y Totales. Este estudio como el realizado por los diferentes autores anteriormente explicados, al proceso principal lo precede un sistema de decaimiento como en este caso un tanque séptico.

Lo realizado en Barranquilla, Colombia consistió en la construcción de tres HAFS con el fin de tratar agua clarificada a una velocidad de  $53 \text{ L}/\text{m}^2\text{d}$  en espacios de  $1.1 \times 0.6 \times 0.4 \text{ m}$  utilizando como macrófita principal *Eriochloa aristata*. Esta investigación demostró que la planta logró una producción mayor de brotes aéreos y biomasa radicular gracias a los nutrientes aún disponibles en el agua. Lo anterior genera de manera indirecta una influencia sobre las reducciones en las concentraciones de las coliformes fecales y totales, ya que gracias al sombreado de las hojas la temperatura del lecho disminuye y con esto el agua que pasa a través del sistema. A su vez, el desarrollo de las raíces permite mayor adherencia de estos patógenos (Caselles, Villafañe, Cabello & Manzano, 2011).

La eficiencia que lograron en la remoción de los dos indicadores fue superior al 90 % señalando que además de la cantidad de biomasa de las raíces de la planta, el ácido carbónico resultante del Dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ) respiratorio y la descomposición de las plantas influía en el pH, pues también la producción de ácidos orgánicos logra disminuir significativamente los valores obtenidos, lo que conlleva a proporcionar ambientes adversos para la supervivencia de las bacterias.

Para Dias, Passos & Sperling (2017) la temperatura del agua era considerada como una de las variables más importantes para tener en cuenta cuándo se requiera llegar a una reducción en la concentración no solo de *E. Coli* sino de coliformes totales y fecales. Sin embargo, demostraron que la temperatura solo debe ser considerada como una variable secundaria que interactúa con otros mecanismos, pues por sí sola no puede causar remoción, ya que los microorganismos solo se ven afectados de manera directa cuando se realizan choques térmicos a más de  $45 \text{ }^\circ\text{C}$ . Lo anterior lo respalda el estudio de López, Leiva, Arismendi & Vidal (2019) el cual asegura que el crecimiento microbiano de los patógenos esta entre los  $16$  y  $52 \text{ }^\circ\text{C}$ .

La eliminación de microorganismos está directamente relacionada con la disminución de la materia orgánica representada como  $\text{DBO}_5$ , y  $\text{DQO}$  al igual que las raíces de las plantas, pues el rendimiento que proporcionan las plantas se debe a la rizosfera, gracias al estímulo de la comunidad microbiana presente. En algunos casos las plantas proporcionan exudados transportados por las raíces que proporcionan sustratos de carbono y enzimas que mejoran la mineralización de la materia orgánica y su posterior eliminación (Caselles, Villafañe, Cabello & Manzano, 2011).

Con el propósito de continuar la idea que había nacido en Europa los autores como Shafy & Khateeb (2013) combinan dicha experiencia con la práctica que se realiza respecto a la gestión y reutilización de agua residuales en Egipto, pues basaron su estudio en tratar aguas residuales con el objetivo de reutilizarlas para riego de plantaciones de madera y para la protección de aguas subterráneas. El diseño utilizó la planta emergente más utilizada en los HAFSS la cual hace referencia a *Phragmites australis*. Esta planta fue dispuesta en el sistema con profundidad de aproximadamente 1m, sin embargo, la profundidad de las plantas en este caso fue de 70 cm.

Las evidencias encontradas por Karimi, Hassan & Hossin (2014) Para DBO<sub>5</sub> y DQO son 77% y 74% respectivamente, que al ser comparadas con lo encontrado por autores como Shafy y Khateeb (2013) son relativamente altas, sin importar que algunos parámetros de diseño sean similares como el hecho de compartir sistemas de pretratamiento. En Egipto se lograron eficiencias de remoción del 99 % para coliformes fecales y *Streptococcus faecalis* gracias a la relación que tienen el decaimiento de los sólidos suspendidos totales con la eliminación de los microorganismos, lo que significa que la mayor eliminación de estos patógenos se dio gracias a la clarificación del agua mediante la eliminación de los SST (Shafy & Khateeb, 2013).

Los HAFS como se ha demostrado anteriormente se usan como un tratamiento posterior a otras tecnologías, tal es el caso del estudio realizado por Mustafa (2013) que trató las aguas de una Planta de Tratamiento de Aguas Residuales Domésticas (PTARD) en Pakistán. Este estudio consistió en el diseño de un humedal de 6 m de largo, 1.5 de ancho y 0.6 m de profundidad para tratar aguas a 1m<sup>3</sup>/d. El diseño piloto tuvo 4 macrófitas identificadas como *Phragmites karka* con un TRH de aproximadamente cuatro días.

Las eficiencias reportadas por estos autores superan el 90% y se logran evidenciar en la tabla 18. Aunque no se especifica la razón por la cual se pueden llegar a tener estas altas tasas de remoción, autores como Morató, et al., 2014 aseguran que las concentraciones relativamente bajas de DBO<sub>5</sub> y DQO tanto en el afluente como en el efluente, incrementan las tasas de remoción de las coliformes totales y fecales. Lo anterior se puede observar en la tabla 15.

En los HAFS otro de los parámetros de diseño importante que se debe tener en cuenta en la construcción, hace referencia a la profundidad del agua, es decir la misma del sistema ya que según Morató, et al., 2014 los humedales construidos con flujo subterráneo tienen un promedio de 0,60 m en relación con la profundidad efectiva que las raíces de las plantas pueden llegar. También argumentan, que el valor puede depender del lecho filtrante que se utilice en cada configuración, sin embargo, la profundidad también logra determinar la fracción relacionada al volumen del agua que tiene contacto con la biomasa subterránea de los macrófitas.

El estudio realizado por Albalawneh, Chang, Chou y Naoum (2016) demuestra que las macrófitas utilizadas en los HAFS tienen mayor profundidad efectiva cuando el medio que se utiliza es mucho más fino, pues las raíces de las plantas no encuentran mayores obstáculos que interrumpan su desarrollo. karimi, et al., 2014, argumenta la idea que plantean los autores anteriores, ya que en sus resultados se determinó que el crecimiento de las raíces de las plantas logró llegar al final del sistema en lugares donde el lecho filtrante era mucho más fino.

Las concentraciones evaluadas en las diferentes investigaciones realizadas por los autores anteriormente discutidos se encuentran reportadas en la tabla 15. Esta representa los valores de ingreso de los indicadores de la calidad del agua y el tipo de macrófita usada, mientras que las eficiencias se expresan en la tabla 17. En términos de eficiencia todos los autores reportaron porcentajes significativamente altos en todos los parámetros medidos para determinar la calidad del agua.

El estudio más reciente encontrado durante la investigación hace referencia a las investigaciones hechas por Russo, et al., (2019) que lograron eficiencias similares a las de los diferentes autores anteriormente discutidos, como se evidencia en la tabla 15. Este estudio consistió en la construcción de tres HAFS, dos de ellos sembrados con *Phragmites australis* y otro con *Typha Latifolia*, los sembrados con la macrófita más utilizada se combinó con lagunas de oxidación y exposición a luz UV.

Las eficiencias que se reportan respecto a la remoción de los indicadores expuestas en la tabla 15, pertenecen solo al tratamiento con humedales artificiales, ya que solo el humedal que fue tratado con luz UV y con la laguna de oxidación fue capaz de alcanzar concentraciones inferiores a 1 UFC/100 ml de todos los indicadores microbiológicos de la calidad del agua. Russo, et al., (2019) reportaron la posible relación que tienen la concentración de nitrógeno con la eliminación de patógenos, pues aseguran que, a mayor concentración de nitrógeno, mayor propagación de patógenos.

Tabla 15. Eficiencias de la remoción de indicadores microbiológicos de la calidad del agua en los HAFS.

Macrófitas	DBO <sub>5</sub> (mg/L)		DQO (mg/L)		Coliformes Totales		Coliformes Fecales		<i>Escherichia coli</i>		Streptococcus Faecalis		Reporta
	In	Fi	In	Fi	In	Fi	In	Fi	In	Fi	In	Fi	
<i>Phragmites australis</i>	176,6	41	385,6	102	4.41x10 <sup>14</sup> NMP/100 ml	1.13x10 <sup>14</sup> NMP/100 ml	4.41x10 <sup>14</sup> NMP/100 ml	7.84x10 <sup>12</sup> NMP/100 ml	1.12x10 <sup>14</sup> NMP/100 ml	2.44x10 <sup>11</sup> NMP/100 ml	5.88x10 <sup>14</sup> NMP/100 ml	3.34x10 <sup>12</sup> NMP/100 ml	Karimi, Hassan & Hossin (2014)
<i>Phragmites australis</i>	-	-	-	-	-	-	-	-	7.6x10 <sup>6</sup> NMP/100 ml	6.8x10 <sup>2</sup> NMP/100 ml	-	-	Headley et al. (2013)
<i>Eriochloa aristata</i>	-	-	7.0	1.5	922799 UFC/100 ml	1517 UFC/100 ml	87677 UFC/100 ml	3600 UFC/100 ml	-	-	-	-	Caselles, Villafañe, Cabello & Manzano (2011)
<i>Phragmites australis</i>	329	36	588	74	-	-	9x10 <sup>8</sup> NMP/100 ml	3x10 <sup>3</sup> NMP/100 ml	-	-	6x10 <sup>6</sup> NMP/100 ml	2x10 <sup>2</sup> NMP/100 ml	Shafy & Khateeb (2013)
<i>Phragmites karka</i>	69	34	122.9	68.3	2.1x10 <sup>6</sup> UFC/100 ml	8x10 <sup>3</sup> UFC/100 ml	1.1x10 <sup>6</sup> UFC/100 ml	3x10 <sup>3</sup> UFC/100 ml	-	-	-	-	Mustafa (2013)
<i>Phragmites australis</i>	-	-	-	-	4.4x10 <sup>7</sup> UFC/100 ml	2.52x10 <sup>5</sup> UFC/100 ml	-	-	6.32x10 <sup>6</sup> UFC/100 ml	4.13x10 <sup>4</sup> UFC/100 ml	3.16x10 <sup>5</sup> UFC/100 ml	7.04x10 <sup>3</sup> UFC/100 ml	Morató, Codony, Sánchez, Pérez, García & Mas (2014)
N/A	142	91	316	199	-	-	1.58x10 <sup>5</sup> UFC/100 ml	1x10 <sup>4</sup> UFC/100 ml	-	-	-	-	Albalawneh, Chang, Chou & Naoum (2016)
<i>Canna Flaccida</i>	44.5	4.4	28.6	3.2	-	-	9.05x10 <sup>5</sup> UFC/100 ml	71 UFC/100 ml	4.8x10 <sup>5</sup> UFC/100 ml	<1 UFC/100 ml	-	-	Chang et al. (2011)

\*In: Concentración Inicial; Fi: Concentración Final

Fuente: Autores, 2019

Tabla 16. Eficiencias de la remoción de indicadores microbiológicos de la calidad del agua en los HAFS.

Macrófitas	DBO <sub>5</sub> (mg/L)		DQO (mg/L)		Coliformes Totales		Coliformes Fecales		<i>Escherichia coli</i>		<i>Enterococcus spp</i>		Reporta
	In	Fi	In	Fi	Fi	Fi	In	Fi	In	Fi	In	Fi	
<i>Phragmites australis</i>	26	8	46	13	2.5x10 <sup>5</sup> UFC/100 ml	1x10 <sup>4</sup> UFC/100 ml	-	-	1x10 <sup>5</sup> UFC/100 ml	1x10 <sup>4</sup> UFC/100 ml	3.9x10 <sup>4</sup> UFC/100 ml	3.9x10 <sup>2</sup> UFC/100 ml	Russo, Marzo, Randazzo, Caggia, Toscano & Cirelli (2019)
<i>Phragmites australis</i>	26	6	46	10	2.5x10 <sup>5</sup> UFC/100 ml	1.2x10 <sup>4</sup> UFC/100 ml	-	-	1x10 <sup>5</sup> UFC/100 ml	6.3x10 <sup>3</sup> UFC/100 ml	3.9x10 <sup>4</sup> UFC/100 ml	6.3x10 <sup>2</sup> UFC/100 ml	
<i>Typha Latifolia</i>	26	5	46	9	2.5x10 <sup>5</sup> UFC/100 ml	1.9x10 <sup>4</sup> UFC/100 ml	-	-	1x10 <sup>5</sup> UFC/100 ml	5.0x10 <sup>3</sup> UFC/100 ml	3.9x10 <sup>4</sup> UFC/100 ml	3.9x10 <sup>2</sup> UFC/100 ml	

\*In: Concentración Inicial; Fi: Concentración Final

Fuente: Autores, 2019.

Tabla 17. Eficiencias de la remoción de indicadores microbiológicos de la calidad del agua en los HAFS.

Macrófitas	DBO <sub>5</sub> (mg/L)		DQO (mg/L)		Coliformes Totales		Coliformes Fecales		<i>Streptococcus</i>		<i>Salmonella</i>		Reporta
	In	Fi	In	Fi	Fi	Fi	In	Fi	In	Fi	In	Fi	
<i>Typha Dominguesnsis</i>	272.26	48.77	135.75	23.88	3.01x10 <sup>5</sup> NMP/100 ml	3.54x10 <sup>4</sup> NMP/100 ml	3.31x10 <sup>5</sup> NMP/100 ml	6.02x10 <sup>4</sup> NMP/100 ml	4.2x10 <sup>5</sup> NMP/100 ml	7.5x10 <sup>4</sup> NMP/100 ml	1.0x10 <sup>4</sup> NMP/100 ml	9.33x10 <sup>2</sup> NMP/100 ml	Vallejos, Caballero & Champagne (2015)
<i>Typha Latifolia</i>	47.87	11.65	135.75	32.25	3.01x10 <sup>5</sup> NMP/100 ml	3.01x10 <sup>4</sup> NMP/100 ml	1.17x10 <sup>5</sup> NMP/100 ml	3.23x10 <sup>4</sup> NMP/100 ml	4.2x10 <sup>5</sup> NMP/100 ml	6.9x10 <sup>4</sup> NMP/100 ml	1.0x10 <sup>4</sup> NMP/100 ml	1.07x10 <sup>3</sup> NMP/100 ml	Vallejos, Caballero & Champagne (2015)

\*In: Concentración Inicial; Fi: Concentración Final

Fuente: Autores, 2019.

Tabla 18. Eficiencias de remoción de contaminantes microbiológicos.

Macrófitas	DBO <sub>5</sub>	DQO	Coliformes Totales	Coliformes Fecales	<i>Escherichia coli</i>	<i>Streptococcus Faecalis</i>	<i>Salmonella</i>	Reporta
<i>Phragmites australis</i>	77%	74%	74%	98%	99%	99%	-	Karimi, Hassan & Hossin (2014)
<i>Phragmites australis</i>	-	-	-	-	99%	-	-	Headley et al. (2013)
<i>Eriochloa aristata</i>	-	79%	99%	96%	-	-	-	Caselles, Villafañe, Cabello & Manzano (2011)
<i>Phragmites australis</i>	89%	87%	-	99%	-	99%	-	Shafy & Khateeb (2013)
<i>Phragmites karka</i>	51%	44%	99%	99%	-	-	-	Mustafa (2013)
<i>Phragmites australis</i>	-	-	99%	-	99%	98%	-	Morató, Codoy, Sánchez, Perez, García & Mas (2014)
N/A	36%	37%	-	94%	-	-	-	Albalawneh, Chang, Chou & Naoum (2016)
<i>Canna Flaccida</i>	90%	89%	-	99%	99%	-	-	Chang et al. (2011)
<i>Typha Dominguesnsis</i>	82%	82%	88%	82%	-	82%	91%	Vallejos, Caballero & Champagne (2015)
<i>Typha Latifolia</i>	76%	76%	90%	72%	-	84%	89%	

Fuente: Autores, 2019

Tabla 19. Eficiencias de remoción de contaminantes microbiológicos.

Macrófitas	DBO <sub>5</sub>	DQO	Coliformes Totales	Coliformes Fecales	<i>Escherichia coli</i>	<i>Enterococcus spp</i>	Reporta
<i>Phragmites australis</i>	69%	72%	96%	-	90%	99%	Russo, Marzo, Randazzo, Caggia, Toscano & Cirelli (2019)
<i>Phragmites australis</i>	77%	78%	95%	-	94%	98%	
<i>Typha Latifolia</i>	80%	80%	92%	-	95%	99%	

Fuente: Autores, 2019

### **Eficiencias de remoción de contaminantes microbiológicos en los HAFS.**

El reusó de aguas residuales domésticas para riego de cultivos está siendo ampliamente implementado en diferentes países, sin embargo, esta práctica comenzó en Europa gracias a los experimentos realizados por Seidel. Esto logró ser una solución viable para lograr mitigar en algunos casos de manera parcial la escasez que se tiene respecto a la falta del líquido para riego en países desarrollados y en vía de desarrollo. Las aguas tratadas en su mayoría han estado sujetas a diferentes estudios, donde se han determinado ciertos criterios de calidad para poder ser reutilizadas, sin embargo, se han centrado en parámetros convencionales como DBO<sub>5</sub>, DQO, pH y SST y solo en algunos casos concentraciones de concentraciones (Kassinis, Kalavrouziotis, Koukoulakis & Vásquez, 2011).

El aprovechamiento de las aguas residuales en términos de reúso para Colombia ha empezado a tener diferentes motivaciones a nivel de incentivos relacionados con construcciones sostenibles. Lo anterior se encuentra consagrado en el artículo 139 en el Decreto 364 de 2013 en el que la Secretaría Distrital de Ambiente en conjunto con la Secretaria Distrital del Hábitat y la Secretaria Distrital de Hacienda pretenden determinar un esquema de incentivos a proyectos que dentro de su propósito exista aprovechar aguas grises y lluvias.

Respecto a las regulaciones que se establecieron por países como Colombia se combinan aguas para reusó en tres aspectos agrícola, industrial y zonas verdes, sin embargo, no solo este país ha establecido valores máximos permisibles para microorganismos, sino que México y España también lo han realizado para reusó. Otras organizaciones como la FAO y la OMS mediante el uso seguro de las aguas servidas han establecido, aunque pocos indicadores una regulación mucho más general.

Los autores previamente analizados y discutidos han tenido remociones significativas en las concentraciones de indicadores microbiológicos evaluados en construcciones de HAFS con variables en los parámetros de diseño, sin embargo, a la hora de querer evaluar la eficiencia que tienen estos sistemas relacionados a los valores máximos permisibles que establecen las normativas nacionales e internacionales en la permisibilidad de concentraciones de patógenos se quedan cortos.

Las coliformes fecales han sido un indicador más general de la calidad del agua, mientras que *E. Coli* hace referencia a la presencia de contaminación fecal en el agua y por extensión a la posible contaminación de otros patógenos debido a que este hace referencia a un miembro que es predominante de una parte anaerobia facultativa de la flora normal del humano que se ve influenciada en el agua por el grado de contaminación fecal, las inadecuadas prácticas de higiene y las condiciones ambientales a las que están expuestas (Odonkor & Ampofo, 2013).

La eficiencia que tienen los HAFS en términos de remoción de bacterias patógenas como *Escherichia coli* ha sido reportada por la tabla 15 donde se comparan las concentraciones de salida que fueron obtenidas por los diferentes autores previamente analizados, sin embargo, no todos los autores reportaron concentraciones de esta bacteria pues se centraban en reportar parámetros fisicoquímicos. En términos de regulación solo España se ha encargado de establecer concentraciones máximas para esta bacteria en dos usos los cuales hacen referencia al residencial y de servicios. Lo anterior lo realizó España para el 2007 mediante el Real Decreto 1620.

Tabla 20. Comparación de valores máximos permisibles para concentraciones de *E. Coli*.

Fi	ESPAÑA				Reporta
	Valor Máximo Uso residencial	Cumple/No cumple	Valor Máximo Uso de servicios	Cumple/No cumple	
2.44x10 <sup>11</sup> NMP/100 ml			N/A		Karimi, Hassan & Hossin (2014)
6.8x10 <sup>2</sup> NMP/100 ml			N/A		Headley et al. (2013)
4.13x10 <sup>4</sup> UFC/100 ml	0 UFC/ 100ml	No cumple	200 UFC/ml	No cumple	Morató, Codony, Sánchez, Pérez, García & Mas (2014)
<1 UFC/100ml	0 UFC/ 100ml	Cumple	200 UFC/ml	Cumple	Chang et al., 2011
1x10 <sup>4</sup> UFC/100 ml	0 UFC/ 100ml	No cumple	200 UFC/ml	No cumple	
6.3x10 <sup>3</sup> UFC/100 ml	0 UFC/ 100ml	No cumple	200 UFC/ml	No cumple	Russo, Marzo, Randazzo, Caggia, Toscano & Cirelli (2019)
5.0x10 <sup>3</sup> UFC/100 ml	0 UFC/ 100ml	No cumple	200 UFC/ml	No cumple	

Fuente: Autores, 2019.

La tabla 20 demuestra problemas a la hora de comparar los diferentes reportes hechos por los autores debido a las diferentes formas con los que se representan, es decir que algunos autores demuestran las concentraciones en diferentes técnicas como Número Más Probable (NMP)/100 ml o Unidades Formadoras de Colonias/100ml. España reporta con esta última técnica y autores como Karimi, Hassan & Hossin (2014) y Headley et al. (2013) la reporta como NMP por lo que se hace imposible comparar con la normativa. Aunque no se cuente con la misma forma de representar los resultados, este país establece que no debe existir concentraciones para uso residencial por lo que simular las combinaciones de estos autores podrían ser consideradas como desventaja a la hora de querer utilizarlas con dicho propósito.

En los reportes de las eficiencias de los diferentes autores como se evidencia en las tablas 18 y 19 para *Escherichia coli* ninguna se encuentra por debajo del 90%, sin embargo, cuando se observa la tabla 20 Se puede evidenciar que, aunque se tenga altas eficiencias de remoción al querer reusarlas se hace imposible pues supera el valor máximo admisible que establece en países como España.

Otros países que establecen valores máximos para las concentraciones de microorganismos es Colombia para patógenos como *Enterococcus faecalis*, estos últimos son considerados como uno de los principales causantes de infecciones nosocomiales y responsables de múltiples infecciones graves como la sepsis intraabdominal. Estos han sido utilizados como indicadores de la calidad del agua hace más de 15 años, pues también son considerados comensales de comunidades intestinales en mamíferos y aves (Klibi, Ben, Rahmouni, Dziri, Douja & Lozano, 2014).

Las coliformes fecales pertenecen al grupo de Coliformes totales y se ha visto como indicador de la calidad del agua demostrando la contaminación fecal expresando así la calidad microbiológica presente en el agua, además de ser identificado como parámetro para estimar el riesgo de enfermedad. Estos microorganismos tienen la capacidad de reproducirse fuera del intestino favorecida por condiciones relacionadas a las que garantiza la materia orgánica, el pH y la humedad (Abera, Zeyinudin, Kebede, Deribew, Ali & Zemene, 2011).

Este parámetro debe interpretarse dependiendo del tipo de aguas, es decir, que funcionan como alerta de que pudo ocurrir un tipo de contaminación de tipo humano o animal sin saber el origen de la misma, la tabla 18 y 19 muestra las diferentes eficiencias que los autores reportan, sin embargo, las concentraciones de salida superan a todos los valores máximos permisibles. Esta comparación se realizó con las establecidas por la Resolución 1207 de 2014 que determina diferentes valores para coliformes fecales en reusó industrial, pues se encuentran acotados por cuatro usos relacionados a las aguas que se usan para intercambio de calor en torres de enfriamiento o calderas, descarga de aparatos sanitarios, limpieza mecánica de vías y riego de vías para control de Material Particulado (MP) y sistemas contras incendios.

Aunque la regulación que existe en Colombia es bastante radical respecto a este tipo de contaminante, pues no deben superar 1000 NMP/100 ml en ninguno de los casos. Sin Embargo, Los resultados que arrojaron diferentes autores frente a los valores puestos en comparación de la normativa colombiana expresa al igual que los diferentes patógenos un resultado negativo, pues todos estos resultados no son aptos para ser usados si se quiere con este propósito en Colombia.

Tabla 211. Comparación de valores máximos permisibles para concentraciones de Coliformes fecales.

COLOMBIA									
Fi	Intercambio de calor en torres de enfriamiento o y/o calderas	C/N.C	Descarga de apartados sanitarios	C/N.C	Limpieza mecánica de vías y riego de vías para control de MP	C/N.C	Sistemas de redes contra incendios	C/N.C	Reporta
7.84x10 <sup>12</sup>	1x10 <sup>3</sup>	NC	1x10 <sup>4</sup>	NC	1x10 <sup>3</sup>	NC	1	NC	Karimi, Hassan & Hossin (2014)
NMP/100 ml	NMP/100 MI		NMP/100 ml		NMP/100 MI		NMP/100 ml		Caselles, Villafañe, Cabello & Manzano (2011)
3600					N/A				Shafy & Khateeb (2013)
UFC/100 ml									Mustafa (2013)
3x10 <sup>3</sup>	1x10 <sup>3</sup>	NC	1x10 <sup>3</sup>	NC	1x10 <sup>3</sup>	NC	1	NC	Albalawneh, Chang, Chou & Naoum (2016)
NMP/100 ml	NMP/100 MI		NMP/100 ml		NMP/100 MI		NMP/100 ml		Chang et al. (2011)
3x10 <sup>3</sup>					N/A				Vallejos, Caballero & Champagne (2015)
UFC/100 ml									
1x10 <sup>4</sup>					N/A				
UFC/100 ml									
71					N/A				
UFC/100 ml									
6.02x10 <sup>4</sup>	1x10 <sup>3</sup>	NC	1x10 <sup>4</sup>	NC	1x10 <sup>3</sup>	NC	1	NC	
NMP/100 ml	NMP/100 MI		NMP/100 ml		NMP/100 MI		NMP/100 ml		
3.23x10 <sup>4</sup>	1x10 <sup>3</sup>	NC	1x10 <sup>4</sup>	NC	1x10 <sup>3</sup>	NC	1	NC	
NMP/100 ml	NMP/100 MI		NMP/100 ml		NMP/100 MI		NMP/100 ml		

Fuente: Autores, 2019

Tabla 222. Comparación de valores máximos permisibles para concentraciones de Coliformes Totales.

Fi	México			OMS			FAO		Reporta
	Valor Máximo Contacto Directo*	C/N.C	Valor Máximo Contacto Indirecto	C/N.C	Valor Máximo	C/N.C	Valor Máximo	C/N.C	
7.84x10 <sup>12</sup> NMP/100 ml	240 NMP/100 ml	NC	1x10 <sup>3</sup> NMP/100 ml	NC	1x10 <sup>3</sup> NMP/100 ml	NC	1x10 <sup>3</sup> NMP/100 ml	NC	Karimi, Hassan & Hossin (2014)
3600 UFC/100 ml				N/A					Caselles, Villafañe, Cabello & Manzano (2011)
3x10 <sup>3</sup> NMP/100 ml	240 NMP/100 ml	NC	1x10 <sup>3</sup> NMP/100 ml	NC	1x10 <sup>3</sup> NMP/100 ml	NC	1x10 <sup>3</sup> NMP/100 ml	NC	Shafy & Khateeb (2013)
3x10 <sup>3</sup> UFC/100 ml				N/A					Mustafa (2013)
1x10 <sup>4</sup> UFC/100 ml				N/A					Albalawneh, Chang, Chou & Naoum (2016)
71 UFC/100 ml				N/A					Chang et al. (2011)
6.02x10 <sup>4</sup> NMP/100 ml		NC		NC		NC		NC	
3.23x10 <sup>4</sup> NMP/100 ml	240 NMP/100 ml		1x10 <sup>3</sup> NMP/100 ml		1x10 <sup>3</sup> NMP/100 ml		1x10 <sup>3</sup> NMP/100 ml		Vallejos, Caballero & Champagne (2015)
		-		NC		NC		NC	
1x10 <sup>4</sup> UFC/100 ml				N/A					Russo, Marzo, Randazzo, Caggia, Toscano & Cirelli (2019)

1.2x10<sup>4</sup>  
UFC/100 ml

N/A

Russo, Marzo, Randazzo,  
Caggia, Toscano & Cirelli  
(2019)

1.9x10<sup>4</sup>  
UFC/100 ml

N/A

---

\* **C:** Cumple **N.C:** No cumple

Fuente: Autores, 2019.

Bajo ninguna circunstancia el agua potable o aquella que se desee utilizar para contacto directo o indirecto con los humanos debe tener ningún tipo de microorganismo que se conozca como patógeno o bacteria indicadora de contaminación fecal. Las coliformes totales con excepción de *Escherichia coli* se producen en aguas naturales o en aguas residuales. Este tipo de bacterias al igual que los otros indicadores se producen en su mayoría por las excretas de los animales y humanos, sin embargo, estas bacterias son heterótrofos y se suelen multiplicar en agua y suelo (Abdul, Munturi, Dattatreya & Mohan, 2011).

Este tipo de microorganismos es uno de los más reportados a diferencia de los microorganismos anteriormente mencionados, pues los autores lo determinan como contaminante mucho más general y no se enfocan en reportar otro tipo de indicadores, pues este contaminante hace referencia a la sumatoria de *Escherichia coli* y coliformes fecales (Abdul, Munturi, Dattatreya & Mohan, 2011). Lo anterior es confirmado por las diferentes organizaciones mundiales cuando en sus requerimientos expresan las concentraciones óptimas del agua para reúso incluyendo estos microorganismos, aunque países como México y Colombia.

En la tabla 22 se logra evidenciar diferentes estudios relacionados con concentraciones de estos patógenos, sin embargo, presentan problemas a la hora de querer comparar con las diferentes normativas de los países y organizaciones como la FAO y la OMS. En caso de querer utilizar aguas tratadas, teniendo en cuenta que todos los resultados obtenidos hacen referencia a aguas residuales domésticas solo se podrían llevar a cabo combinaciones como las de Shafy & Khateeb (2013) y Vallejos, Caballero & Champagne (2015) para ser reutilizados en riego de cultivos no comestibles para humanos en países como Colombia, mientras que para otros aspectos se hacen imposibles de tratar.

*Salmonella* es uno de los microorganismos patógenos causantes de enfermedades comunes como gastroenteritis específicamente en países industriales occidentales y en algunos casos enfermedades graves como fiebre tifoidea y paratifoidea. La presencia de este microorganismo en aguas tratadas representa unas de las principales cargas a la salud pública generando gastos significativos a muchos países, aunque se ha demostrado que concentraciones elevadas de este microorganismo logran producir serios problemas ambientales no se ha realizado la vigilancia en todos los países (Mansilha, Coelho, Reinas, Moutinho, Ferreira, Pizarro & Tavares, 2010).

Tabla 23. Comparación de valores máximos permisibles para concentraciones de Salmonella.

Fi	Colombia												Reporta
	Valor Máximo de reúso Agrícola	C/N .C	Valor Máximo de reúso en Áreas verdes	C/N .C	Intercambio de calor en torres de enfriamiento y/o calderas	C/N .C	Descarga de apartados sanitarios	C/N .C	Limpieza mecánica de vías y riego de vías para control de MP	C/N .C	Sistemas de redes contra incendios	C/N .C	
9.33x10 <sup>2</sup> NMP/100 ml	1 NMP/100 ml	NC	1 NMP/100 ml	NC	1 NMP/100 ml	NC	1 NMP/100 ml	NC	1 NMP/100 ml	NC	1 NMP/100 ml	NC	Vallejos, Caballero & Champagne (2015)
1.07x10 <sup>3</sup> NMP/100 ml	1 NMP/100 ml	NC	1 NMP/100 ml	NC	1 NMP/100 ml	NC	1 NMP/100 ml	NC	1 NMP/100 ml	NC	1 NMP/100 ml	NC	

C: Cumple N.C: No cumple

Fuente: Autores, 2019.

En la tabla 24 se puede observar los resultados obtenidos por los diferentes autores que lograron remover concentraciones significativas de *Salmonella*, en diferentes combinaciones de macrófitas y parámetros de diseño. Sin embargo, no se presentan reportes numerosos ya que de acuerdo con Mansilha et al. (2010) este microorganismo no ha sido completamente vigilado en países industrializados, por lo que provocaría una ausencia de control por organizaciones mundiales como la FAO o la OMS. Colombia ha sido uno de los países que ha puesto control en cuanto a concentraciones de este microorganismo para uso industrial que, al ser comparado con lo obtenido, ninguna de las investigaciones realizadas por los autores descritos en la tabla 23 podrían ser reproducidos en este país.

## **CONCLUSIONES**

La eliminación de microorganismos patógenos mediante humedales artificiales de flujo subsuperficial usados principalmente como tratamiento secundario para aguas residuales domésticas, representa un proceso muy complejo que depende de muchos factores que incluyen variaciones en el ambiente y en los parámetros de diseño que se llevan a cabo en cada uno de ellos. Aunque los mecanismos de eliminación de microorganismos se han discutido en diferentes artículos, no se encontró un análisis sistemático acerca de los procesos y eficiencias que tienen este tipo de tecnologías.

Diferentes autores han especulado el destino de las bacterias luego de ser tratadas, sin embargo, no se encontró algún tipo de evidencia científica que asegurara el destino de las mismas. En términos de eliminación de microorganismos patógenos, generalmente los humedales artificiales de flujo subsuperficial se consideran una combinación de factores no solo químicos sino físicos donde se incluyen combinaciones de sistemas alternos de tratamiento.

No se logró encontrar una revisión sistémica que incluyera las eficiencias de diferentes investigaciones relacionadas a la remoción de microorganismos patógenos en HAFS al rededor del mundo, en un periodo comprendido de 2010 a 2019. Por lo que la presente revisión lograría proporcionar lineamientos bases a la hora de querer continuar con la temática investigada.

## **RECOMENDACIONES**

Para la determinación de la eficiencia de remoción de indicadores microbiológicos de la calidad del agua, se usó la diferencia entre las concentraciones de salida y las de entrada, arrojando valores cercanos al 100%, sin embargo, se recomienda no reportar valores en porcentaje si no en unidades logarítmicas ya que, a la hora de comparar las concentraciones de salida con los valores máximos permisibles en la normativa nacional e internacional, la mayoría de las investigaciones sobrepasaron el umbral. A pesar de que los valores sean cercanos al 100% ninguna combinación se hace efectiva para lograr tratar agua con condiciones aptas para reúso en los diferentes países que la regulan.

Con el propósito de realizar construcciones de Humedales Artificiales de Flujo Subsuperficial (HAFS) que logren otorgar condiciones óptimas de reúso, se recomienda combinar los HAFS con sistemas alternos de tratamiento de tipo físicos y químicos tales como las lagunas de oxidación y exposición a rayos UV antes y después del tratamiento realizado por esta tecnología. Lo anterior con el fin de crear sistemas más eficientes en términos de remoción de microorganismos patógenos para reúso de agua.

Una de las dificultades para lograr encontrar artículos científicos relacionados a la temática investigada, es el idioma, pues a pesar de tener un nivel de suficiencia, se hace necesario tener un inglés mucho más aplicado a temas relacionados con la microbiología. Se recomienda también tener dominio de un tercer idioma, ya que como se logró demostrar las bases de esta investigación tienen origen en países donde uno de los idiomas principal es el inglés.

## BIBLIOGRAFÍA

- Abdul R., Mutnuri L., Dattatreya P & Mohan, D. (2012). Assessment of drinking water quality using ICP-MS and microbiological methods in the Bholakpur area, Hyderabad, India. Environmental monitoring and assessment. Pp 1-12.
- Abera S., Zeyinudin A., Kebede B., Deribew A., Ali S & Zemene, E. (2011). Bacteriological analysis of drinking water sources. African Journal of Microbiology Research. Pp 1-4.
- Acero D. (2014). Tratamiento de Agua Residual a Través de Humedales. Congreso Internacional de Ingeniería Civil. Pp 1-8.
- Albalawneh A., Chang T, Chou C & Naoum S. (2016). Efficiency of a horizontal sub-surface flow constructed wetland treatment system in an arid area. Water. Pp 1-14.
- Alexandros S & Akratos C. (2016). Removal of pathogenic bacteria in constructed wetlands: mechanisms and efficiency. Pp. 1-20.
- Alufasi R., Gere J., Chakauya E., Lebea P., Parawira W & Chingwaru W. (2017). Mechanisms of pathogen removal by macrophytes in constructed wetlands. Environmental Technology Reviews. Pp 1-11.
- Altamirano F. (2017). Factores de riesgo asociados a parasitismo intestinal en niño preescolares atendidos en el aclas San Jerónimo. Andahuaylas 2014. Lima, Perú. Pp 1-114.
- Aponte J. (2016). Evaluación de la Capacidad de Depuración de las Aguas Residuales Grises Mediante un Humedal Artificial de Flujo subsuperficial en la Vereda El peñon, Municipio de san Francisco, Cundinamarca.
- Arocutipa J. (2013). Evaluación y Propuesta Técnica de una Planta de Tratamiento de Aguas Residuales en Massiapo del Distrito de Alto Inambari- Sandia, Universidad Nacional del Altiplano- Puno, Perú. Pp 1-81.
- Aurazo M., Maldonado V & Barrenechea A. (2004). Aspectos biológicos de la calidad del agua. En Tratamiento de agua para consumo humano. Plantas de filtración rápida. Tomo I. Pp 58-102
- Bautista A., Tovar J., Mancilla O., Magdaleno H., Ramírez C., Arteaga R. y Vázquez M. (2013). Calidad Microbiológica del Agua Obtenida por Condensación de Atmósfera en Tlaxaca, Hidalgo y ciudad de México. Pp 1-9.
- Baldeón J. (2013). Calidad bacteriológicas del agua de cultivo de *Oncorhynchus mykiss* del centro piscícola “El ingenio” Huancayo- Junín. Huancayo-Perú. Pp 1-61.

- Bedoya J., Ardila A., Reyes J. (2014). Evaluación de un Humedal Artificial de Flujo Subsuperficial en el Tratamiento de las Aguas Residuales Generadas en la Institución Universitaria Colegio Mayor de Antioquia, Colombia.
- Beltrán C., Benavides H. & Páez Y. (2016). Prevalencia de Enteroparasitosis en Niños de Jardines Infantiles del Espinal Tolima y Maripí Boyacá en el 2016. Universidad de Ciencias Aplicadas y Ambientales U.D.C.A, Bogotá. Pp 1-99.
- Bernal O. (2014). Diseño de Unidad Piloto de Humedales Artificiales de Flujo Subsuperficial para Tratamiento de Aguas Residuales Domésticas para Tratamiento de Aguas Residuales domésticas en el Campus UMNG-Cajicá con Fines de Reusó. Pp 1-79.
- Bohórquez G. (2010). Prevalencia y factores de riesgo asociados a parásitos intestinal en niños y adolescentes de la localidad Lomitas (Vereda Hatogrande) Sopó (Cundinamarca). Bogotá. Pp 1-37.
- Caballero J. & Osorio R. (2016). Tratamiento de Aguas Residuales Usando rhizophora mangle (mangle rojo) para la Remoción de Nutrientes y Materia Orgánica en un Humedal Artificial de Flujo Vertical. Universidad de Cartagena. Colombia. Pp 1-86.
- Cabrera A & Garcia E. (2006). Identificación de microorganismos indicadores y determinación de puntos se contaminación en agua superficiales provenientes del cementerio Jardines del Recuerdo ubicado en el norte de Bogotá, Pontificia Universidad Javeriana, Colombia. Pp 1-91.
- Cardona J. & García L. (2008). Evaluación del Efecto de los Microorganismos Eficaces Sobre la Calidad de un Agua Residual Doméstica. Facultad de Ciencias. Pontificia Universidad Javeriano. Pp 1-159.
- Carvajal A., Zapattini C. & Quintero C. (2018). Humedales Artificiales, una Alternativa para la Depuración de Aguas Residuales en el Municipio de Mizque, Bolivia. Pp 1-23.
- Caselles A., Villafañe P., Caballero V & Manzano Y. (2011). Efficiency of mesocosm-scale constructed wetland systems for treatment of sanitary wastewater under tropical conditions. *Water, Air, & Soil Pollution*. Pp 1-11.
- Castañeda A. & Flores H. (2013). Tratamiento de Aguas Residuales Domésticas Mediante Plantas Macrófitas Típicas en los Altos de Jalisco, México. *Revista de tecnología y ciencia (Paakat)*. ISSN:2007-3607.
- Castro R. & Pérez R. (2009). *Saneamiento Rural y Salud. Guía para Acciones a Nivel Local*. Guatemala. Pp 1-15.
- Celis J., Junod J. & Sandoval M. (2005). Recent Applications of Waste Water by Means of Aquatic Plants. *Theoria* Vol 14. Pp 1-9.
- Chang N., Xuan Z., Daranpob A & Wanielista M. (2011). A subsurface upflow wetland system for removal of nutrients and pathogens in on-site sewage treatment and disposal systems. *Environmental Engineering Science*. Pp 1-14.

- Choudhary A., Kumar S & Sharma C. (2011). Constructed wetlands: an approach for wastewater treatment. *Elixir Pollut.* Pp 1-7.
- Comisión Nacional del Agua (2018). Manual de agua potable alcantarillado y saneamiento. Diseño de plantas de tratamiento de aguas residuales municipales: Humedales Artificiales. Pp 1-7.
- Congreso de Colombia. (25 de 01 de 1979). Ley 9 de 1979. Bogotá D.C., Cundinamarca, Colombia.
- Corrales A. & Rodríguez L. (2014). Remoción de Patógenos con Humedales Construidos para Aprovechamiento de Aguas Lluvias en la Pontificia Universidad Javeriana. Bogotá, Colombia. Pp 1-66.
- Delgadillo O., Camacho A., Pérez L & Andrade M. (2010). Depuración de aguas residuales por medio de humedales artificiales. Pp 1-115.
- Departamento Nacional de Planeación. (2002). Documento Conpes 3177. Acciones prioritarias y lineamientos para la formulación del Plan Nacional de Manejo de Aguas Residuales. Bogotá, Colombia.
- Despommier D., Griffin D., Gwadz R., Hotez P & Knirsch C. (2017). Enfermedades Parasitarias. Sexta Edición. Pp 1-612.
- Dias D., Passos R & von Sperling M. (2017). A review of bacterial indicator disinfection mechanisms in waste stabilisation ponds. *Reviews in Environmental Science and Bio/Technology.* Pp 1-23.
- Díaz E., Alvarado A. & Camacho K. (2012). El tratamiento de agua residual doméstica para el desarrollo local sostenible: el caso de la técnica del sistema unitario de tratamiento de aguas, nutrientes y energía (SUTRANE) en San Miguel Almaya, México. Universidad Autónoma del Estado de México. Pp 1-21
- Dueñas C., Amaya L & Donado L. (2015). Reúso del agua residual tratada. Una propuesta de regulación para el uso seguro. Convenio No. 100 universidad Nacional de Colombia. Secretaría Distrital de Planeación. Bogotá D.C.
- Espinosa C. (2014). Factibilidad del Diseño de un Humedal de Flujo Subsuperficial para el Tratamiento de Aguas Residuales Municipales de 30.000 Habitantes. Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito. Pp 1-81.
- Espinosa J. (2018). El agua, un Reto para la Salud Pública la Calidad del Agua y la Oportunidades para la Vigilancia en Salud Ambiental. Universidad Nacional de Colombia. 1-194.
- Estrada I. (2010). Monografía Sobre Humedales Artificiales de Flujo Subsuperficiales de Flujo Subsuperficial (HAFSS) para Remoción de Metales Pesados En Aguas Residuales. Universidad Tecnológica de Pereira (Colombia). Pp 1-178
- Fernández J. (2004). Humedales Artificiales para la Depuración. Capítulo 6. Pp 1-12.
- Figuerola I. & Verdugo A. (2005). Mecanismos moleculares de patogenicidad de *Salmonella sp.* México. Pp 1-19.

- García J. Paredes D & Cubillos J. (2013). Effect of plants and the combination of wetland treatment type systems on pathogen removal in tropical climate conditions. *Ecological Engineering*. Pp 1-6.
- García J. & Corzo A. (2008). *Depuración con Humedales Construidos. Guía Práctica de Diseño, Construcción y explotación de Sistemas de Humedales de Flujo subsuperficial*. Pp 1-108.
- García L. & Iannacone J. (2014). *Pseudomonas Aeruginosa* un indicador complementario de la calidad de agua potable: Análisis bibliográfico a nivel de Sudamérica. Lima, Perú. Pp 1-20.
- Granados M. (2018). Estudio de Factibilidad de la Implementación de Humedales Artificiales para el Tratamiento de Aguas Residuales Domésticas en Ecosistema de Alta Montaña en Toquilla. Universidad Libre. Colombia. Pp 1-83
- Gómez L. & Perea I. (2017). Determinación de la presencia de subespecies de *Enterococcus Faecalis* en dientes con periodontitis apical sintomática y periodontitis apical asintomática. Cartagena, Colombia. Pp 1-82.
- Gualán L., Loja M. & Orellana P. (2014). Conocimiento, actitudes y prácticas sobre parasitosis intestinal en adultos de las parroquias rurales del Cantón Cuenca-Ecuador. Intervención educativa, Cuenca, Ecuador. Pp 1-86.
- Gutiérrez M. & Sánchez C. (2017). Detección y caracterización de *Escherichia coli* patógeno en carne de pollo por reacción en cadena de la polimerasa. Lima, Perú. Pp 1-77.
- Haro M. & Aponte N. (2010). Evaluación de un Humedal Artificial Como Tratamiento de Agua residual en un Asentamiento Irregular. Ciudad Universitaria (México). Pp 1-49.
- Headley T., Nivala J., Kassa K., Olsson L., Wallace S., Brix H., Afferden M & Müller R. (2013). *Escherichia coli* removal and internal dynamics in subsurface flow ecotechnologies: Effects of design and plants. *Ecological Engineering*. Pp 1-11.
- Hernández L. Chamizo H., Mora D. (2011). Calidad del Agua para Consumo humano y Salud: Dos Estudios de Caso en Costa Rica. *Costarr Salud Pública*. Vol. 1. Pp 1-6.
- Hernández R., Fernández C. & Baptista P. (2006). *Metodología de la investigación*. Vol. 4. Pp 1- 882.
- Jaramillo M. (2014). Potencial de Reuso de Agua Residual Doméstica como Estrategia para el Control de la contaminación en el Valeo Geográfico del Río Cauca. Universidad del Valle. Pp 1-187.
- Kadlec R. & Wallace S. (2009). *Treatment Wetlands*. Second Edition. Taylor & Francis Group.
- Karimi B., Hassan M & Hossin J. (2014). Indicator pathogens, organic matter and LAS detergent removal from wastewater by constructed subsurface wetlands. *Journal of Environmental Health Science and Engineering*. Pp 1-7.
- Kassinis D., Kalavrouziotis I., Koukoulakis, P., & Vasquez M. (2011). The risks associated with wastewater reuse and xenobiotics in the agroecological environment. *Science of the Total Environment*, Pp 1-9.

- Klibi N., Amor I, Rahmouni M., Dziri R., Douja G., Said L., Lozano C., Boudabous A., Slama K., Mansouri R & Torres C. (2015). Diversity of species and antibiotic resistance among fecal enterococci from wild birds in Tunisia. Detection of vanA-containing *Enterococcus faecium* isolates. *European journal of wildlife research*. Pp 1-5.
- León G. (2001). Aspectos Sanitarios del Uso de Aguas Residuales. CEPIS. Organización Panamericana de la Salud (OPS). Pp 1-10.
- López D., Leiva M., Arismendi W & Vidal G. (2019). Influence of design and operational parameters on the pathogens reduction in constructed wetland under the climate change scenario. *Reviews in Environmental Science and Bio/Technology*. Pp 1-25.
- Mairi J., Lyimo T., & Njau K. (2012). Performance of subsurface flow constructed wetland for domestic wastewater treatment. *Tanzania Journal of Science*. Pp 1-14.
- Mamani L. (2012). Presencia de protozoarios y helmintos en agua de consumo humano de la región de Moquegua. *Tactana, Perú*. Pp1-200.
- Mansilha C., Coelho C., Reinas A., Moutinho A., Ferreira S., Pizarro C & Tavares A. (2010). Salmonella: the forgotten pathogen: health hazards of compliance with European Bathing Water Legislation. *Marine pollution bulletin*. Pp 1-8.
- Martelo J. & Lara J. (2012). Macrófitas Flotantes en el Tratamiento de Aguas Residuales: Una Revisión del Estado del Arte. *Ingeniería y Ciencia- ISSN 1794-9165*.
- Martin M. & Pita L. (2007). Informe: Aguas y Salud Pública. Resumen Ejecutivo. Plan Nacional de Salud y Medio Ambiente. Pp 1-11.
- Méndez R. (2004). Desarrollo y validación de una prueba de fácil aplicación para determinación de Enterococos en agua de consumo humano. Guatemala. Pp 1-71.
- Mendoza Y., Pérez J., & Galindo A., (2018). Evaluación del Aporte de las Plantas Acuáticas *Pistia stratioides* y *Eichhornia crassipes* en el Tratamiento de Aguas Residuales Municipales. Pp 1- 10.
- Menocal L. & Caraballo Y. (2014). Importancia de la vigilancia sanitaria de los parásitos en la calidad del agua, según su uso. La Habana, Cuba. Pp 1-14.
- Mihelcic J. & Zimmerman J. (2012). *Ingeniería Ambiental: Fundamentos, Sustentabilidad y Diseño*. Alfaomega. México D.F. ISBN: 978-607-707-317-8.
- Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial. (25 de octubre de 2010). Decreto 3930 de 2010. Bogotá D.C., Cundinamarca, Colombia.
- Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. (25 de Julio de 2014). Resolución 1207 de 2014. Bogotá D.C., Cundinamarca, Colombia.
- Ministerio de la presidencia «BOE». (7 de diciembre de 2007). Real Decreto 1620 de 2007. España.
- Montiel P. (2014). Humedal Artificial. Universidad Nacional Autónoma de México. Pp 1-63.

- Morató J., Codony F., Sánchez O., Pérez L., García J., & Mas J. (2014). Key design factors affecting microbial community composition and pathogenic organism removal in horizontal subsurface flow constructed wetlands. *Science of the Total Environment*. Pp 1-9.
- Mustafa A. (2013). Constructed wetland for wastewater treatment and reuse: a case study of developing country. *International journal of environmental science and development*. Pp 1-5.
- Mthembu MS., Odinga CA., Swalaha FM & Bux F. (2013). Constructed wetlands: A future alternative wastewater treatment technology. *African Journal of Biotechnology*. Pp 1-12.
- Otálora A. (2011). Evaluación del Sistema de Tratamiento de Aguas Residuales Domesticas Mediante Humedales Artificiales de Alta Tasa en La Locación Petrolera de Caño Gandúl. Universidad Nacional de Colombia. Medellín, Colombia. Pp 1-163.
- Odonkor T & Ampofo, J. (2013). Escherichia coli as an indicator of bacteriological quality of water: an overview. *Microbiology research*. Pp 1-8.
- Pachón D. (2009). Aislamiento, identificación y serotipificación de Enterobacterias del género *Salmonella* en una población de *Crocodylus intermedius* y Testudinos manteniendo en cautiverio en la estación de biología tropical Roberto Franco E.B.T.R.B de la facultad de ciencias. Universidad Nacional de Colombia- Meta. Pp 1-115.
- Pacto por el agua (2008). Manual de depuración de aguas residuales urbanas. Secretariado de alianza por el agua, Ecología y Desarrollo.
- Paredes A. (2014). Implementación del protocolo para la determinación de Coliformes Totales y *E. Coli* en agar chromocult para la asociación municipal de acueductos comunitarios AMAC. Pereira, Colombia. Pp 1-45.
- Paz B. (2008). Entre lo Ideal y las Realidades: La Fisioterapia en la Atención Primaria. Departamento de Pedagogía Aplicada a la Psicología de Educación. Pp 1-468.
- Pérez M. (2009). Selección de Plantas Acuáticas para Establecer Humedales en el Estado de Durango. Centro de Investigaciones de Materiales Avanzados. Pp 1-102.
- Rajadel N. (2017). Estudio de los Humedales Artificiales de Flujo Superficial del Tancat de la Pipa como Instrumentos para la Restauración Ambiental del lago de L'Albugera de València. ISBN 978-84-17098-22-3.
- Ríos M. & Pabello V. (2001). Estado del Arte y Perspectivas de Aplicación de los Humedales Artificiales de Flujo Horizontal en México. Universidad Autónoma de México. Facultad de Química. Pp 1-131.
- Ríos S., Agudelo R. & Gutiérrez L. (2017). Pathogens and Microbiological Indicators of the Quality of Water for Human Consumption. Medellín (Antioquia). DOI:10.1753. Pp 1-12.
- Rivera D. (2015). Humedales de Flujo Subsuperficial como Biofiltros de Aguas Residuales Domésticas en Colombia. Tecnológico de Antioquia. Cuaderno Activa. Pp 1-10

- Rodríguez C., Diaz M., Guerra L. & Hernández J. (1996). Acción Depuradora de Algunas Plantas Acuáticas Sobre las Aguas Residuales. Pp 1-5.
- Rodríguez L., Ortiz Y., Navarro H., Espinosa H. & Hernández V. (2006). Ensayos de Eficiencia Con Macrófitas para la Remoción de Carga Contaminante en Aguas Residuales de Hatos Lecheros para un subsector de la Laguna de Fúquene. ISSN 0124-2253.
- Romero M., Colin A., Sánchez E. & Ortiz M. (2009). Tratamiento de Aguas Residuales por un Sistema Piloto de Humedales Artificiales: Evaluación de la Remoción de la capa orgánica. Pp 1- 167.
- Russo N., Marzo A., Randazzo C., Caggia C., Toscano A & Cirelli L. (2019). Constructed wetlands combined with disinfection systems for removal of urban wastewater contaminants. Science of the Total Environment. Pp 1-9.
- Saeed T., & Sun G. (2012). A review on nitrogen and organics removal mechanisms in subsurface flow constructed wetlands: Dependency on environmental parameters, operating conditions and supporting media. Journal of Environmental Management. Pp 1-20.
- Secretaria de Medio Ambiente, Recursos Naturales y Pesca. (1997). Norma Oficial Mexicana NOM-003-ECOL-1997.
- Secretaría Distrital de Salud (2011). Calidad del Agua y Saneamiento Básico. Documento Técnico. Política Distrital de Salud Ambiental para Bogotá D.C.Colombia. Pp 1-84.
- Shafy H & Khateeb M. (2013). Integration of septic tank and constructed wetland for the treatment of wastewater in Egypt. Desalination and Water Treatment. Pp 1-9.
- Shingare R., Thawa P., Raghunathan K., Mishra A., & Kumar S. (2019). Constructed wetland for wastewater reuse: Role and efficiency in removing enteric pathogens. Journal of environmental management. Pp. 1-18.
- Silva J., Torres P. & Madera C. (2008). Reusó de Aguas Residuales Domésticas en Agricultura. Una revisión. Agronomía Colombiana, Vol. 26. ISSN 0120-9965.
- Universidad El Bosque (2018). Informe de Gestión 2017.pp 1-36.
- Valencia A. (2013). Diseño de un sistema de tratamiento para las aguas residuales de la cabecera parroquial de San Luis-Provincia de Chimborazo. Riobamba, Ecuador. Pp 1-178.
- Vallejos G., Caballero C & Champagne P. (2015). Pathogen removal from domestic and swine wastewater by experimental constructed wetlands. Water Science and Technology. Pp 1-9.
- Villacis A. (2011). Estudio de un sistema de Depuración de Agua Residuales para reducir la contaminación de Río Ambato y los sectores aledaños, en el sector de Pisocucho, de la parroquia Izamba, del Cantón Ambato, providencia de Tungurahua. Ambato, Ecuador. Pp 1-254.be
- Vymazal J. (2011). Constructed Wetlands for Wastewater Treatment: Five Decades of Experience. Environmental science & technology. Pp 1-16.

- Wu S., Carvalho P., Müller J., Manoj V & Dong R. (2016). Sanitation in constructed wetlands: a review on the removal of human pathogens and fecal indicators. *Science of the Total Environment*. Pp. 1-15.
- Zapata A. (2014). Humedales Artificiales; Una Propuesta para la Mitigación de la Contaminación Hídrica de la Quebrada la Nutria, de los Cerros Orientales de Bogotá D.C. Pp 1-65
- Zimmels Y., Kirzhnel F. & Malkovskaja A. (2006). Application of *Eicchornia crassipes* and *Pista stratoides* for treatment of urban sewage in Israel. *Journal of environmental management*. Pp 1-71.