

Eficiencia de los Tratamientos de Aguas Residuales Realizadas a Partir de Microalgas y
Humedales Artificiales en la Remoción de Nutrientes

Aramilsa Contreras Pérez

Monografía como requisito de grado para optar al título de Especialista en Química Ambiental

Director

Magíster Yaneth Quintero López

Universidad Industrial de Santander

Facultad de Ciencias

Escuela de Química

Especialización en Química Ambiental

Bucaramanga

2022

Agradecimientos

Primeramente, a Dios por permitirme llevar a cabo con mucha inteligencia y discernimiento el desarrollo de este proyecto, alcanzando uno de mis grandes proyectos, el titularme como Especialista.

A mi esposo Francisco Conde que con mucha paciencia y dedicación me acompañó en cada uno de los procesos de la Especialización y a mi madre Virgelina Pérez con sus oraciones llenas de amor me fortalecieron para no desvanecer.

A mi directora de monografía, magister Yaneth Quintero López, por todo el conocimiento brindado a lo largo de la especialización, la paciencia y el tiempo dedicado para hacer de este sueño una realidad.

A todos los docentes de la Especialización que aportaron un granito de arena para ampliar mi conocimiento y ayudarme a ser una persona íntegra. De esta manera estaré más preparada para el campo laboral.

Contenido

	Pág.
Introducción	9
1. Objetivos	12
1.1 Objetivo General	12
1.2 Objetivos Específicos.....	12
2. Marco referencial	12
2.1 Marco Teórico.....	12
Uso de microalgas en lagunas para depuración de aguas residuales urbanas.....	13
Los humedales	14
2.2 Marco Legal	15
3. Metodología	16
3.1 Diseño metodológico	16
3.2 Técnicas e instrumentos.....	17
3.3 Estrategia de búsqueda.....	18
3.4 Criterios de inclusión y exclusión.....	18
4. Resultados	19
4.1 Las aguas residuales.....	19
4.2 Las macrófitas.....	23
Macrófitas más utilizadas en los humedales artificiales	24
4.3 Los humedales artificiales.....	25
4.4 Clasificación de los humedales artificiales	26
4.4.1 Humedal artificial de flujo superficial	27

4.4.2 Humedales artificiales de flujo subsuperficial	30
4.5 Revisión bibliográfica de trabajos relacionados con el tratamiento de aguas residuales mediante humedales artificiales	35
4.6 Microalgas.....	40
4.7 Sistemas de cultivo para microalgas	46
4.7.1 Sistemas abiertos.....	46
4.7.2 Sistemas cerrados.....	47
4.8 Revisión bibliográfica de trabajos relacionados con el tratamiento de aguas residuales mediante microalgas	49
5. Discusión.....	52
6. Conclusiones	53
Referencias bibliográficas.....	55

Lista de figuras

	Pág.
Figura 1: Etapas de la metodología.....	19
Figura 2: Clasificación de los humedales artificiales	27
Figura 3: Humedal artificial de flujo superficial.....	28
Figura 4: Humedal artificial de flujo subsuperficial	31
Figura 5: Humedal subsuperficial de flujo horizontal	33
Figura 6: Humedal subsuperficial de flujo vertical.....	34
Figura 7: Mecanismo de producción de las microalgas.....	41

Lista de tablas

	Pág.
Tabla 1: Nutrientes requeridos por las macrófitas	23
Tabla 2: Funciones de los humedales artificiales	26
Tabla 3: Ventajas y desventajas de los humedales artificiales de flujo superficial	29
Tabla 4: ventajas y desventajas de los humedales artificiales de flujo subsuperficial.....	31
Tabla 5: Clasificación de las microalgas según sus pigmentos	42
Tabla 6: Fases del crecimiento y desarrollo de las microalgas	44

Resumen

Título: Eficiencia de los tratamientos de aguas residuales realizadas a partir de microalgas y humedales artificiales en la remoción de nutrientes

Autor: Aramilsa contreras Pérez

Palabras clave: Microalgas, Lagunas Artificiales, Aguas residuales

Descripción:

Generalmente, se sabe que el agua es el elemento más importante para la existencia del ser humano, la naturaleza y los animales. A medida que el planeta tierra ha ido evolucionando se ha presentado una gran demanda del recurso hídrico por parte de las actividades humanas, lo que genera una gran carga de materia orgánica e inorgánica a los cuerpos de agua. Entre esas descargas tenemos plásticos, aguas domésticas e industriales, pesticidas, plaguicidas y fungicidas. Lamentablemente la mayoría de las veces no se realiza un tratamiento adecuado a las aguas para ser devueltas al ecosistema. (Valvidia, 2019) Esto acarrea grandes problemas ya que ocasiona la aparición de nuevas enfermedades, intoxicaciones, muerte de personas y animales.

En este orden de ideas se ve la necesidad de investigar nuevas alternativas para el tratamiento de aguas residuales que no sean costosas, pero a su vez que sean eficientes y de fácil operación. De tal manera la siguiente investigación sitúa como tema central la comparación de los sistemas de tratamiento de aguas residuales mediante microalgas y humedales artificiales, para así determinar cuál de los dos métodos es más eficiente en cuanto a la remoción de nutrientes.

Para la ejecución de esta investigación, se recurrió a bibliografía actualizada. De igual forma tomamos como referente a diferentes autores como base para el recorrido bibliográfico y desde sus investigaciones y estudios realizados permiten tener una visión más amplia del panorama de los tratamientos de agua residuales con microalgas y humedales artificiales en la remoción de nutrientes a nivel general.

Abstract

Title: Efficiency of wastewater treatment using microalgae and artificial wetlands in the removal of nutrients

Author: Aramilsa Contreras Perez

Key Words: Microalgae, Artificial Lagoons, Sewage, Wastewater

Description:

It is generally known that water is the most important element for the existence of human beings, nature and animals. As the planet earth has evolved, there has been a great demand for water resources by human activities, which generates a large load of organic and inorganic matter to water bodies. Among these discharges we have plastics, domestic and industrial waters, pesticides, pesticides and fungicides. Unfortunately, most of the time the water is not adequately treated to be returned to the ecosystem. (Valvidia, 2019) This causes great problems since it causes the appearance of new diseases, intoxications, death of people and animals.

In this order of ideas, it is necessary to investigate new alternatives for wastewater treatment that are not expensive, but at the same time are efficient and easy to operate. Thus, the following research focuses on the comparison of wastewater treatment systems using microalgae and artificial wetlands, in order to determine which of the two methods is more efficient in terms of nutrient removal.

For the execution of this research, we resorted to updated bibliography. In the same way, we used different authors as a reference for the bibliographic review, and from their research and studies they allow us to have a broader vision of the panorama of wastewater treatments with microalgae and artificial wetlands in the removal of nutrients at a general level.

Introducción

En términos generales, es de universal conocimiento que el agua es el elemento más importante para la existencia del ser humano, la naturaleza y los animales. A medida que el planeta tierra ha ido evolucionando, se ha presentado una gran demanda del recurso hídrico, y de igual forma se le ha dado diferentes usos, los cuales son naturales y antrópicos. Entre los usos naturales se encuentran el mantenimiento de los ríos, el cual contribuye con el crecimiento de la naturaleza, transporte de sedimentos, reservas naturales, entre otros; y en los antrópicos se ubican el aprovisionamiento doméstico, recreación, agricultura, y energía hidroeléctrica.

Es el recurso más utilizado para todas las actividades, lo que genera una gran carga de materia orgánica e inorgánica a los cuerpos de agua. Entre esas descargas tenemos plásticos, aguas domésticas e industriales, pesticidas, plaguicidas y fungicidas. Gracias a esta cantidad de contaminantes que presentan estas aguas se han convertido en un desafío ambiental y monetario. Según estimaciones de la UNESCO “el 80% de las aguas residuales retornan al ecosistema sin ser tratadas o reutilizadas” (2022, sección Los Desafíos del Agua). Cabe resaltar que la carga contaminante que presentan puede afectar algunos ciclos biogeoquímicos que son indispensables para mantener el equilibrio en el planeta; por tal razón, es necesario que el agua reciba un tratamiento previo para la remoción correcta de nutrientes y así poder ser reutilizada, aprovechando de forma óptima este recurso natural. Por otro lado, de acuerdo con las cifras expuestas por Murillo, “el 20% de la población mundial enfrenta escasez de agua” (Naciones Unidas en Murillo, 2022, p.10) y se estima que este número se incrementará en un 50% durante los próximos 50 años.

Usualmente para la construcción de una planta de tratamiento convencional se requiere una gran inversión, además de necesitarse personal calificado para su operación, sin contar con el gasto

de energía eléctrica, necesaria para su funcionamiento y los químicos aplicados para el tratamiento de las aguas.

Por lo anterior, aunque existan plantas de tratamiento de aguas residuales para la remoción de nutrientes, se requiere conocer otras metodologías de tratamientos que estén de la mano con el medio ambiente, que sean de bajo costo y que presenten la misma eficiencia que los tratamientos convencionales. Entre esas metodologías tenemos el tratamiento de aguas residuales utilizando humedales artificiales y microalgas.

Los humedales artificiales tienen desagües efectivos para los contaminantes orgánicos e inorgánicos, esta técnica es recreada de los humedales naturales con el objetivo de tratar las aguas residuales. Son muy eficientes a la hora de eliminar sólidos, nitrato, amonio, fosfato, plomo, entre otros. Cabe también resaltar que los humedales artificiales cuentan con microorganismos que ayudan a la remoción de materia orgánica, dado que para su metabolismo utilizan el carbono, la materia orgánica como fuente de energía, generando gases como el dióxido de carbono o metano, los cuales se convierten en un mecanismo importante en la remoción de compuestos orgánicos encontrados en las aguas residuales industriales y aguas grises (Llagas y Guadalupe, 2006).

Para el tratamiento de las aguas residuales, la biorremediación con microalgas tiene la facilidad de remover nutrientes y xenobióticos, además, estas microalgas tienen la facilidad de crecer en cualquier tipo de ambiente contaminado (Candela, 2016). Ellas hacen uso de la luz solar para fijar CO_2 , de esta manera, asimilan nutrientes para la formación de su estructura celular (Hernández y Labbé, 2014). Dichos organismos tienen un papel fundamental en la eliminación de sustancias nocivas en la salud humana como lo son pesticidas, herbicidas y metales pesados, todas estas almacenadas en grandes concentraciones, sin interrumpir su actividad biológica. Así mismo, tienen la capacidad de liberar O_2 por medio de la fotosíntesis, degradando los compuestos

orgánicos y dando pasó a la acumulación de biomasa, la cual es utilizada para los cultivos como abono (Ortiz, Romero, y Meza, 2018).

Con lo expuesto anteriormente, en la presente investigación se pretende revisar documentos donde se identifique la eficiencia de los humedales artificiales y las microalgas para la remoción de nutrientes en aguas residuales. Con esto, se pretende identificar las macrófitas y microalgas más eficientes a la hora de tratar las aguas, y también identificar los pros y los contras de estos dos tratamientos.

Para la investigación se plantearon preguntas, las cuales ayudaron a darle el enfoque a la investigación. Entre ellas se plantearon: ¿Qué tipo de calidad de agua se puede lograr utilizando estas dos metodologías y para qué pueden ser implementadas? ¿Cuál es la capacidad de la remoción de nutrientes de los humedales artificiales y las microalgas?

Las respuestas a estas preguntas permitirán dar una orientación a la hora del desarrollo de la metodología en la monografía.

1. Objetivos

1.1 Objetivo General

Comparar la eficiencia de los sistemas de tratamiento de aguas residuales realizados a partir de microalgas y humedales artificiales en la remoción de nutrientes.

1.2 Objetivos Específicos

- Describir los sistemas de tratamiento de aguas residuales mediante microalgas y humedales artificiales.
- Identificar los tipos de microalgas, macrófitas y tratamientos con humedales que generen mayor rendimiento en la remoción de nutrientes en las aguas residuales.
- Analizar y comparar los datos investigados para determinar la utilidad de los tratamientos de aguas residuales con microalgas y humedales artificiales.

2. Marco referencial

2.1 Marco Teórico

El término *aguas residuales* se usa generalmente para hacer énfasis en el concepto de agua con baja calidad, la cual contiene una gran cantidad de contaminantes y microorganismos nocivos para la salud; en este sentido, se puede decir que son aguas con mezclas complejas que contienen materia orgánica, inorgánica y productos artificiales que llegan al líquido como resultado de las actividades humanas (Morán, 2014). Las aguas residuales se definen como aguas de composición variada provenientes de las descargas de aguas municipales, industriales, comerciales, de servicios, agrícolas, pecuarios, domésticas, incluyendo fraccionamientos y en general, de cualquier otro uso, así como la mezcla de ellas. Según la UNESCO las aguas residuales se consideran como una combinación de uno o más de los siguientes efluentes domésticos, a saber, aguas negras

(excremento, orina y lodos fecales) y aguas grises (aguas servidas de lavado y baño); agua de establecimientos comerciales e Instituciones, incluidos hospitales; efluentes industriales, aguas pluviales y otras escorrentías urbanas; y escorrentías agrícolas, hortícolas y acuícolas (2017).

La eficiencia de las microalgas en el proceso de saneamiento de las aguas residuales radica en su capacidad de contrarrestar agentes nutrientes y xenobióticos. Así las cosas, “especies como *Scenedesmus quadricauda*, *Chlorella miniata*, *Chlorella vulgaris* y *Chlorella sorokiniana* destacan por eliminar de manera eficiente metales pesados en las aguas residuales, además de poder crecer en medios contaminados” (Forero en Candela, 2016, p.26).

Uso de microalgas en lagunas para depuración de aguas residuales urbanas

El trabajo investigativo titulado “Microalgas presentes en una laguna para pulimento de efluentes de una planta de tratamiento de aguas residuales urbanas” fue realizado por Escorihuela, Núñez, Rosales, Mora, y Morales, en la ciudad de Zulia en Venezuela, en el 2007. El punto de partida de este proyecto fue comprender cómo es posible optimizar el uso de las aguas residuales en el riego y la piscicultura, actividades en donde este tipo de líquido es muypreciado. Los efluentes poseen nutrientes muy importantes que sirven para fertilizar y acrecentar el rendimiento de los cultivos y de las plantas. Por esta razón, las microalgas pueden cumplir una función esencial en el proceso de tratamiento de las aguas residuales destinadas a este tipo de cultivos, ya que los gastos operacionales y de mantenimiento son mucho más bajos y la eficiencia es igualmente alta.

El uso de microalgas en las aguas residuales puede significar una opción eficaz y rentable en la remoción efectiva de nutrientes. Las microalgas llegan a ser una herramienta eficaz si se tienen en cuenta variables precisas en cuanto a la luz, la temperatura, el efluente a tratar, el tipo de microalgas y la clase de cultivo (Salazar, Bernal, y Martínez, 2005).

Dentro de los contaminantes de las aguas residuales se evidencia la existencia de “sólidos

suspendidos, coliformes fecales, materia orgánica, metales pesados y otros contribuyentes como aceites, grasas e hidrocarburos” (Peña y Guzmán en Argumedo y Ballesteros, 2020, p.4). Este tipo de agua contaminada es vertida a cuerpos hídricos, lo cual genera que disminuyan las condiciones de calidad natural de los mismos. Con el fin de contrarrestar estos impactos, se hace uso de diferentes métodos para tratar estos factores que disminuyen las condiciones de calidad del agua, entre los cuales se encuentran los humedales artificiales, los cuales se caracterizan por “tener una eficiencia en la remoción de cargas contaminantes, reducción de sólidos, remoción de metales por sedimentación, y supresión de bacterias por procesos como filtración, radiación solar, sedimentación” (Argumedo y Ballesteros, 2020, p.4). En añadidura, otro factor destacable de esta técnica es su relación costo-beneficio.

Los humedales

Estos son capaces de proporcionar una eficiencia física en la remoción de nutrientes en aguas contaminadas. El agua superficial se mueve lentamente a través de los humedales, debido al flujo laminar característico y la resistencia proporcionada por las raíces y las plantas flotantes. La sedimentación de los sólidos suspendidos se fomenta por la baja velocidad del flujo y por el hecho de que este es con frecuencia laminar en los humedales. En el proceso, “las esteras de plantas en los humedales pueden servir como trampas de sedimentos, pero su rol primario es la remoción de sólidos suspendidos para limitar la re-suspensión de material particulado” (Llagas y Guadalupe, 2006, p.87).

La eficiencia de estos sistemas depende en gran medida del tipo de agua tratada y también del tipo de planta, dado que esta es implementada como medio filtrante; otro factor pertinente es el diseño que se realice por medio de los investigadores, dado que en este proceso se deben tener en cuenta variables como concentración inicial del agua, caudal de entrada, carga hidráulica y

concentración requerida a la salida.

2.2 Marco Legal

La normatividad que existe para la protección y manejo del recurso hídrico es muy amplia, y en ella se indica la carga permisible para los vertimientos de aguas residuales, de igual forma los parámetros que debe cumplir el agua para ser potable. La normatividad que se encuentra para darle manejo al agua se presenta a continuación.

- **Decreto 2811 de 1974, *Por el cual se dicta el Código Nacional de Recursos Naturales Renovables y de Protección al Medio Ambiente***: En el Capítulo II *De prevención y control de la contaminación*, se disponen medidas para la regulación y preservación del recurso hídrico para corrientes de aguas naturales o artificiales.
- **Decreto 1594 de 1984, *Por el cual se reglamenta parcialmente el Título I de la Ley 09 de 1979, así como el Capítulo II del Título VI - Parte III - Libro II y el Título III de la Parte III Libro I del Decreto 2811 de 1974 en cuanto a usos del agua y residuos líquidos***: Menciona los criterios de calidad admisibles para los diferentes usos del agua como: para fines recreativos, sustancias de interés sanitario (plomo, etano clorado, fenoles), uso agrícola, pecuario, criterios de calidad para el consumo humano y doméstico.
- **Decreto 1575 del 2007, *Por el cual se establece el Sistema para la Protección y Control de la Calidad del Agua para Consumo Humano***: En el Artículo 3 de este decreto se menciona las características físicas, químicas y microbiológicas que debe tener el agua potable para ser consumida y que no afecte la salud humana.
- **Resolución 2115 de 2007, *Por medio de la cual se señalan características, instrumentos básicos y frecuencias del sistema de control y vigilancia para la calidad***

del agua para consumo humano: En esta resolución, expedida por el Ministerio de la Protección Social, y el Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial, se expiden determinaciones sobre las características y regulaciones del recurso hídrico potable en procura de la salud y el bienestar de los individuos.

- **Ley 9 de 1979, *Por la cual se dictan medidas sanitarias:*** Esta ley menciona en el artículo 10 que todo vertimiento de residuo líquido debe someterse a las condiciones que establece el ministerio de salud, donde se tiene en cuenta el sistema de alcantarillado o la fuente que reciba estos vertimientos; así mismo, en el Artículo 577 se habla de los procesos sancionatorios en contra de las infracciones a dichos estamentos.
- **Ley 99 de 1993, *Por la cual se crea el Ministerio del Medio Ambiente, se reordena el Sector Público encargado de la gestión y conservación del medio ambiente y los recursos naturales renovables, se organiza el Sistema Nacional Ambiental, SINA y se dictan otras disposiciones:*** Con esta Ley se determinaron los Entes Nacionales encargados de la protección, regulación y preservación de los recursos ambientales, otorgando las garantías necesarias para que se consoliden autoridades competentes en materia de inspección y control ambiental.

3. Metodología

3.1 Diseño metodológico

El presente trabajo tiene un enfoque metodológico de tipo mixto, el cual, integra el enfoque de indagación cuantitativo y cualitativo. Se entiende que este enfoque de investigación se configura mediante “un grupo de procesos sistemáticos, empíricos y críticos de averiguación e involucra la recolección y la investigación de datos cuantitativos y cualitativos, así como su adhesión y controversia conjunta, para hacer inferencias producto de toda la información

recabada” (Hernández, Fernández y Baptista, 2014, p. 534). Lo anterior quiere decir que en este tipo de investigaciones es posible tomar las técnicas e instrumentos tanto del enfoque cuantitativo como del cualitativo, utilizando recursos cuantificables como los datos numéricos, e intangibles, como los datos actitudinales.

La investigación es de carácter descriptivo, el cual se caracteriza porque detalla con precisión los fenómenos, sus características y todo lo que involucra su desarrollo y puesta en escena, es decir, cómo se manifiestan (Hernández, Fernández y Baptista, 2014).

Ahora bien, en términos de su observabilidad, podría catalogarse como una investigación de corte no-experimental, la cual Hernández, Fernández, y Baptista definen como aquella cuya observación se produce netamente en un estado natural del objeto de estudio, sin una situación generada con intención de medir cambios (2014).

Acorde con el diseño, se efectuó una búsqueda sistemática en bases de datos indexadas, la cual englobaba los tipos de aguas residuales y sus características físico-químicas, las macrófitas más utilizadas para los tratamientos de aguas, y las características, diseño y eficiencia de los humedales artificiales. Posterior a la búsqueda se hizo un barrido bibliográfico, se hizo una exhaustiva revisión documental y se realizó el estudio comparativo.

3.2 Técnicas e instrumentos

Para realizar el presente proyecto de investigación se utilizó la técnica de revisión y análisis documental, en la cual el investigador, luego de documentarse con las fuentes pertinentes para su estudio, realiza una matriz de información con los conceptos, ideas y apartados que se enmarquen en sus intereses investigativos, posteriormente hace el análisis y las inferencias respectivas y pertinentes. En este sentido, los instrumentos serán la matriz de información y la ficha bibliográfica. No se dejará de lado que, cuando se trata de la revisión y análisis documental

(técnicas de la investigación cualitativa o mixta), “la muestra, la recolección y el análisis son fases que se realizan prácticamente de manera simultánea” (Hernández, Fernández, y Baptista, 2014, p.8).

3.3 Estrategia de búsqueda

Enunciado lo anterior y dada la importancia de la presente investigación se optó por utilizar fuentes de primera y segunda categoría, las cuales se pudieron recolectar en bases de datos de dominio público y privado, cuyas publicaciones hayan sido oficiales. Bases de datos como Scopus, Science Direct, Redalyc, Bases de Datos universitarias, y motores de búsqueda como el Google Académico. En la búsqueda del corpus se hizo necesario utilizar una matriz de palabras clave, entre las que destacan: “Microalgas”, “Humedales artificiales”, “Macrófitas”, “aguas residuales”.

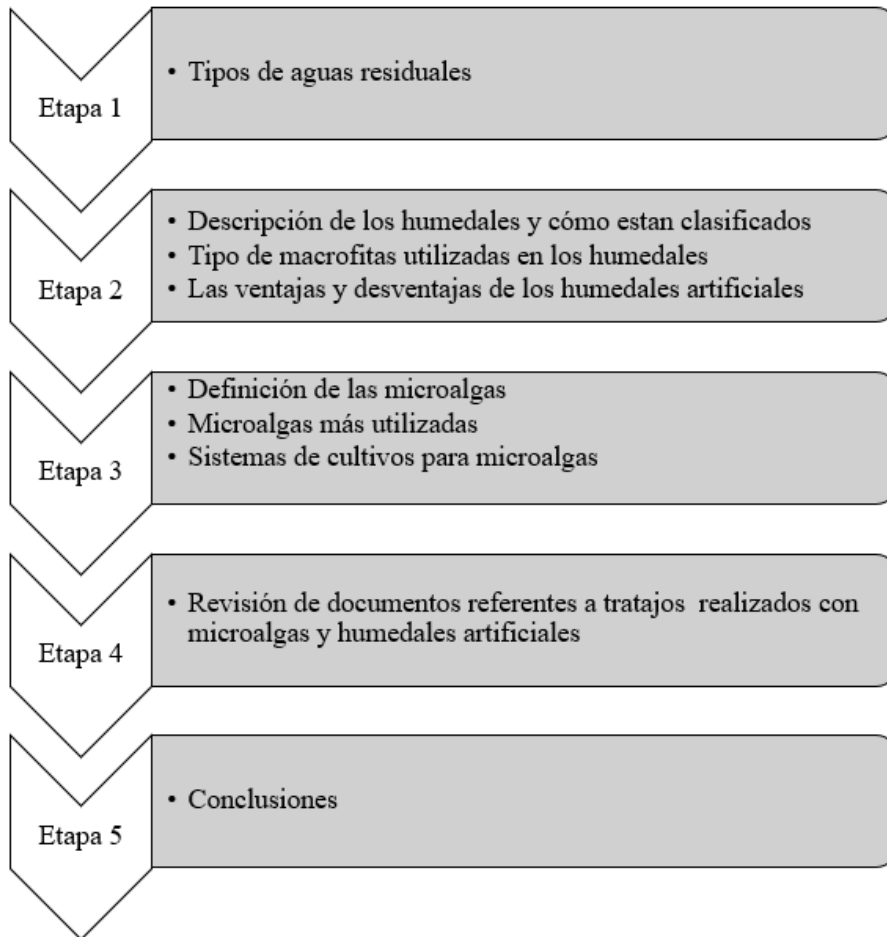
3.4 Criterios de inclusión y exclusión

Para que pudiese realizarse la revisión, fue necesario que durante el recorrido bibliográfico se discriminaran las consultas que se usarían y las que se prescindirían, dependiendo la pertinencia de las mismas. El criterio de cribado se inicia por la localización geográfica, a saber, se pretende hacer un diagnóstico nacional a modo general en el contexto colombiano. De igual forma, no se tuvieron en cuenta fuentes que carecieran de contextualización sobre los conceptos de manejo de microalgas y humedales artificiales.

Para seguir un orden estructurado, en el desarrollo de la metodología se plantearon las etapas expuestas en la Figura 1, las cuales permitieron dar cumplimiento a cada objetivo planteado.

Figura 1

Etapas de la metodología



Nota: En la figura se muestran las cinco etapas de la metodología propuesta

4. Resultados

4.1 Las aguas residuales

Las aguas residuales se caracterizan por tener una calidad deficiente, lo cual les impide ser utilizadas para un fin inmediato, es decir, que deben someterse a procesos de tratamiento para eliminar la carga contaminante que poseen. Como definición general, se tiene que las aguas residuales son “aquellas aguas cuyas características originales han sido modificadas por actividades humanas y que por su actividad requieren un tratamiento previo, antes de ser reusados,

vertidas a un cuerpo natural de agua o descargadas al sistema de alcantarillado”. (Clima de Cambios, 2019, párr. 6). Dichas características que fueron modificadas contienen impurezas de origen doméstico, industriales, entre otros.

Las aguas residuales presentan diversos tipos de características, en las cuales encontramos las físicas, las químicas y las microbiológicas. En las características físicas encontramos los sólidos totales, los olores, la temperatura, el color, la turbiedad, y el pH. García (2014) afirma que los sólidos totales son la materia obtenida como residuo luego de realizarse un proceso de evaporación del agua entre 103° y 105° . Otra característica física es el olor, el cual se caracteriza por la presencia de sulfuro de hidrógeno que resulta al reducirse los sulfatos a sulfitos, gracias a los microorganismos anaerobios. La temperatura de estas aguas es más alta que la del agua potable, debido a las actividades domésticas e industriales que se realizan. En cuanto al color, este suele ser gris, sin embargo, al aumentar la presencia de bacterias anaerobias, el color cambia gradualmente de gris a gris oscuro y luego a negro, convirtiéndose en agua residual séptica.

Por otra parte, se encuentran las características químicas, entre las cuales se incluye la Demanda Química de Oxígeno (DQO), la Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO), la dureza total, alcalinidad, nitrógeno y metales pesados. En su trabajo, Rincón, Benavides y Silva exponen que la DQO determina el requerimiento de oxígeno necesario para el proceso de oxidación de sustancias susceptibles (2016), es decir, se oxida materia orgánica en una muestra hídrica, manipulando las condiciones de agente oxidante, temperatura y tiempo.

Este proceso se realiza con el objetivo de medir la cantidad de materia orgánica presente tanto en las aguas naturales como en las residuales. Para hacer una conceptualización más precisa, la DBO se define como “la cantidad de oxígeno que los microorganismos, especialmente bacterias (aeróbicas o anaeróbicas), hongos y plancton, consumen durante la degradación de las sustancias

orgánicas contenidas en la muestra” (Ibáñez, 2017, párr. 2). Mediante este parámetro es posible determinar el grado de contaminación que tiene el agua. Otra característica importante para el conocimiento acerca de las aguas residuales es la dureza total del agua, la cual es la concentración de compuestos minerales como sales de magnesio y calcio. El agua con mayor presencia de sales se denomina “dura”, y el agua con cantidades menores se denomina “blanda”.

También es importante mencionar que otra característica de las aguas residuales es la alcalinidad. García aclara que la alcalinidad “está provocada por la presencia de hidróxidos, carbonatos y bicarbonatos de elementos como el calcio, el magnesio, el sodio, el potasio o el amoníaco”. (García, 2014, p. 34). Gracias a esta propiedad es posible regular los cambios de pH del agua, lo que la convierte en un elemento fundamental en la implementación de tratamientos químicos para la eliminación biológica de nutrientes.

Además, en las aguas residuales encontramos elementos como el níquel (Ni), manganeso (Mn), plomo (Pb), cromo (Cr), cadmio (Cd), Zinc (Zn), cobre (Cu), hierro (Fe) y mercurio (Hg), que son importantes para el desarrollo y preservación de la vida biológica.

Dentro de las características microbiológicas de las aguas residuales encontramos la presencia de microorganismos tales como bacterias y hongos, algunos de ellos provenientes de excremento humano y de animales.

De acuerdo a las actividades que generan contaminación en el agua, estas se pueden clasificar en aguas residuales domésticas, aguas residuales pecuarias, aguas residuales de origen agrícola, aguas residuales industriales, aguas residuales de escorrentía urbana.

Inicialmente se encuentran las aguas residuales domésticas. Zambrano y Saltos las definen como aquellas que provienen de viviendas o establecimientos comerciales de carácter público o privados, y se componen por aguas fecales y aguas de lavado y limpieza. Dentro de estas aguas

existen contaminantes como gérmenes, materia orgánica, detergente, patógenos, sólidos, entre otros (2008).

En cuanto a las aguas residuales pecuarias, estas son producto de la actividad ganadera, donde se vierten a los causes contaminantes como estiércol, compuestos de establos. Los mismos autores plantean que sus características son similares a las aguas residuales domésticas, pues los contaminantes proceden de residuos fecales de animales de agua caliente (Zambrano y Santos, 2008).

Las aguas residuales de origen agrícola contienen fertilizantes, compost, estiércol y otros contaminantes que los arrastran por las aguas lluvias. También se destacan compuestos inorgánicos como nitrógeno, fósforo, pesticidas y demás. Por otra parte, las aguas residuales industriales son producto de la actividad industrial y se convierten en aguas de proceso o de limpieza, caracterizándose cada una de ellas, por su variedad y variabilidad.

Con respecto a las aguas de escorrentía urbana, en estas “el agua de escorrentía realiza un efecto de lavado en las superficies que recorre, transportando los contaminantes presentes en ellas”. (Ortiz et al., 2013, p. 18). Por lo anterior, resulta difícil detectar el origen de los contaminantes que contiene.

De acuerdo con lo anterior, la calidad de las aguas se ve afectada por diversos tipos de contaminantes entre los cuales se encuentran los físicos, químicos y biológicos. Entre sus características químicas se encuentran los contaminantes orgánicos. Al respecto, Raffo y Ruiz afirman que los contaminantes orgánicos producen una disminución en el oxígeno, ya que este se requiere para la degradación biológica de los compuestos, produciéndose carbohidratos, hidrocarburos, ácidos grasos y aminoácidos (2014).

4.2 Las macrófitas

Este tipo de planta se puede diferenciar fácilmente, debido a que son aquellas que se pueden apreciar a simple vista. La mayoría de estas plantas presentan semillas, por lo cual se consideran angiospermas (Mera, 2016). Ahora bien, en estudios hídricos, especialmente sobre los humedales, el término macrófita se refiere específicamente a las macrófitas acuáticas, obviando dicha aclaración. Estas plantas operan como trampas o coladores biológicos que alteran el material contaminante y fijan las sustancias metálicas presentes en el agua a sus raíces y tallos metabolizándolos. Gran cantidad de estudios reflejan que el uso de macrófitas en aguas contaminadas tiene la capacidad de absorber metales pesados como Pb, Cd, Cu, Fe, Ni, Mn, y Cr. (Quispe, Arias, Martínez, y Cruz, 2017).

Ahora bien, las macrófitas requieren de unos nutrientes específicos, los cuales se exponen en la tabla que se presenta a continuación.

Tabla 1

Nutrientes requeridos por las macrófitas

Macronutrientes	Micronutrientes	Oligoelementos
Nitrógeno	Azufre	Hierro
Fosforo	Calcio	Magnesio
Potasio	Magnesio	Cobre
		Zinc
		Boro
		Molibdeno
Proporción de 1-2%, 0,1-1% y 0,5-1% del peso seco	Proporción < 0.5%	Proporciones muy pequeñas (ppm)

Nota: En la tabla se muestran los nutrientes requeridos por las macrófitas. Tomado de *Evaluación de la bioconcentración de dos especies de macrófitas acuáticas (Eichhornia crassipes y Lemna spp) en la fitorremediación de un medio contaminado con plomo* (p.13), por Mera Ponce, S. (2016).

Macrófitas más utilizadas en los humedales artificiales

Las plantas acuáticas representan un papel importante en los humedales, dado que, principalmente, sus raíces ayudan a abrir conductos para la transferencia de oxígeno. Por otro lado, también existen grandes cantidades de especies de plantas cuya función es la eliminación de nutrientes de las aguas residuales, la mayoría de ellas tienen la capacidad de adaptarse a cuerpos de aguas quietas, en movimiento, aguas dulces, salobres y saladas, en todas las condiciones climáticas; básicamente, se adaptan a todas las formas hídricas. Las plantas acuáticas en la literatura se mencionan como *traqueófitos acuáticos* o *cormofitos acuáticos*. Comúnmente en la actualidad se conoce como macrófitas acuáticas (aunque esta precisión generalmente se obvia), lo que significa que no tienen un sentido taxonómico preciso.

No obstante, para establecer un criterio de diferenciación, se determinan dos tipos de macrófitas (acuáticas), a saber, las fijas al sustrato, las cuales se subdividen entre emergentes, las flotantes, y las sumergidas; y las flotantes libres.

Caballero sirve como referente para esta caracterización, puesto que en su tesis doctoral especificó la información recabada en este apartado. Las macrófitas emergentes pueden llegar a medir 1,50 m; este tipo de macrófitas poseen los órganos reproductivos externos, y por lo general son plantas rizomatosas. ejemplos de estas, como lo son las *Eleocharis sp*, *Ludwigia sp*, *Phragmites sp*, *Schoenoplectus sp*, *Typha sp*, *Zizaniopsis sp* (Caballero 2013). El mismo autor refiere a las macrófitas flotantes, a saber, las *Nuphar sp*, *Nymphaea sp*, *Potamogeton natans* y *Nymphoides sp* (Caballero, 2013). Las macrófitas sumergidas se encuentran en suelo sumergidos en agua, presentan órganos reproductivos flotantes, aéreos o sumergidos como ejemplo encontramos la *Elodea sp*, *Egeria sp*, *Hydrilla sp*, *Potamogeton sp*, *Aponogeton sp*, *Isoetes sp* y *Vallisneria sp* (Caballero, 2013).

Por último, en el grupo de las macrófitas flotantes libres, se encuentran plantas con morfología variable con hojas aéreas o flotantes las más comunes son *Eichhornia crassipes*, *limnobium sp*, *pistia sp*, *Lemna sp*, *Spirodela sp*, *Wolffiasp* (Caballero, 2013).

4.3 Los humedales artificiales

Estos sistemas son muy eficientes a la hora de tratar las aguas residuales, gracias a que utilizan la energía que proviene del sol, lo que indica un gasto económico bajo. Se pueden implementar en cualquier sitio como veredas, campos y ciudades ya que no dispone de energía eléctrica. Estos humedales incluyen aspectos de tecnología y mantenimiento humano, lo que genera que sean más eficientes en cuestiones de utilidad. Se categorizan en varias formas: de flujo superficial, flujo subsuperficial (flujo subsuperficial horizontal, flujo subsuperficial vertical). La manera como operan es por medio de macrófitas, las cuales cuentan con una clasificación dependiendo si son enraizadas, emergentes, flotantes o sumergidas. Estas plantas ayudan a la degradación de la materia orgánica.

Los humedales artificiales tienen la capacidad de eliminar sólidos suspendidos que se encuentran en el agua residual, y, como se mencionaba en líneas anteriores, cumplen un papel fundamental en la remoción de nutrientes y en la eliminación de contaminantes químicos. Todos estos procesos se dan gracias a que los contaminantes, en su mayoría, se sedimentan en el lecho del humedal; otro proceso que también interviene es la absorción que hacen las macrófitas y las bacterias que ayudan a la descomposición de los contaminantes (González y Lozada, 2013). El tratamiento de las aguas residuales -agregan los mismos autores- presenta tres puntos: la recogida del agua, el tratamiento que se le da y la disposición final.

Entre las muchas funciones y beneficios que se obtienen con el uso de humedales artificiales, se presentan a continuación los usos más recurrentes en la siguiente tabla.

Tabla 2: Funciones de los humedales artificiales

Tipo	Proceso Involucrado	Contaminación tratada
Fitoextracción	Las plantas se usan para concentrar metales en las partes cosechables (hojas y raíces)	Cadmio, cobalto, cromo, níquel, mercurio, plomo, selenio, zinc
Rizofiltración	Las raíces de las plantas se usan para absorber, precipitar y concentrar metales pesados a partir de efluentes líquidos contaminados y degradar compuestos orgánicos	Cadmio, cobalto, cromo, níquel, mercurio, plomo, plomo selenio, zinc isotopos radiactivos, compuestos fenólicos
Fitoestabilización	Las plantas tolerantes a metales se usan para reducir la movilidad de los mismos y evitar el pasaje a napas subterráneas o al aire	Lagunas de deshecho de yacimientos mineros. Planteado para fenólicos y compuestos clorados.
Fitoestimulación	Se usan los exudados radiculares para promover el desarrollo de microorganismos degradativos (bacterias y hongos)	Hidrocarburos derivados del petróleo y policromáticos, benceno, tolueno, atrazina, etc.
Fitovolatización	Las plantas captan y modifican metales pesados o compuestos orgánicos y los liberan a la atmosfera con la transpiración	Mercurio, selenio y solventes clorados (tetraclorometano y triclorometano)
Biodegradación	Las plantas acuáticas y terrestres captan, almacenan y degradan compuestos orgánicos para dar subproductos menos tóxicos o no tóxicos.	Municiones (TNT, DNT, RDX, nitrobenceno, nitrotolueno), atrazina, solventes clorados, DDT, pesticidas fosfatados, fenoles y nitrilos, etc.

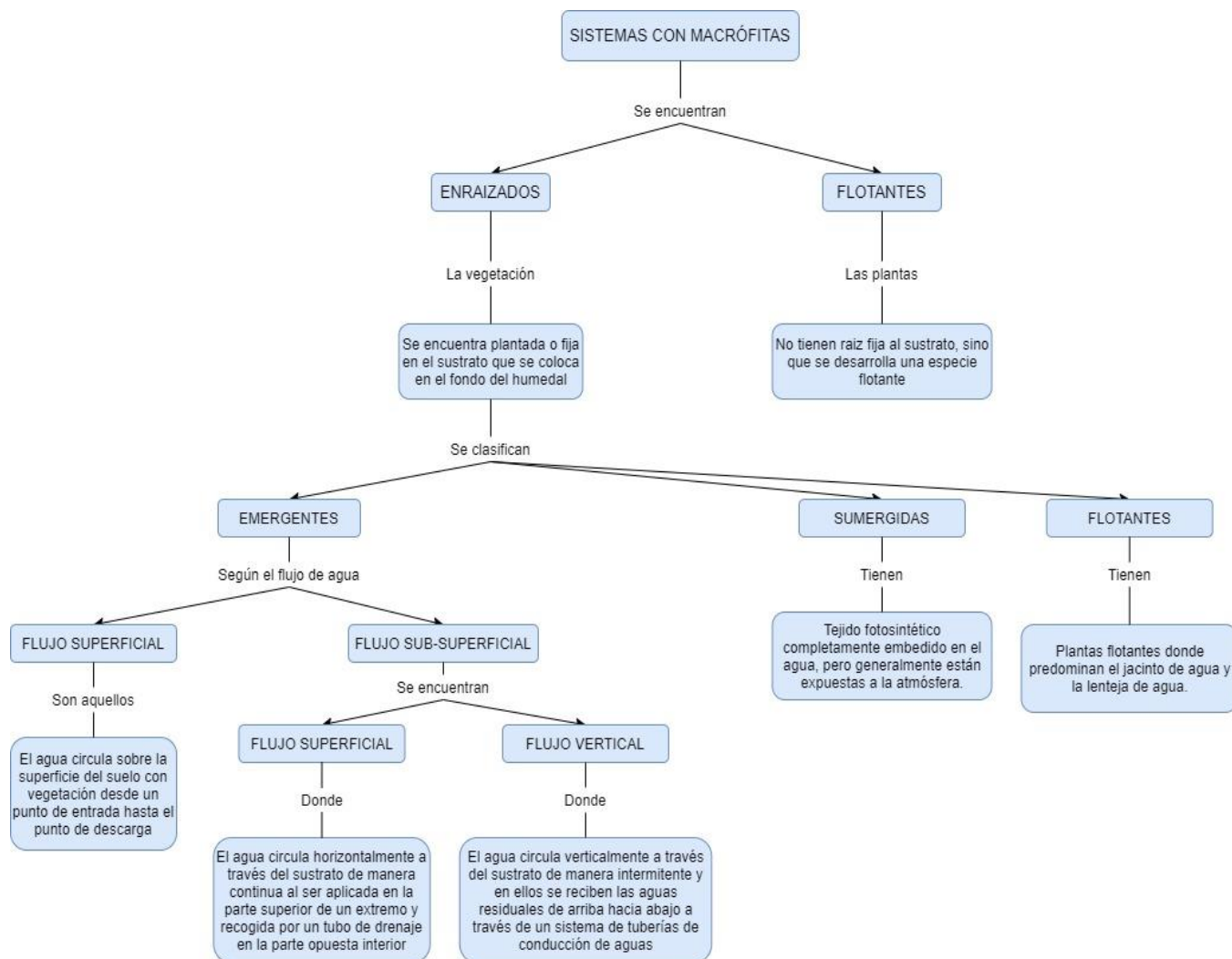
Nota: En la tabla se muestran las principales funciones de los humedales artificiales. Tomado de *Humedales artificiales*, por Frers (s.f.).

4.4 Clasificación de los humedales artificiales

En la Figura 2 se muestra un organizador gráfico con la clasificación de los humedales artificiales, apreciándose su diferencia según el tipo de plantas que utilicen y según su flujo de agua.

Figura 2

Clasificación de los humedales artificiales



Nota: En la Figura se muestra la clasificación de los humedales artificiales. Tomado de *Rediseño humedal artificial para depuración de aguas residuales y reúso: modelo didáctico laboratorio de recursos hídrico* (p.11), por Morales y Castellanos, 2018.

4.4.1 Humedal artificial de flujo superficial

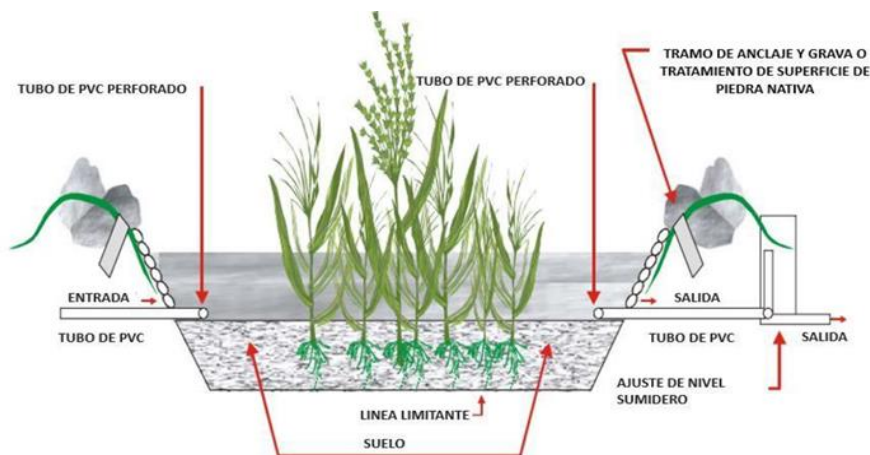
Son los humedales de flujo horizontal: el agua fluye de manera superficial por los tallos de las plantas, lo que significa que el agua está expuesta a la atmósfera lo que le permite obtener

oxígeno. Este tipo de sistema es una forma de imitar los humedales naturales, lo que indica la atracción de animales silvestres (Kadlec y Wallace, 2007). Este tipo de tratamiento se aplica para darle una mejor calidad a las aguas residuales. Las aplicaciones más comunes que se le da a este tipo de tratamientos son a las aguas residuales urbanas, aguas que provienen de la lluvia y las aguas que genera la minería (Oliver, 2017).

El humedal de flujo horizontal está compuesto por la zona de tubería de captación donde se regula la entrada del agua al sistema, un canal donde se va a depositar el agua que tiene una profundidad entre 0,6 m y 1,5 m, y el material vegetal que realizará la absorción de nutrientes; también se encontrará el material granular donde las macrófitas se enraizarán, una capa bien sea de cemento o grava para evitar la infiltración del agua al suelo y de esta manera evitar que se contamine el agua subterránea y el tubo de salida (Luna y Aburto, 2014). A continuación, en la Figura 3 se muestra gráficamente el sistema de este tipo de humedal artificial.

Figura 3

Humedal artificial de flujo superficial



Nota: En la Figura se muestra un ejemplo de un Humedal artificial de flujo superficial. Tomado de *Rediseño humedal artificial para depuración de aguas residuales y reúso: modelo didáctico laboratorio de recursos hídrico* (p.12), por Morales y Castellanos, 2018.

Las plantas se encuentran a una profundidad de 0,1 a 0,45 m, la eliminación de los contaminantes del agua se genera cuando el agua pasa por los tallos y la raíz de las plantas. En la mayor parte de las veces estos humedales son alimentados con agua residual con un previo tratamiento y se pueden destinar para usos secundarios y terciarios (Espinosa, 2014). Estos humedales son bastante llamativos ya que brindan hábitat para una gran variedad de fauna.

La vegetación que más se utiliza en este tipo de humedales por su eficiencia a la hora de remover contaminantes del agua está conformada por: Espadañas y Aneas (*Typha Scirpus*), los Juncos (*Scirpus spp.*) y los Carrizos (*Phragmites spp.*) (United States Environmental Protection Agency , 2000). Añadido a lo anterior, se tiene que en humedales de este tipo “se pueden alcanzar rendimientos por encima del 70% para los sólidos suspendidos, materia orgánica y patógenos. En cambio, los rendimientos para el Nitrógeno oscilan entre 40-50% y para el Fósforo entre el 40-90%” (Oliver, 2017, p.19).

Por último, en la siguiente tabla se sintetizan a continuación las ventajas y desventajas de los humedales artificiales de flujo superficial.

Tabla 3

Ventajas y desventajas de los humedales artificiales de flujo superficial

Ventajas	Desventajas
Proporcionan tratamiento en forma efectiva y pasiva. A demás minimizan la necesidad de equipos mecánicos, electricidad y monitoreo por parte de personal especializado	Las necesidades de terreno de estos humedales pueden ser grandes, especialmente si se requiere la remoción de nitrógeno.
Pueden ser menos costosos de construir, operar y mantener, que los procesos mecánicos de tratamiento	El fósforo, los metales y algunos compuestos orgánicos persistentes que son removidos, permanecen en el sistema ligados al sedimento y por ello se acumulan con el tiempo.

La operación a nivel de tratamiento secundario es posible durante todo el año con excepción de los climas fríos. La operación a nivel de tratamiento terciario avanzado es posible durante todo el año en climas cálidos y semicálidos	En climas fríos las bajas temperaturas durante el invierno reducen la tasa de remoción de DBO y de las reacciones biológicas responsables por la nitrificación y desnitrificación.
Proporcionan la incorporación de hábitat de vida silvestre y oportunidades para la recreación pública.	La mayoría del agua contenida en los humedales de flujo libre es esencialmente anóxica, limitando el potencial de nitrificación rápida del amoníaco.
No producen biosólidos y lodos residuales que requieran tratamiento subsiguiente y disposición.	Los mosquitos y otros insectos vectores de enfermedades pueden ser un problema.
La remoción de DBO, SST, DQO, metales y compuestos orgánicos refractarios de las aguas residuales domésticas puede ser muy efectiva con un tiempo razonable de retención.	

Nota: En la tabla se presentan las ventajas y desventajas de los humedales artificiales de flujo superficial. Extraída de *Factibilidad del diseño de un humedal de flujo subsuperficial para el tratamiento de aguas residuales municipales de 30.000 habitantes* (p.33), por Espinosa, 2014.

4.4.2 Humedales artificiales de flujo subsuperficial

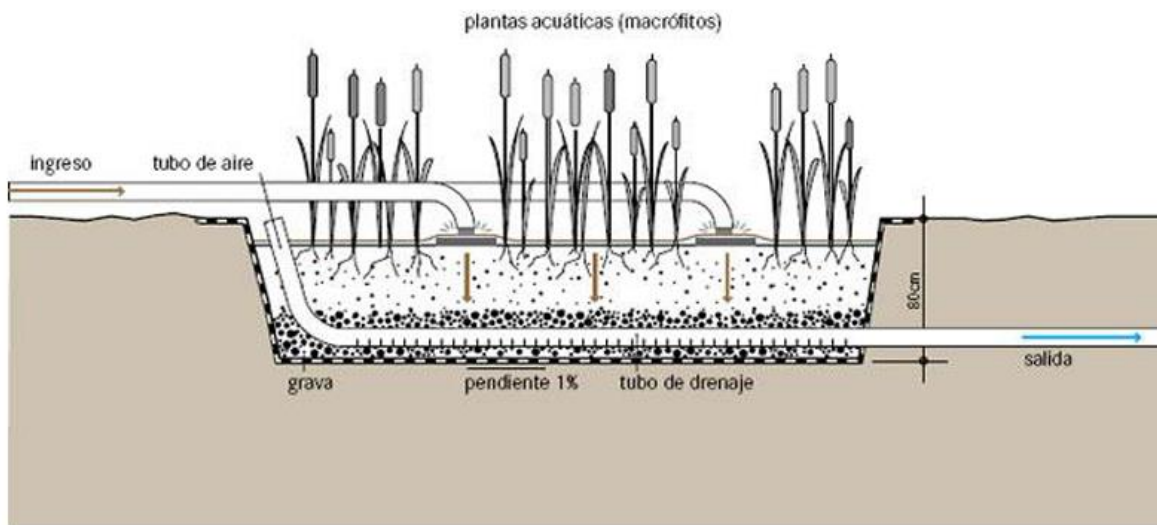
Los humedales de flujo subsuperficial (HFS) Son diseñados para que el agua circule por las raíces de las plantas, por ende, no muestran un área libre de flujo. Este diseño radica en una excavación que contiene material filtrante, plantas y microorganismos. La grava da un soporte al crecimiento de la vegetación emergente, también la base del lecho está cubierta por un material impermeable que evita la filtración del agua (Peña, Van Ginneken, y Madera, 2003). Delgadillo et al (2010) dan detalles específicos de cómo se configura este tipo de humedal artificial:

El sistema de recogida consiste en un tubo de drenaje cribado, rodeado con grava de igual tamaño que la utilizada al inicio. El diámetro de la grava de ingreso y salida oscila entre 50 mm a 100 mm. La zona de plantación está constituida por grava fina de un solo diámetro, de entre 3 mm a 32 mm. (p.10).

El agua baja por gravedad pasando por cada una de las capas del humedal donde interactúa con las raíces de las plantas y microorganismos del humedal. Es indispensable que el agua nunca esté por arriba de la superficie del sustrato. Ahora bien, en la Figura 4 se representa gráficamente un humedal artificial de flujo subsuperficial.

Figura 4

Humedal artificial de flujo subsuperficial



Nota: En la figura se muestra un ejemplo de humedal artificial de flujo subsuperficial. Tomado de *Depuración de aguas residuales por medio de humedales artificiales* (p.10), por Delgadillo et al. (2010).

Ahora bien, se sintetizan a continuación las ventajas y desventajas de los humedales artificiales de flujo subsuperficial.

Tabla 4

Ventajas y desventajas de los humedales artificiales de flujo subsuperficial

Ventajas	Desventajas
Proporcionan tratamiento efectivo en forma pasiva y minimizan la necesidad de equipos mecánicos, electricidad y monitoreo por parte de personal.	El fósforo y algunos compuestos orgánicos persistentes que son removidos permanecen en el sistema ligados al sedimento y por ello se acumulan con el tiempo

Puede ser menos costoso construir, operar y mantener, que los procesos mecánicos de tratamiento. Requiere un área extensa en comparación con los sistemas mecánicos convencionales

La configuración de los humedales de flujo subsuperficial proporciona una mejor protección térmica que los humedales de flujo libre. La mayoría del agua que se encuentra en estos humedales es anóxica limitando el potencial de nitrificación rápida del amoniacó

No producen biosólidos o lodos residuales que requieran tratamiento subsiguiente. En climas fríos las bajas temperaturas reducen la captación de DBO BH₃ y NO₃

La remoción de DBO, SST, DQO, metales y compuestos orgánicos refractarios de las aguas residuales domésticas puede ser muy efectiva con un tiempo razonable de retención. La remoción de nitrógeno y fósforo a bajos niveles puede ser también efectiva con un tiempo mayor de retención

Los moscos u otros insectos vectores no son un problema con los humedales de flujo subsuperficial, mientras el sistema se opere adecuadamente y el nivel subsuperficial del flujo se mantenga. Los humedales de flujo subsuperficial pueden ser de menor superficie que los de flujo libre, para la remoción de la mayoría de los constituyentes de agua residual, el costo del medio de grava en los sistemas de flujo subsuperficial puede dar como resultado costos de construcción más alto

Nota: En la tabla se presentan las ventajas y desventajas de los humedales artificiales de flujo subsuperficial. Tomada y adaptada de *Factibilidad del diseño de un humedal de flujo subsuperficial para el tratamiento de aguas residuales municipales de 30.000 habitantes* (p.35), por Espinosa, 2014.

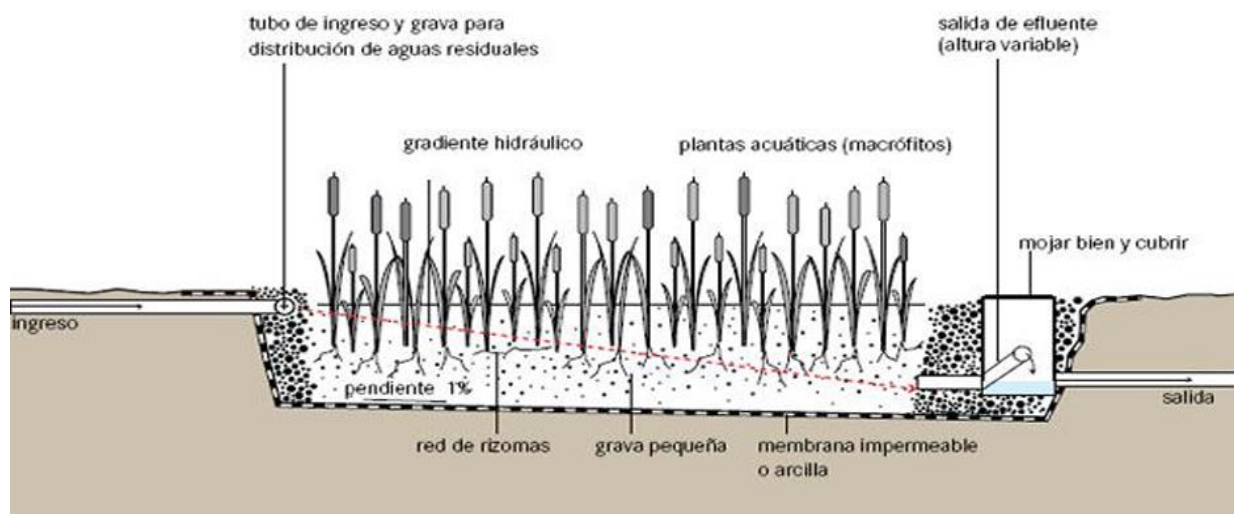
Según García y Corzo (2008), los humedales de flujo subsuperficial pueden ser de dos tipos: subsuperficial de flujo horizontal y subsuperficial de flujo vertical.

4.4.2.1. Humedales subsuperficiales de flujo horizontal. En estos sistemas, el agua fluye horizontalmente a través del lecho granular y los tallos de las macrófitas, por tal razón, estos se caracterizan por estar siempre empantanados. El agua se deposita alrededor de 0,05 y 0,1 m debajo de la superficie del suelo de manera uniforme (García y Corzo, 2008). Este sistema de tratamiento de aguas residuales está compuesto por aberturas al inicio del afluente y esta permeabilizado con arcillas o laminas sintéticas, el medio granular y el material vegetal emergente apta para este tipo

de sistema y un medio de salida para la disposición final del efluente. El medio granular comprende una parte importante en el proceso, ya que retiene y sedimenta la materia orgánica en suspensión y la descomposición de la materia orgánica recolectada (García y Corzo, 2008). Este tipo de humedales son muy eficientes a la hora de remover DBO Y SST. Muestran una eficiencia del 91% para SST, 89% para la remoción de DBO, 33% para Nitrógeno total y un 32% de Fósforo total (Espinosa, 2014). No obstante, este tipo de mecanismo no es muy eficiente para remover nutrientes. A continuación, en la Figura 5 se representa gráficamente este tipo de humedal artificial de flujo subsuperficial.

Figura 5:

Humedal subsuperficial de flujo horizontal



Nota: En la figura se muestra un ejemplo de humedal subsuperficial de flujo horizontal. Tomado de *Humedales de Flujo Subsuperficial: Una Alternativa Natural para el Tratamiento de Aguas Residuales Domésticas en Zonas Tropicales* (p.2), por Peña Varón, M., Van Ginneken, M., Madera, C. (2003).

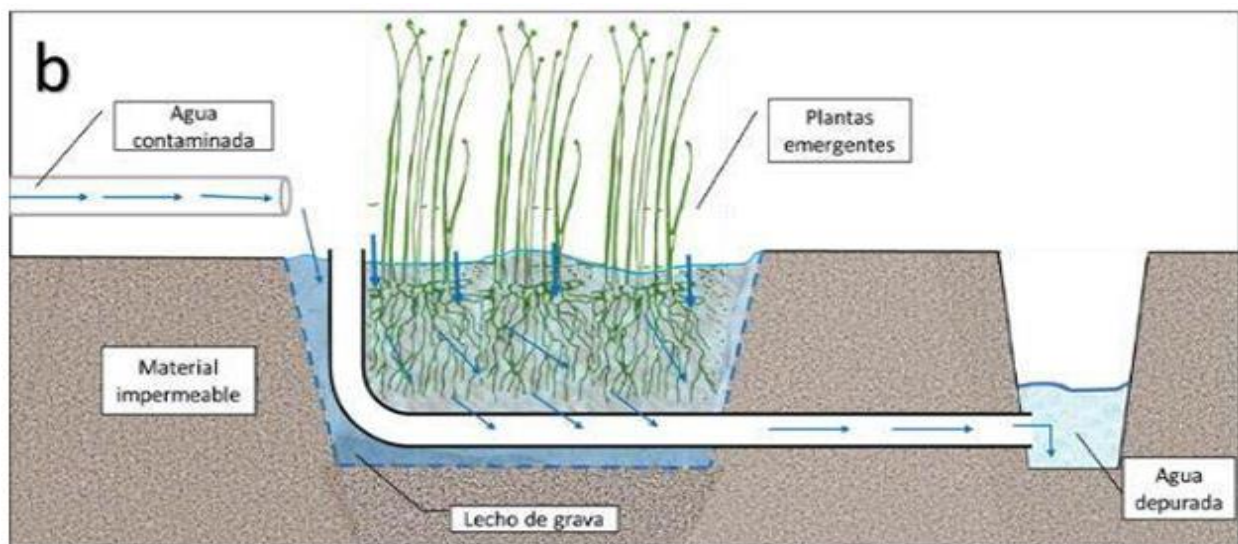
Las plantas que se emplean en este sistema son la mismas que se dan en los humedales naturales, a saber, plantas acuáticas que se desarrollan en aguas con poca profundidad. La ventaja que tienen estas plantas es que poseen la capacidad de sobrevivir en suelos con poco oxígeno, en

otras palabras, en condiciones de anaerobiosis (Mella, 2018).

4.4.2.2 Humedales subsuperficiales de flujo vertical. En este tipo de humedales el agua circula de arriba hacia abajo, por medio del material filtrante. El agua es adicionada por un sistema de dosificación mecánico, en el cual el dosificador toma periodos de saturación; el agua en este caso pasa por periodos aerobios y anaerobios (Arce, 2018). Los humedales de flujo vertical son una alternativa óptima para depurar aguas residuales con corrientes de agua continua o discontinua, como por ejemplo para tratamiento de aguas que provienen de viviendas o de colegios. En la Figura 6 se representa gráficamente un humedal subsuperficial de flujo vertical.

Figura 6

Humedal subsuperficial de flujo vertical



Nota: En la Figura se muestra un ejemplo de un humedal subsuperficial de flujo vertical. Tomado de *Rediseño humedal artificial para depuración de aguas residuales y reúso: modelo didáctico laboratorio de recursos hídrico* (p.15), por Morales y Castellanos, 2018

La vegetación que se emplea en este tipo de humedales subsuperficiales son las *Zizaniacaduciflora*, las *Scirpusvalidus*, las *Iris pseudacorus*, y las *Phragmitesaustralis*. Estas plantas tienen un excelente crecimiento y reproducción en condiciones con mucha humedad; de igual manera tienen la ventaja de sobrevivir en temporadas secas y se caracterizan por poseer una

altura más o menos de 1m (Rodríguez, 2013).

4.5 Revisión bibliográfica de trabajos relacionados con el tratamiento de aguas residuales mediante humedales artificiales

En la tesis doctoral *Sistema de depuración de aguas residuales de origen ganadero. Humedales artificiales* (2013), Caballero plantea un tratamiento de depuración de purines de cerdo como alternativa para los ganaderos carentes de suficientes tierras fértiles. Caballero realiza un estudio en un Centro Integrado de Formación y Experiencias Agrarias durante cinco años, en el cual ejecutaba una serie de tratamientos al purín que provenía de una fosa subterránea; dicho proceso consistía, sobre todo, en la separación, aireación y espesado de fangos, decantación, y, por último y más importante, el sometimiento a humedales artificiales y balsa abierta de microalgas. El estudio demostró que el uso de sustratos como la grava calcárea, las plantaciones de *Phragmites australis* (con densidades de 0,5 Y 10 plantas/m²) y los tiempos de retención hidráulica de 1 semana-1 mes, 1-2 meses, 2-4 meses y superior a 4 meses, son estrategias eficientes para suprimir agentes contaminantes. Los humedales artificiales que Caballero usó en su estudio trabajaban por lotes y no a flujo continuo, lo cual era conveniente de acuerdo a la naturaleza del purín. A continuación, se muestran las especificaciones de los resultados:

La fase líquida depurada mediante el conjunto de tratamientos ha mostrado un descenso, en general, del 19% de la conductividad eléctrica, 89% de los sólidos totales en suspensión, 100% de los sólidos sedimentables, 90% de la demanda bioquímica de oxígeno en cinco días, 91% de la demanda química de oxígeno, 97% del fósforo total, 96% del cobre, 92% del zinc, 89% del nitrógeno total, 87% del nitrógeno amoniacal, 91% del nitrógeno orgánico, 21% del nitrato, 37% del bromuro, 4% del sulfato, 42% del calcio, 9% de las bacterias aerobias mesófilas, 78% de los coliformes

totales, 70% de los coliformes fecales, 75% de los estreptococos fecales, y 100% de *Salmonella*, *Shigella* y *Escherichia coli*. No obstante, se ha observado un aumento del 36% del potencial redox, y diferentes incrementos de algunos cationes como cloruros, sodio, potasio y magnesio. Los tratamientos de separación mecánica eliminaron mayoritariamente los sólidos totales en suspensión, los sólidos sedimentables, la demanda bioquímica de oxígeno en cinco días, la demanda química de oxígeno, el fósforo total, el cobre y el zinc. En los humedales principalmente se eliminaron sólidos totales en suspensión, sólidos sedimentables, demanda bioquímica de oxígeno, demanda química de oxígeno, fósforo total, cobre, zinc, nitrógeno total, nitrógeno amoniacal, nitrógeno orgánico y microorganismos patógenos. El tratamiento de biorremediación por la acción de las microalgas, una de ellas identificada como *Scenedesmus sp*, eliminó cobre, zinc, nitrógeno total, nitrógeno amoniacal y fundamentalmente nitrato. (Caballero, 2013, pp. 8-9).

En la investigación *Propuesta de tratamiento de aguas residuales domésticas implementando un humedal artificial de flujo subsuperficial empleando bambusa sp en la finca el recreo, ubicada en Tauramena, Casanare* (2017), Carvajal, Ortiz, y Vega proponen un diseño de humedal de flujo subsuperficial que utilizó la macrófita *Bambusa sp*, para el tratamiento de aguas residuales de origen doméstico en una finca en Tamaurena, Casanare. La metodología empleada consistió en una caracterización inicial de los componentes físicos, químicos y microbiológicos de las aguas residuales producidas por la finca, usando 19 parámetros de calidad, posteriormente se configuró el diseño y se empleó un pilotaje con la *Bambusa sp* como variable experimental, en comparación con el uso de la *Heliconia psittacorum* como variable de control. Posterior a la realización del pilotaje, se realizaron de nuevo las mediciones de calidad aplicadas inicialmente

con un análisis *in situ* e *in vitro*, en donde se priorizaron los valores de DBO, DQO, grasas y aceites y fósforo, principalmente. Se exponen los resultados:

La demanda química de oxígeno para aguas residuales domésticas de 768 mg/L de O₂ mostraron una disminución en el parámetro en la prueba piloto utilizando *Bambusa sp* a 288 mg/L de O₂ e incluso más para *Heliconia psittacorum* De 44,8 mg / L de O₂, La demanda bioquímica de oxígeno (DBO) para las aguas residuales no tratadas fue de 446 mg / L de O₂, seguida de *Bambusa sp* correspondiente a 186 mg / L de O₂ y la planta de control de 24 mg / L de O₂; el total de sólidos en suspensión para aguas residuales domésticas fue de 1407,5 mg / L, la prueba piloto de *Bambusa sp* de 557,5 mg / L y la prueba piloto *Heliconia psittacorum* de 516,25 mg / L; (N-NO₂-), color, dureza total, alcalinidad total, salinidad y pH (incremento positivo) de los 19 parámetros analizados (Carvajal, Ortiz, y Vega, 2017, p.66).

En el trabajo *Evaluación de Humedales Construidos en Los Altos de Jalisco: Los casos de Jesús María (Ojo Zarco) y Arandas (Martínez Valadez)* (2021), Castañeda evalúa la eficiencia del tratamiento a las aguas residuales de origen doméstico en población cercana a la ribera del lago Patzcuaro, en Michoacan, los cuales están constituidos por humedales artificiales. Los criterios de medición de calidad utilizados fueron Organismos Coliformes Totales, Organismos Coliformes Fecales, Demanda Química de Oxígeno, Conductividad Especifica, Nitrógeno total y Fósforo total. El estudio demostró reducciones significativas entre un 45 y un 95% en casi la totalidad de los criterios analizados, lo cual demuestra su pertinencia en el cumplimiento de los criterios de calidad. Ahora bien, durante el desarrollo narrativo del trabajo, Castañeda caracteriza las macrófitas utilizadas en Humedales de tratamiento locales, como la *Typha domingensis* (Espadaño) y *Eichhornia crassipes* (Jacinto de agua) en humedales artificiales de flujo libre utilizada en la

Universidad Autónoma de Tabasco, en Villahermosa, México con una eficiencia de entre 83.4 y un 97.8%; *Paspalum paniculatum* (Camalote) y *Cyperus articulatus* (Chintul) en humedales artificiales de flujo sub-superficial, con una eficiencia de entre 52.2 y un 94.8%, en tiempos de retención hidráulica de 5.5 a 7.5 días (Castañeda, 2021).

En el proyecto de investigación *Fitorremediación de aguas residuales industriales en humedales artificiales para uso agrícola* (2019)., los autores utilizaron un humedal artificial horizontal de flujo subsuperficial, que utilizaba la macrófita *Phragmites australis* (Carrizo común), como sistema de fitorremediación para optimizar los procesos de tratamiento de aguas residuales industriales. Como criterios de calidad, se analizaron las concentraciones de Nitrógeno Kjeldahl (NK), Fósforo (P), Boro (B) y Cromo (Cr). Se concluye que la macrófita *P. australis* es una especie fitoextractora muy eficiente en los procesos de tratamientos de aguas residuales. Específicamente, los resultados fueron los siguientes:

Los resultados del estudio mostraron que los niveles de contaminantes en agua fueron reducidos para ambos tiempos de retención hidráulicos (TRHs), siendo más efectivo para TRH = 3 días con eficiencias de remoción de 9,8, 78, 13 y 36 % para NK, P, B y Cr, respectivamente. Sin embargo, las eficiencias de absorción por *P. australis* en la parte aérea para NK, P y B fueron mayores a los 7 días. Por el contrario, el Cr fue retenido mayormente a los 3 días. (García-Valero et al. 2019, p.1).

En el trabajo *Aplicación de los humedales artificiales para el tratamiento de aguas residuales domésticas en pequeños centros poblados* (2022), Espitia, impulsado por las insuficiencias en la cobertura del servicio de tratamiento de aguas residuales, se propuso realizar un estudio que analizara la incidencia del saneamiento de aguas en población rural en el departamento de Córdoba. Los resultados mostraron cifras en las que la recolección de residuos

sólidos es -0,937, el alcantarillado es -0,866, la inadecuada eliminación de excretas es de 0,422 y el acceso a fuente de aguas mejoradas es un 0,477, lo que permite sugerir los humedales artificiales como una alternativa pertinente y amigable con el medio ambiente.

En el proyecto de investigación *Evaluación de medios de soporte en humedales artificiales con vegetación Sagittaria latifolia en la remoción de contaminantes básicos* (2019), los autores tuvieron como propósito evaluar la pertinencia de humedales artificiales de flujo subsuperficial en la remoción de contaminantes básicos en aguas residuales domésticas. Dichos humedales utilizaron la grava de canto redondo y la grava de brecha sedimentaria como medios de soporte, así como la macrófita *Sagittaria latifolia* (Cola de golondrina) y tiempos de retención de 4.8 días y 4.9 días, respectivamente. En la experimentación, se utilizaron tres humedales con vegetación y grava de canto redondo (HACC), tres con vegetación grava de brecha sedimentaria (HABC), tres humedales controles sin vegetación y grava de canto redondo (HACS) y tres sin vegetación y grava de brecha sedimentaria (HABS). El estudio concluye que este diseño de humedales artificiales posee un alto nivel de eficiencia con costos accesibles para su construcción y los procesos de mantenimiento. Específicamente, los resultados entre el diagnóstico y la evaluación final fueron:

Al inicio de la operación de los humedales artificiales, el medio de soporte canto redondo presentó los siguientes valores: densidad aparente de $1390.79 \pm 54.36 \text{ kg m}^{-3}$ (media \pm DE), densidad real de $2626.01 \pm 75.43 \text{ kg m}^{-3}$, porosidad $51.87 \pm 3.90 \%$ y conductividad eléctrica (CE) $125.46 \pm 11.81 \text{ dS m}^{-1}$. El medio de soporte brecha sedimentaria mostró una densidad aparente de $1415.63 \pm 43.94 \text{ kg m}^{-3}$ (media \pm DE), densidad real de $2678.16 \pm 36.67 \text{ kg m}^{-3}$, porosidad $52.86 \pm 1.56 \%$ y CE de $94.13 \pm 3.58 \text{ dS m}^{-1}$. Al término de la operación, el medio de soporte de canto redondo demostró ser eficiente con tan solo una pérdida de 5 % de porosidad, mientras que la brecha obtuvo una pérdida de 23 % de esta. En cuanto a la

calidad del agua, se analizaron 160 muestras compuestas para los cuatro tratamientos de humedales y 40 simples en el tanque de distribución alimentación (N=40). Después del primer año de operación, se observa que el HACC es el más eficiente, pues la remoción alcanzada fue de 96.85% para SST, 95.85% para DBO5, 96.78% para NT y 96.79% para PT. El tratamiento ABC, por su parte, consiguió eficiencias de remoción de 95.52% para SST, 95.02% para DBO5, 95.45% para NT y 95.36% para PT. (García, López, y Torres, 2019, p.2).

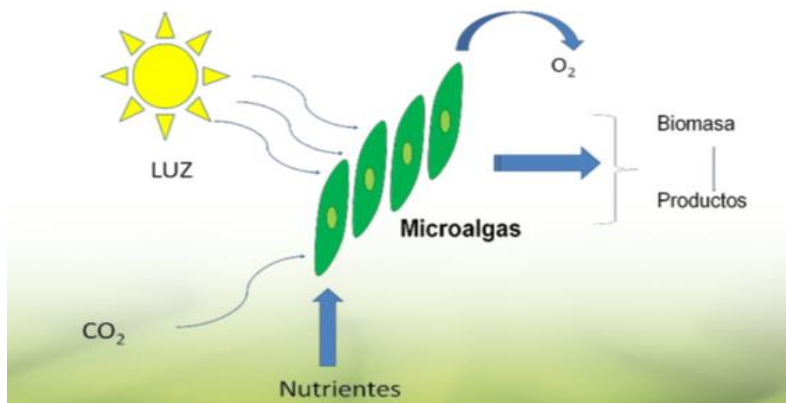
4.6 Microalgas

Son organismos unicelulares, eucariotas y fotosintéticos, y su crecimiento puede ser de manera autótrofo o heterótrofo. Estas se caracterizan porque son buenas fijadoras de CO₂. Para la producción de biomasa utilizan la luz del sol, y son los principales productores de materia orgánica gracias a las cualidades descritas anteriormente. La producción de microalgas se puede clasificar de cuatro maneras: fotoautótrofa, fotoheterótrofa, mixotrófica y heterótrofa.

Las microalgas se pueden encontrar en todos los ambientes terrestres y acuáticos como los son lagos, ríos y mares, incluso se pueden encontrar en ambiente con condiciones extremas como lo son volcanes y desiertos de hielo; su tamaño oscila entre 1µm y 2 mm de diámetro. Son tan diversas que se calcula una variedad más de 30.000 especies (Grupo Cooperativo Cajamar, 2015). En la Figura 7 se muestra cómo opera el mecanismo de producción de las microalgas.

Figura 7

Mecanismo de producción de las microalgas



Nota: En la figura se muestra el mecanismo de producción que poseen las microalgas. Tomado de *¿Que son las microalgas? Interés y uso* (p.1), por Grupo Cooperativo Cajamar, 2015.

Existen dos tipos de microalgas basados en las células, a saber, las procariotas, que son consideradas primitivas, y las eucariotas que poseen sistemas más complejos. Su calificación distingue los criterios desde las características morfométricas, pigmentación, composición de la pared celular, hasta el hábitat que ocupan (López, 2017).

Estos microorganismos tienen mucha similitud con las plantas convencionales, ya que su aparato fotosintético está constituido en organelos llamados cloroplastos; de igual forma, “poseen pigmentos fotosintéticos primarios como la clorofila, otros pigmentos como los Betacaroteno y fucoxantina (carotenoides), así como pigmentos accesorios: ficocianina y ficoeritrina” (Ayala, 2015, p.11).

Las microalgas se clasifican en tres grupos, según sus pigmentos. En el primer grupo, están las algas verdes (*Chlorophytes*), las cuales poseen la clorofila a y b; en el segundo, están las algas rojas (*Rhodophytes*), las cuales poseen clorofila a y ficobilinas; y las algas pardas-amarillas (*Chromophytes*), las cuales poseen clorofila a y c (Ayala, 2015). Ahora bien, las algas pardas-

amarillas o *Chromophytes* “al ser un grupo polifilético se encuentra subdividido en cuatro taxones: *Haptophytas*, *Dinoflagelados*, *Criptophytas* y algas heterocontas o *Xanthophyta*” (Ayala, 2015, p.12). En la tabla 5 se expone una clasificación de manera más organizada de estos organismos.

Tabla 5

Clasificación de las microalgas según sus pigmentos

División	Nombre común	Clorofila	Carotenoides	Sustancia de reserva	Hábitat
Chlorophyta	Algas verdes	a y b	β -caroteno Xantofilas	Azúcares Almidón fructosano Aceites	A. Dulce A. Salada Terrestre
Charophyta	Algas pétreas	a y b	a-caroteno β -caroteno Xantofilas	Almidón	A. Dulce
Euglenophyta	Euglenoides	a y b	β -caroteno Xantofilas	Paramilon Azúcares	A. Dulce A. Salada Terrestre
Chrysophyta	Algas amarillo-verdosas Algas pardas-doradas Diatomeas	a y c	β -caroteno Fucoxantina Xantofilas	Aceites	A. Dulce A. Salada Terrestre
Phaeophyta		a y c	β -caroteno Fucoxantina Xantofilas	Maniton Aceites	A. Salada
Rhodophyta	Algas rojas	a y d (pocas veces)	Xantofilas	Almidón florideano	A. Dulce A. Salada
Pyrrophyta	Dinoflagelados	a y c	β -caroteno Flocoxantina Dinozanotina	Almidón glucano	A. Dulce A. Salada

Nota: Esta tabla se realiza a partir de la tabla expuesta en *Microalgas*, por Editorial Grudemi, 2021.

En el medio se encuentran diferentes microalgas que son muy eficientes a la hora de remover nutrientes de las aguas residuales, y su eficiencia radica dependiendo de las condiciones

en las que se encuentren. Ahora bien, los géneros *Chlorella*, *Ankistrodesmus*, *Scenedesmus*, *Euglena*, *Chlamydomonas*, *Oscillatoria*, *Micractinium*, *Golenkinia*, *Phormidium*, *Botryococcus*, *Spirulina*, *Nitzschia*, *Navicula* y *Stigeoclonium* han sido registrados en aguas residuales desde distintas procedencias” (Hernández y Labbé, 2014, p. 158).

Existen una serie de parámetros que se deben tener en cuenta para desarrollar un cultivo controlado de microalgas bien sea en sistemas abiertos o cerrados. Dependiendo la finalidad de la microalga, esta necesita unas condiciones específicas para su máximo crecimiento, las cuales se determinan a continuación, tomando como referente a Hernández y Labbé (2014).

- **Luz:** Es un parámetro fundamental para la fotosíntesis de la microalga, debido a que si se encuentra en el umbral de luz adecuado alcanza una tasa de crecimiento óptimo. Una alta exposición lumínica repercute negativamente a la célula, causando en muchas ocasiones la pérdida fotosintética y la productividad del cultivo; inclusive, en el peor de los casos causar su muerte. Esta condición se da más que todo en cultivos al aire libre, puesto que las microalgas sufren de foto inhibición.
- **Temperatura:** Varía dependiendo de cada especie de microalga, casi siempre las temperaturas óptimas se encuentran entre 28° y 35°C (Hernández y Labbé, 2014). En un cultivo cerrado, la temperatura es controlada por rociadores de agua, inmersión del colector solar en piscina, entre otros, diferente a lo que sucede en un cultivo abierto, el cual es muy difícil para controlar su temperatura, dado que al encontrarse en condiciones atmosféricas la temperatura varía. Una manera en la que se puede reducir el efecto de la temperatura sobre el cultivo es cubriendo el estanque con lona transparente (Hernández y Labbé, 2014).
- **pH:** Las microalgas requieren diferentes tipos de pH dependiendo de la especie, por lo general la mayoría presentan un buen rendimiento en ambientes con pH de 6 a 8,76. Si se

presenta una variabilidad en el pH puede ocurrir que la productividad vaya en declive, lo que afectaría el crecimiento de las microalgas (Hernández y Labbé, 2014).

Las microalgas poseen cinco fases en su crecimiento y desarrollo, las cuales se expresan a continuación en la tabla 6.

Tabla 6

Fases del crecimiento y desarrollo de las microalgas

Fase	Duración	Características
Inducción	1-3 días	Comienza la absorción de nutrientes por parte de las células, además del proceso de adaptación al medio ambiente en el que se han desarrollado. En este estado, las células no tienden a dividirse, debido a que no existe todavía un contexto apropiado para este proceso, pues aún es necesario que se den ajustes en cuanto a las condiciones bioquímicas de los cultivos.
Exponencial	4 días	Se inicia cuando las células ya han logrado adaptarse, por lo que también es posible la multiplicación. Durante la fase exponencial, la división celular es mucho más rápida que en el resto de fases.
Estacionaria		La población algal se vuelve constante, sin llegar a aumentar. Su duración tiende a ser demasiado corta como para ser perceptible.
Declinación relativa del crecimiento	1 – 2 días	Durante esta fase disminuye la división celular, pues se dan factores desfavorables en los cultivos, además de agotamiento de los nutrientes, desajustes en el pH, disminución de radiaciones solares, entre otros.
Muerte		Por el aumento en el número de bacterias, hongos y espumas presentes en el cultivo, las condiciones comienzan a hacerse cada vez más desfavorables para el desarrollo de microalgas. Se produce, pues, la muerte del cultivo.

Nota: Tomado de *Las microalgas y el tratamiento de aguas residuales: conceptos y aplicaciones. Una revisión bibliográfica* (p.18), por Candela, 2016.

Las microalgas representan un papel importante en los ecosistemas acuáticos, debido a que ayudan al balance del oxígeno, y son las principales responsables en el flujo de energía de

estos ecosistemas. En el planeta se encuentra una serie de especies pocos exigentes, en tanto que se adaptan a cualquier tipo de condiciones extremas. Algunos ejemplos son los lagos hipersalinos, acídulos y con elevadas temperaturas. A pesar de que las algas se adaptan a cualquier tipo de condiciones, ellas presentan unas limitantes ecológicas que no dejan que se colonicen, entre las cuales se encuentran la radiación lumínica, la temperatura, el oxígeno y ciertos nutrientes que se necesitan para su desarrollo.

Ahora bien, se puede hacer una diferenciación dependiendo de las condiciones del agua. Inicialmente, en aguas con alto contenido de calcio se pueden encontrar algas con características físico-químicas particulares, por ejemplo, *Coccomonas sp.* e *Hydrurus sp.* En aguas distróficas y con bajos valores de pH se desarrolla la mayoría de las desmidiáceas. Ahora bien, en aguas ricas en nutrientes, como las eutróficas, son comunes las *Volvocales*, *Chlorococcales* y *Euglenofíceas*. En las aguas ricas en carbonatos, fosfatos y nitratos se encuentran las *Fragilaria sp.*, *Amphora sp.*, *Cocconeis sp.*, *Spirogyra sp.*, *Tribonema sp.* En aguas cargadas de minerales se observan Cianofitas y Diatomeas. En ambientes ácidos hay presencia de las *Chlamydomonas acidophila*, *Euglena mutabilis*, *Stichococcus minor* y *Microspora tumidula*. En las aguas que presentan carga contaminante en nutrientes y turbidez, predominan las clorófitas o las cianófitas, así como también las diatomeas (Gómez, 2007). Por último, en ríos y arroyos se pueden encontrar *Ulotrix sp.*, *Spirogyra sp.*, *Achnantes sp.*, *Oedogonium sp.*, *Tribonema sp.*, *Cymbella sp.*, *Euglena sp.*, *Scenedesmus sp.*, *Chlorella sp.*, *Navicula sp.*, *Nitzschia sp.*, *Zygnema sp.*, *Mougeotia sp.* (Gómez, 2007).

Con el anterior panorama, es posible apreciar que “el patrón de distribución es variado, destacando la presencia de microalgas epilíticas, epífitas y epipélicas (...) Este patrón está correlacionado con la carga contaminante, el caudal, la temperatura, el pH y la disponibilidad de

oxígeno y luz.” (Gómez, 2007, pág. 4)

4.7 Sistemas de cultivo para microalgas

En la actualidad, se implementan diferentes sistemas de cultivo microalgales, entre ellos encontramos los sistemas abiertos y los sistemas cerrados. El cultivo de las microalgas en los sistemas abiertos se encuentra expuestos a la atmósfera y es difícil controlar sus parámetros físico-químicos, a diferencia de los sistemas cerrados, llamados fotobiorreactores, donde es casi nulo el contacto con la atmósfera (García et al., 2017). Los fotobiorreactores son diseñados para la producción de microorganismos fotosintéticos en conjunto con el pH, la luz, CO₂, la temperatura y la parte humana (García et al., 2017). Al establecer un comparativo entre ambos, los sistemas abiertos son más económicos, debido a que es más simple cosechar la biomasa y el mantenimiento de asepsia del cultivo.

4.7.1 Sistemas abiertos

Dentro de estos sistemas se pueden encontrar las aguas superficiales naturales; entre ellos están: estanques naturales, lagunas, lagos y estanques artificiales. Implementar estos sistemas es mucho más económico que cualquier otro, pero en cuestiones de control es más complejo, esto debido a que se puede contaminar fácilmente, no se puede controlar la temperatura del agua y la iluminación. Por consiguiente, su eficiencia es un poco más baja si los llegamos a comparar con los sistemas cerrados.

Los sistemas artificiales presentan varios diseños: inclinados (incluidos de capa fina), circulares y los más encontrados los estanques de carrusel o canales (raceway). Para este tipo de sistemas es necesario buscar cepas que puedan crecer bajo condiciones de pH altos o bajos, temperaturas específicas y nutrientes específicos.

Tipos de sistemas abiertos

- **Balsas:** Son piscinas artificiales de agua con una profundidad limitada donde las microalgas crecen sin ningún elemento de mezclado, por lo tanto, no son considerados fotobiorreactores estrictamente al no manipular las condiciones naturales (Grupo Cooperativo Cajamar, 2016).
- **Canales o Raceways:** Son canales de hormigón ovalados y con poca profundidad (entre 15-30 cm) en forma de circuito cerrado. En este tipo de sistema las microalgas se mezclan para obtener un mejor crecimiento, este movimiento se hace implementando paletas, hélices, entre otros. Gracias a la baja profundidad de estos canales, la atmósfera juega un papel importante, puesto que las microalgas obtienen CO₂ suficiente para su crecimiento (Grupo Cooperativo Cajamar, 2016).
- **Piscinas inclinadas:** El movimiento de estos sistemas se genera gracias a la gravedad, pero presentan muchas limitantes como una rápida evaporación, el asentamiento de las células donde el movimiento del agua es más pasivo, y el gasto energético para llevar el cultivo a la parte superior del sistema (Grupo Cooperativo Cajamar, 2016).
- **Tanques circulares:** Dichos sistemas inician con algunas desventajas, una de ellas es el sector que ocupan, el gasto económico alto debido a que la obra es en hormigón, sin dejar de nombrar el personal humano que requiere para su operación (Grupo Cooperativo Cajamar, 2016).

4.7.2 Sistemas cerrados

En estos sistemas se garantiza la producción de una sola cepa, debido a que las condiciones son más controladas y se encuentran separados del ambiente exterior. Estos sistemas son más productivos que los sistemas abiertos, se controla el suministro de CO₂ y se mantienen las

condiciones que necesitan las microalgas para su crecimiento. La construcción de estos fotorreactores es más costosa que los abiertos, en tanto que vienen equipados con sistema de aireación, agitación e intercambio de gases, estabilización del pH, iluminación y temperatura adecuada, a parte de la mano de obra capacitada.

Tipo de fotobiorreactores cerrados

- **Cámara de microalgas:** Son sistemas cerrados, su función es escalar una microalga para aumentar su tamaño. Existe variedad de recipientes en los cuales se realizan la siembra de los cultivos y de esta manera se tiene un control de temperatura, luz, entre otras condiciones que necesita la microalga para su desarrollo (Grupo Cooperativo Cajamar, 2016).
- **Fotobiorreactores:** Son un sistema cerrado forzado al extremo, para garantizar un crecimiento adecuado de la microalga que se quiere cultivar, presentan un máximo control de temperatura, CO₂ y pH, disminuyendo el riesgo de contaminación y pérdida de CO₂. Este sistema suele acumular oxígeno, el cual es generado por un burbujeo en el interior (Grupo Cooperativo Cajamar, 2016). Los fotorreactores se clasifican según el tamaño y modo de operación en: planos o tubulares, horizontales, verticales, inclinados o espirales, serpentines y múltiples; y desde el modo de operación se clasifican en: impulsado o agitados por aire o bombas, reactores de una fase, reactores de dos fases (Grupo Cooperativo Cajamar, 2016).
- **Columnas de burbujeo.** Son biorreactores tubulares que constan de una columna vertical, con un radio que va de 5 a 50 cm y una altura de 1 a 4 m; la ventaja de este sistema es que el oxígeno no se acumula y gracias a la posición vertical hace que la luz solar penetre en un ángulo mayor, lo que hace que el porcentaje superficie/volumen sea menor, lo que aumenta las zonas oscuras (Grupo Cooperativo Cajamar, 2016).

4.8 Revisión bibliográfica de trabajos relacionados con el tratamiento de aguas residuales mediante microalgas

El trabajo *Microalgas en el tratamiento de aguas residuales generadas en industrias de curtiembres* (2021) presenta una revisión bibliográfica exhaustiva respecto al uso de microalgas para el tratamiento de aguas residuales con procedencia de industrias curtiembres, caracterizadas por poseer elevados niveles de metales pesados como el Cromo, Nitritos, Nitratos, Fosfatos y Sulfatos. A continuación se exponen los resultados específicos:

Tras el análisis, las microalgas más utilizadas en los procesos de biorremediación en este tipo de industria son: *Scenedesmus* sp, *Espirulina* sp, *Chlorella* sp, *Tetraselmis* sp, y *Pseudochlorella* sp., importantes por su alta eficiencia en la remoción de Cromo, y otros elementos contaminantes; donde, los géneros *Scenedesmus* y *Espirulina* demostraron una eficiencia mayor al 85% de remoción de Cr, seguido por *Chlorella* y *Pseudochlorella* (>60%). En la remoción de nitratos y nitritos, el género *Scenedesmus*, mostró mejores niveles de remoción (90%), seguido por *Chlorella* y *Pseudochlorella* (65%). Con respecto a la remoción de Fosfatos y Sulfatos, los géneros *Chlorella* y *Pseudochlorella* fueron el tipo de alga que demostró un nivel de remoción del 100%, seguidos por *Tetraselmis*, *Scenedesmus* y *Tetraselmis* (>95%). (Jacome et al., 2021, p.47).

En el trabajo *Tratamiento de aguas residuales in vitro por medio de la microalga Chlorella Sp en el municipio de Barrancabermeja, Colombia* (2015), los autores se motivan bajo la premisa de la contaminación de los cuerpos hídricos y del deterioro de la calidad del agua a causa de la incidencia de las aguas residuales domésticas, principalmente por nitratos y fosfatos, por lo cual investigaron sobre los efectos de la *Chlorella* sp. como método de tratamiento *in vitro* en aguas residuales domésticas, buscando suprimir estos contaminantes. El proceso involucró el aislamiento

de la microalga, su escalamiento, y un cultivo monoalgal. En el bioensayo “se evaluaron dos tratamientos, el primero compuesto por 100% agua residual (T1), mientras que el otro formado por 75% agua residual y 25% agua purificada (T2) y un control con fertilizante foliar” (Tafur y Estrada, 2015, p.5). A continuación, se exponen los resultados en específico:

Las mayores densidades celulares se alcanzaron en los tratamientos con agua residual ($p > 0,05$) sin diferencias significativas entre ambos. Al final del estudio la remoción de nitratos fue del 64,6% en el control, seguido de T1 con 50,1% y de T2 con 49,8%. Con respecto a la remoción de fosfatos, en el control se obtuvo una eficiencia del 65,7%, mientras que T1 y T2 alcanzaron mayores remociones 83,8% y 87,0% respectivamente entre los días 1 y 4. De acuerdo con lo anterior, se concluye que la microalga *Chlorella* sp. puede ser usada como tratamiento de aguas residuales debido a su capacidad de adaptación y eficiencia obtenida en la remoción de nitratos y fosfatos (Tafur y Estrada, 2015, pp.5-6).

En el trabajo *Evaluación del potencial de Desmodesmus asymmetricus y Chlorella vulgaris para la remoción de nitratos y fosfatos de aguas residuales* (2021), los investigadores evaluaron el efecto de la *Chlorella vulgaris* y la *Desmodesmus asymmetricus* en la remoción de nitrógeno y fósforo en aguas residuales de una planta de tratamiento, haciendo énfasis en la proporción ideal requerida. El proceso involucró un fotoperiodo de 12:12 h, durante nueve días, en un invernadero, donde se aplicó una mezcla de las microalgas con el agua residual. Los resultados específicos fueron los siguientes:

Las mayores eficiencias de remoción de nitrógeno (principalmente $\text{NO}_3\text{--N}$ y $\text{NO}_2\text{--N}$) y fósforo (PO_4^{3-}) se observaron en los tratamientos con mayor proporción de *D. asymmetricus*, entre ellos sobresalió el tratamiento T3 (25% *C. vulgaris* / 75% *D. asymmetricus*) donde se removió el 100% de nitrógeno y 77.1% de fósforo; de igual manera

con el oxígeno disuelto (OD), el T3 obtuvo el mejor resultado alcanzando una media de 25.50 ± 0.28 mg/L. Finalmente, de acuerdo con el análisis del diseño de mezclas, se determinó que la mezcla óptima de microalgas que logra la mayor producción de OD y la mayor remoción, fue la proporción de 6% de *C. vulgaris* y 94% de *D. asymmetricus* en un tiempo de cultivo de 9 días (Oscanoa et al., 2021, p.1).

En el trabajo *Evaluación de la remoción de nutrientes y de la biomasa alcanzada mediante un cultivo de un consorcio de microalgas en aguas residuales* (2017), los autores evaluaron la efectividad de la *Chlorella Vulgaris* y *Scenedesmus sp.* en el proceso de reducción de nutrientes, así como la calidad de la biomasa alcanzada con el cultivo de estas microalgas, en aguas residuales de origen industrial. Se analizaron principalmente las concentraciones de DBO y DQO. Los resultados mostraron que las microalgas que se emplearon tienen la capacidad de remover contaminantes de las aguas residuales de origen industrial. Así las cosas, a continuación, se expone el proceso específico que involucró el diagnóstico, la intervención, y la evaluación de los cuerpos hídricos:

Según los análisis iniciales realizados al efluente, se presenta un alto contenido de DBO 1712 mg O_2 /L y de DQO 3455 mg O_2 /L y un pH inicial de 4,23 ácido, el cual fue modificado a un pH 7. En la implementación de la metodología se utilizó concentraciones de efluente del 100%, 80% y 60 % y su respectivo control, obteniendo en primer lugar el volumen del inóculo del consorcio de microalgas, para proceder con el pre-tratamiento que tiene un período de tiempo de 21 días, alcanzando la fase exponencial del consorcio en todos los tratamientos a los 10 días del cultivo; el control solo dio las condiciones óptimas de cultivo de las microalgas obteniendo 2 etapas exponenciales con comportamiento diáuxico obteniendo dos fases exponenciales con comportamiento diáuxico, presentando

una mayor densidad celular la concentración del efluente al 60 % $4,75E+06$ cel. ml^{-1} y seguida del 80 % con $3,76E+06$ cel. ml^{-1} . Se realizó una caracterización del efluente a los 21 días de tratamiento obteniendo valores favorables de reducción de DBO Y DQO con mayor porcentaje de remoción de DBO presentó la concentración del 100 % de efluente con un 79 % de reducción y del parámetro de DQO presentó el control con un 88 % de reducción, estos resultados dieron paso a la siguiente etapa que es el tratamiento utilizando la concentración del 100% y del 60% del efluente con una reducción de DBO del 94% y de 91% de DQO. (Miño, 2017, p.16).

5. Discusión

Los humedales artificiales y las microalgas son implementados a la hora de tratar aguas residuales, independientemente de su procedencia. En unos trabajos se evidenció que la remoción no fue absoluta, es decir, al 100%, ejemplo claro es el que se menciona en García, López, y Torres (2019), en el cual se utilizó la *Sagittaria latifolia* en un humedal artificial de flujo subsuperficial para tratar aguas residuales, y la remoción, a pesar de ser alta (96,78% para el nitrógeno y 96,79% para el fósforo), no alcanzó el 100%; no obstante, sí permite que las aguas tengan unos estándares mínimos de calidad. No obstante, hubo otros en los que sí se registró un porcentaje absoluto, tal es el caso de Oscanoa et al. (2021), en donde, a partir del uso de la *Desmodesmus asymmetricus* y la *Chlorella vulgaris* se buscaba la remoción de nitratos y fosfatos en aguas residuales de origen doméstico, en donde se pudo observar un 100% de remoción del nitrógeno (y un 77.1% en la remoción del fósforo); para tal efectividad, el 6% obedecía a la *Chlorella vulgaris*, y el 94% gracias a la *Desmodesmus asymmetricus*.

Haciendo comparación de estos dos trabajos, es evidente que, aunque la *Sagittaria latifolia* posee un alto nivel de efectividad, las microalgas *Desmodesmus asymmetricus* y la *Chlorella*

vulgaris poseen mayor eficiencia en la remoción del fósforo y nitrógeno en aguas residuales domésticas.

Otro trabajo que se tomó como referencia para realizar la comparación fue el de García-Valero et al. (2019); en este, se trabajó con un humedal artificial de flujo subsuperficial horizontal y se implementó la macrófita *Phragmites australis*, con un tiempo de retención de 3 días. Los resultados mostraron un alcance del 78% en la remoción de fósforo. En contraposición, Jacome et al (2021) utilizaron la *Chlorella* y *Pseudochlorella*, las cuales demostraron un nivel de remoción del 100%, seguida de *Tetraselmis* y la *Scenedesmus* con una eficiencia superior al 95%. En la comparación de estos dos trabajos, las microalgas demostraron tener mejor rendimiento en la remoción de fósforo con respecto a la *Phragmites australis*.

6. Conclusiones

Al finalizar la recolección de todos los trabajos y comparar los que se realizaron con microalgas y humedales artificiales, se llega a la conclusión de que las microalgas presentan mayor rendimiento a la hora de remover nutrientes de las aguas residuales. Pero para este estudio es pertinente aclarar que solo algunas de las aguas que se manejan entre ambos tipos de procedimiento no poseen la misma carga de contaminantes; del mismo modo se debería examinar que las microalgas representan mayor eficiencia en los laboratorios ya que son sistemas controlados, y se sugiere tener en cuenta los tiempos de retención, en tanto que los humedales presentan mayor tiempo para hacer el proceso de remoción de nutrientes. Además, se debe tener presente las macrófitas utilizadas en los humedales, puesto que no todas demuestran la misma eficiencia en comparación con las microalgas; de las cuales se puede agregar, a propósito, que en la mayoría de los trabajos se observó que la más implementada fue *Chlorella*.

Ahora bien, cabe resaltar que los humedales tienen mayor ventaja, puesto que no les afecta la contaminación atmosférica para el tratamiento de las aguas, en comparación con el tratamiento con microalgas, dado que estas están expuestas a la atmósfera y pueden contaminarse con los microorganismos que se encuentran en el ambiente, lo que puede afectar el proceso de remoción. En cambio, la ventaja que presentan las microalgas en comparación con los humedales es que estas no generan malos olores y no atraen insectos patógenos, en comparación con los humedales artificiales. Las dos alternativas de tratamiento de aguas son viables, puesto que cumplen con el propósito de descontaminar el agua ya utilizada y ayudan a darle otras disposiciones, bien sea para devolverse a los cuerpos de agua o para implementarse en otra actividad. Se concluye que, a nivel general, el mecanismo que representó mejor eficiencia fue la utilización de las microalgas.

Referencias bibliográficas

- Arce Cardona, P. (2018). *Humedales artificiales: una alternativa para tratamiento de aguas de producción* (Tesis de Especialización). Fundación Universidad de América, Bogotá, Colombia. <https://repository.uamerica.edu.co/bitstream/20.500.11839/7132/1/091369-2018-I-GA.pdf>
- Argumedo Pérez, A., y Ballesteros Benedetti, M. (2020). *Humedales artificiales: una alternativa para el tratamiento de aguas residuales* (Monografía de pregrado). Montería, Colombia. <https://es.scribd.com/document/495133054/HUMEDALES-ARTIFICIALES>
- Ayala, S. (2015). *Clasificación taxonómica de microalgas presente en un consorcio microbiológico que biorremedia el efluente de una planta de sacrificio de bovinos y porcinos* (Tesis de pregrado). https://www.researchgate.net/publication/291330974_Clasificacion_taxonomica_de_microalgas_presentes_en_un_consortio_microbiologico_que_biorremedia_el_efluente_de_una_planta_de_sacrificio_de_bovinos_y_porcinos
- Caballero Lajarín, A. (2013). *Sistema de depuración de aguas residuales de origen ganadero. Humedales artificiales* (Tesis doctoral). Universidad Politécnica de Cartagena, España. <https://repositorio.upct.es/handle/10317/3891>
- Candela Orduz, R. (2016). *Las microalgas y el tratamiento de aguas residuales: conceptos y aplicaciones. Una revisión bibliográfica* (Monografía de pregrado). Universidad Nacional Abierta y a Distancia, Colombia. <https://repository.unad.edu.co/bitstream/handle/10596/12170/91541023.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

Carvajal C., Ortiz, P., y Vega, A. (2017). Propuesta de tratamiento de aguas residuales domésticas implementando un humedal artificial de flujo subsuperficial empleando bambusa sp en la finca el recreo ubicada en Tauramena, Casanare. *Revista de Tecnología* 16 (1), pp. 65-76.
<https://revistas.unbosque.edu.co/RevTec/article/view/2317>

Castañeda, A. (2021). Valoración de humedal de tratamiento para el saneamiento de aguas residuales en una población del lago de Patzcuaro, Michoacán – México. *Avances en Ciencias e Ingenierías*, 12 (4), pp. 11-20.
<https://www.executivebs.org/publishing.cl/aci/2021/Vol12/Nro4/2-ACI1388-21%20full.pdf>

Clima de Cambios (2019). *Las aguas residuales generan sustancias que dañan el medio ambiente*. Pontificia Universidad Católica del Perú.
<https://www.pucp.edu.pe/climadecambios/noticias/las-aguas-residuales-generan-sustancias-que-danan-el-medio-ambiente/#:~:text=Las%20aguas%20residuales%20son%20aquellas,descargadas%20al%20sistema%20de%20alcantarillado>

Decreto 2811 de 1974 [con fuerza de Ley]. Por el cual se dicta el Código Nacional de Recursos Naturales Renovables y de Protección al Medio Ambiente. 18 de diciembre de 1974. D.O.N. 34243.

Decreto 1594 de 1984 [con fuerza de Ley]. Por el cual se reglamenta parcialmente el Título I de la Ley 09 de 1979, así como el Capítulo II del Título VI - Parte III - Libro II y el Título III de la Parte III Libro I del Decreto 2811 de 1974 en cuanto a usos del agua y residuos líquidos. 26 de junio de 1984. D.O.N. 36700.

Decreto 1575 de 2007 [con fuerza de Ley]. Por el cual se establece el Sistema para la Protección

y Control de la Calidad del Agua para Consumo Humano. 9 de mayo de 2007. D.O.N. 46623

Delgadillo, O., Camacho, A., Pérez, L. F., y Andrade, M. (2010). *Depuración de aguas residuales por medio de humedales artificiales*. Centro Andino para la Gestión y Uso del Agua (Centro AGUA), Universidad Mayor de San Simón, Cochabamba, Bolivia.
<https://core.ac.uk/download/pdf/48017573.pdf>

Editorial Grudemi (2021). *Microalgas*. Enciclopedia de Biología.
<https://enciclopediadebiologia.com/microalgas/>

Escorihuela, A., Núñez, M., Rosales, N., Mora, R., y Morales, E. (2007). Microalgas presentes en una laguna para pulimento de efluentes de una planta de tratamiento de aguas residuales urbanas. *Revista Facultad de Agronomía*, 24 (1), pp. 225-230.
http://www.revfacagronluz.org.ve/PDF/supl_mayo_2007/v24supl39.pdf

Espinosa Ortiz, C. (2014). *Factibilidad del diseño de un humedal de flujo subsuperficial para el tratamiento de aguas residuales municipales de 30.000 habitantes* (Tesis de maestría). Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito, Bogotá, Colombia.
<https://repositorio.escuelaing.edu.co/bitstream/handle/001/114/Espinosa%20Ortiz,%20Camilo%20Eduardo%20-%202014.pdf;jsessionid=11DFA549EF47ECEC475998543DD7D598?sequence=1>

Espitia Cantero, J. (2022). *Aplicación de los humedales artificiales para el tratamiento de aguas residuales domésticas en pequeños centros poblados* (Monografía de pregrado). Universidad de Córdoba, Montería, Colombia.
<https://repositorio.unicordoba.edu.co/bitstream/handle/ucordoba/4991/ESPITIA%20CANTERO%20JOSE%20FERNANDO.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

Frers, C. (s.f.). *Humedales artificiales*. Waste magazine.
<https://wastemagazine.es/humedalartificial.htm>

García Guillermo, R. (2014). *Caracterización y propuesta de tratamiento de las aguas residuales de la industria de galvanizado de lámina por inmersión en caliente* (Tesis de maestría).
http://biblioteca.usac.edu.gt/tesis/08/08_0375_MT.pdf

García, J., Pavía, M., García, T., Chirivella, J. y Serrano, A. (2017). Principios de Biotecnología y Bioingeniería en el cultivo de microalgas: importancia, problemas tecnológicos, tipos y sistemas de cultivos, crecimiento, factores limitantes, selección, aislamiento, escalado y caracterización bioquímica. *Revista Iberoamericana Interdisciplinar de Métodos, Modelización y Simulación, NEREIS*, 9, pp. 115-129).
<https://108.128.142.30/bitstream/handle/20.500.12466/234/10.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

García, J., López, G., Torres, G. (2019). Evaluación de medios de soporte en humedales artificiales con vegetación *Sagittaria latifolia* en la remoción de contaminantes básicos. *Revista Iberoamericanas de Ciencias Biológicas y Agropecuarias*, 8 (15).
<https://www.ciba.org.mx/index.php/CIBA/article/view/82/368>

García Serrano, J., y Corzo Hernández, A. (2008). *Depuración con Humedales Construidos: Guía Práctica de Diseño, Construcción y Explotación de Sistemas de Humedales de Flujo Subsuperficial*. Universidad Politécnica de Catalunya, España.
https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2117/2474/JGarcia_and_Acorzo%20.pdf?sequence=1

García-Valero, A., Martínez-Martínez S., V., Terrero, M., Faz, A., Muñoz, M., Gómez-Garrido, M., Acosta, J. (2019). Fitorremediación de aguas residuales industriales en humedales

- artificiales para uso agrícola. *X CONGRESO IBÉRICO DE AGROINGENIERÍA*.
<https://zagan.unizar.es/record/84481/files/3439.pdf>
- Gómez Luna, Liliana (2007). Microalgas: aspectos ecológicos y biotecnológicos. *Revista cubana de Química*, 19 (2), pp. 3-20. <https://www.redalyc.org/pdf/4435/443543707001.pdf>
- González Toro, C., y Lozada Rivera, W. (2013). Manejo y control de las aguas de escorrentía para mantener la calidad del agua: Manual para instructores. *Servicio de Extensión Agrícola: Colegio de Ciencias Agrícolas. Puerto Rico*.
<https://academic.uprm.edu/gonzalezc/HTMLobj-917/aguamanualescorrentia.pdf>
- Grupo Cooperativo Cajamar (2015). ¿Que son las microalgas? Interés y uso. *Fichas de transferencia*, (11). <https://www.cajamar.es/storage/documents/microalgas-1444391623-ca345.pdf>
- Grupo Cooperativo Cajamar. (2016). Cultivos de microalgas a gran escala: sistemas de producción. *Fichas de transferencia*, (18).
<https://www.cajamar.es/storage/documents/018-microalgas2-1467367279-9023d.pdf>
- Hernández Sampieri, R., Fernández Collado, C., y Baptista Lucio, P. (2014). *Metodología de la investigación* (6ta. Ed.). México D.F.: Interamericana Editores.
- Hernández-Pérez, Alexis, y Labbé, José I. (2014). Microalgas, cultivo y beneficios. *Revista de Biología Marina y Oceanografía*, 49 (2), pp.157-173.
<https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=47931776001>
- Ibáñez, A. (2017). *DBO y DQO para caracterizar aguas residuales*. Nihon Kasettsu.
<https://nihonkasettsu.com/es/dbo-y-dqo-para-caracterizar-aguas-residuales/>
- Jacome, C., Ballesteros, C., Rea, E., Rea, L., y Poma, P. (2021). Microalgas en el tratamiento de aguas residuales generadas en industrias de curtiembres. *Ciencia y Tecnología* 14 (2), pp.

47-55. <https://revistas.uteq.edu.ec/index.php/cyt/article/view/502/563>

Kadlec R., y Wallace, S. (2009). *Treatment Wetlands* (2nd ed.). Boca Raton, USA: CRC PRESS.

Ley 9 de 1979. Por la cual se dictan medidas sanitarias. 16 de julio de 1979. D.O.N. 35308.

Ley 99 de 1993. Por la cual se crea el Ministerio del Medio Ambiente, se reordena el Sector Público encargado de la gestión y conservación del medio ambiente y los recursos naturales renovables, se organiza el Sistema Nacional Ambiental, SINA y se dictan otras disposiciones. 22 de diciembre de 1993. D.O.N. 41146

Llagas Chafloque, W., y Guadalupe Gómez, E. (2006). Diseño de humedales artificiales para el tratamiento de aguas residuales en la UNMSM. *Revista del Instituto de Investigaciones FIGMMG* 15 (17), pp. 85-96.

<https://revistasinvestigacion.unmsm.edu.pe/index.php/iigeo/article/view/699>

López Rosales, R. (2017). *Potencial de cepas de microalgas aisladas de la costa de Yucatán para la producción de biodiesel* (Tesis de maestría). Centro de Investigación Científica de Yucatán, México.

https://cicy.repositorioinstitucional.mx/jspui/bitstream/1003/424/1/PCER_M_Tesis_2017_López_Alan.pdf

Luna Pabello, V., y Aburto Castañeda, S. (2014). Sistema de humedales artificiales para el control de la eutroficación del lago del bosque de San Juan de Aragón. *Revista Especializada en Ciencias Químico-Biológicas*, 17(1), pp. 32-55.

<http://www.scielo.org.mx/pdf/tip/v17n1/v17n1a3.pdf>

Mella Paredes, A. (2018). Dinámica de recuperación de un humedal de flujo subsuperficial frente a un escenario de sequedad y ausencia de carga orgánica (Tesis de pregrado). Universidad del Bío Bío, Concepción, Chile.

http://repobib.ubiobio.cl/jspui/bitstream/123456789/3362/1/Mella_Paredes_Alvaro_Ignacio.pdf

Mera Ponce, S. (2016). *Evaluación de la bioconcentración de dos especies de macrófitas acuáticas (Eichhornia crassipes y Lemna spp) en la fitorremediación de un medio contaminado con plomo* (Tesis de pregrado). Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, Riobamba, Ecuador. <http://dspace.espoch.edu.ec/bitstream/123456789/6174/1/236T0219.pdf>

Miño, K. (2017). *Evaluación de la remoción de nutrientes y de la biomasa alcanzada mediante un cultivo de un consorcio de microalgas en aguas residuales*. (Tesis de pregrado). Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, Riobamba, Ecuador. <http://dspace.espoch.edu.ec/bitstream/123456789/7033/1/236T0280.pdf>

Morales Caicedo, M. E., y Castellanos Rodríguez, L. L. (2018). *Rediseño humedal artificial para depuración de aguas residuales y reúso: modelo didáctico laboratorio de recursos hídricos* (Tesis de pregrado). Universidad Católica de Colombia, Bogotá, Colombia. <https://repository.ucatolica.edu.co/bitstream/10983/22817/1/Trabajo%20de%20Grado-Redise%C3%B1o%20Humedal%20Artificial.pdf>

Morán Villela, D. (2014). *Diseño de planta de tratamiento de aguas residuales para el municipio de San Juan Chamelco, Alta Verapaz* (Tesis de pregrado). Universidad Rafael Landívar, Ciudad de Guatemala, Guatemala. <http://recursosbiblio.url.edu.gt/tesisjcem/2014/06/14/Moran-Diego.pdf>.

Murillo Flautero, M. C. (2022). *Métodos e instrumentos para la reducción de pérdidas por agua no contabilizada en redes de distribución hídrica* (Tesis de pregrado). Universidad Nacional Abierta y a Distancia, Colombia. <https://repository.unad.edu.co/bitstream/handle/10596/48656/mcmurillof.pdf?sequence=1>

[yisAllowed=y](#)

Oliver 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'Albufera de València* (Tesis doctoral). Universidad Politécnica de Valencia, España.

<https://riunet.upv.es/bitstream/handle/10251/90400/OLIVER%20-%20Estudio%20de%20los%20Humedales%20Artificiales%20de%20Flujo%20Superficial%20del%20Tancat%20de%20la%20Pipa%20como%20in....pdf?sequence=1>

Ortiz Hernández, J., Beltrán Hernández, I., Lizárraga Mendiola L., Coronel Olivares, C., y Vázquez Rodríguez, G. (2013). Biorretención y reúso del agua de escorrentía urbana en climas áridos o semiáridos: una revisión. *Simposio Iberoamericano Multidisciplinario de Ciencias e Ingenierías*.

https://www.uaeh.edu.mx/investigacion/productos/6238/2013_memoria_simci_joyce.pdf

Ortiz-Villota, M. T., Romero-Morales, M. A., y Meza-Rodríguez, L. D. (2018). La biorremediación con microalgas (*Spirulina máxima*, *Spirulina platensis* y *Chlorella vulgaris*) como alternativa para tratar la eutrofización de la laguna de Ubaque, Colombia. *Revista investigación desarrollo e innovación*, 9(1), pp. 163-176.

<http://www.scielo.org.co/pdf/ridi/v9n1/2389-9417-ridi-9-01-163>

Oscanoa, A., Cervantes, M., Flores, L., y Ruiz, A. (2021). Evaluación del potencial de *Desmodesmus asymmetricus* y *Chlorella vulgaris* para la remoción de nitratos y fosfatos de aguas residuales. *Revista peruana de biología* 28 (1), pp.1-13.

<http://www.scielo.org.pe/pdf/rpb/v28n1/1727-9933-rpb-28-01-e18082.pdf>

Peña Varón, M., Van Ginneken, M., Madera, C. (2003). Humedales de Flujo Subsuperficial: Una Alternativa Natural para el Tratamiento de Aguas Residuales Domésticas en Zonas

- Tropicales. *Ingeniería y competitividad*, 5 (1), pp. 27-35.
https://revistaingenieria.univalle.edu.co/index.php/ingenieria_y_competitividad/article/view/2302/3052
- Quispe, B., Arias, J., Martínez, C., y Cruz, M. (2017). Eficiencia de la especie macrófita *Eichhornia crassipes* (Jacinto de agua) para la remoción de parámetros fisicoquímicos, metal pesado (Pb) y la evaluación de su crecimiento en función al tiempo y adopción al medio en una laguna experimental. *Revista de Investigación Ciencia, Tecnología y Desarrollo*, 3 (1), pp. 79-93. https://revistas.upeu.edu.pe/index.php/ri_ctd/article/view/650
- Raffo Lecca, E., y Ruiz Lizama, E. (2014). Caracterización de las aguas residuales y la demanda bioquímica de oxígeno. *Industrial Data*, 17 (1), pp. 71-80.
<https://www.redalyc.org/pdf/816/81640855010.pdf>
- Resolución 2115 de 2007 [Ministerio de la Protección Social, Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial]. Por medio de la cual se señalan características, instrumentos básicos y frecuencias del sistema de control y vigilancia para la calidad del agua para consumo humano. 22 de junio de 2007.
- Rincón Gutiérrez, V., Benavides Sierra, A., y Silva Cárdenas, Y. (2016). Estandarización del método analítico para la determinación de la Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO) y su aplicación en la cuantificación de materia orgánica en la microcuenca los Pozos Aquitania - Boyacá. *CICI 2016*, UNILLANOS.
https://cici.unillanos.edu.co/media2016/memorias/CICI_2016_paper_147.pdf
- Rodríguez, G. M. (2013). Humedal de flujo vertical para tratamiento terciario del efluente físico-químico de una estación depuradora de aguas residuales doméstica. *Ingeniería, Investigación y Tecnología*, 14 (2), pp. 223-235.

<http://www.scielo.org.mx/pdf/iit/v14n2/v14n2a7.pdf>

Salazar, M., Bernal, V., y Martínez, E. (2005). Tratamiento de efluentes anaerobios con microalgas clorofitas (*Chlorella vulgaris* y *Sphaerocystis* sp). *XI Congreso Nacional De Biotecnología y Bioingeniería*. Obtenido de

https://smbb.mx/congresos%20smbb/merida05/TRABAJOS/AREA_IV/CIV-47.pdf

Tafur, J., y Estrada, L.I. (2015). Tratamiento de aguas residuales *in vitro* por medio de la microalga *Chlorella* sp en el municipio de Barrancabermeja, Colombia. *Revista CITECSA* 6 (10), pp. 5-19. <https://revistas.unipaz.edu.co/index.php/revcitecsa/article/view/227/212>

UNESCO (2022). Desafíos globales (Agua). [https://www.un.org/es/global-issues/water#:~:text=El%2080%25%20de%20las%20aguas,mundial%20de%20agua%20\(FAO\)](https://www.un.org/es/global-issues/water#:~:text=El%2080%25%20de%20las%20aguas,mundial%20de%20agua%20(FAO))

UNESCO. (2017). *Informe Mundial sobre el Desarrollo de los Recursos Hídricos de las Naciones*. <http://www.unesco.org/new/es/natural-sciences/environment/water/wwap/wwdr/2017-wastewater-the-untapped-resource/>

United States Environmental Protection Agency (2000). Folleto informativo de tecnología de aguas residuales Humedales de flujo libre superficial. https://www.epa.gov/sites/default/files/2015-06/documents/cs_00_024.pdf

Zambrano Pérez, C., y Saltos Arteaga, X. (2008). *Diseño del sistema de tratamiento para la depuración de las aguas residuales domésticas de la población San Eloy en la provincia de Manabí por medio de un sistema de tratamiento natural compuesto por un humedal artificial de flujo libre* (Tesis de Pregrado). Escuela Superior Politécnica del Litoral. Guayaquil, Ecuador. <http://www.dspace.espol.edu.ec/handle/123456789/6087>