



FACULTAD DE CIENCIAS AMBIENTALES

CARRERA PROFESIONAL DE INGENIERÍA AMBIENTAL

“TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES CON EL USO DE
MICROALGAS”

Trabajo de Investigación para optar el grado de:
BACHILLER EN INGENIERÍA AMBIENTAL

Presentado por:

Joseph Anthony Aguilar Moreno

Asesor:

Wilmer Lujan Cárdenas

Lima – Perú

2020



RESOLUCIÓN DIRECTORAL ACADÉMICA DE CARRERA N°135-2020-DACIA-DAFCA-U.CIENTÍFICA.

FACULTAD DE CIENCIAS AMBIENTALES
CARRERA DE INGENIERÍA AMBIENTAL

Lima 26 de julio de 2020

VISTO:

La revisión realizada y la aprobación de Trabajo de Investigación titulado: **Tratamiento de aguas residuales con el uso de microalgas**, presentado por:

- **Joseph Anthony Aguilar Moreno**

CONSIDERANDO:

Que, de acuerdo al Reglamento General de la Universidad Científica del Sur y los reglamentos de pregrado para obtener el grado de Bachiller de **Ingeniería Ambiental** en la **Facultad de Ciencias Ambientales**, se debe desarrollar un trabajo de investigación.

Que, de acuerdo a la normativa vigente de la Universidad Científica del Sur, en uso de las atribuciones conferidas al Director Académico de Carrera.

SE RESUELVE:

Aprobar e inscribir el trabajo de investigación titulado: **Tratamiento de aguas residuales con el uso de microalgas** con N° de registro de la carrera: **058-FCA-IAM**.

Nombrar al docente/colaborador **Wilmer Lujan Cardenas** como asesor de dicho trabajo de investigación.

Regístrese, comuníquese y archívese.


Documento firmado digitalmente
Mg. Gonzalo Francisco Flores Roca
Director Académico
Carrera de Ingeniería Ambiental

**TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES CON EL USO DE
MICROALGAS**

Joseph Anthony Aguilar Moreno^{1*}

¹ Facultad de Ciencias Ambientales, Universidad Científica del Sur, Lima, Perú

*Autor para correspondencia: 180000061@ucientifica.edu.pe

RESUMEN

Uno de los problemas ambientales que enfrenta el mundo, es la contaminación del cuerpo receptor (río, lago, laguna, etc.) debido a grandes cantidades de residuos generados por la actividad humana, dentro de ellos tenemos las actividades industriales, municipales, agrícola, mineras, entre otras. Convirtiéndose así en aguas residuales, donde estos poseen numerosas impurezas orgánicas e inorgánica que van desde niveles micro-plásticos hasta niveles de altas cargas de nutrientes y metales pesados, poniendo en riesgo la salud de las personas (enfermedades patógenas) y del medio acuático (eutrofización). Existen tecnologías eficientes para el tratamiento de las aguas residuales, como son los métodos convencionales, pero estos requieren grandes aportes de costos, operación y mantenimiento. Por otro lado, el uso de las microalgas en los tratamientos de las aguas residuales ofrece un gran enfoque alternativo (rentable y ecológico) para la remoción de los nutrientes (fósforo, nitrógeno y potasio), metales pesados, DBO, DQO y otras impurezas presentes en las aguas residuales. El objetivo de esta revisión es analizar las características, composiciones y clasificaciones de las aguas residuales, así como el uso de los métodos convencionales y biológicos, y la potencialidad de la remoción de las microalgas.

Palabras clave: Agua residual, tratamiento, remoción, microalgas

ABSTRACT

One of the environmental problems facing the world is the contamination of the receiving body (river, lake, lagoon, etc.). Due to large amounts of waste generated by human activity, within them we have the industrial, municipal, agricultural, mining companies, among others. Becoming, as well as wastewater, where they have numerous organic and inorganic impurities ranging from micro-plastic levels until levels of high loads of nutrients and heavy metals, putting people's health (pathogenic diseases) and the aquatic environment (eutrophication) at risk. There are efficient wastewater treatment technologies, such as conventional methods, but these require large cost inputs, operation and maintenance. On the other hand, the use of microalgae in wastewater treatments offers a great alternative approach (cost-effective and ecological) for the removal of nutrients (phosphorus, nitrogen and potassium), heavy metals, DBO, DQO, and other impurities present in wastewater. The objective of this review is to analyze the characteristics, composition and classifications of wastewater, as well as the use of conventional and biological methods, and the potentiality of microalgae removal.

Keywords: Wastewater, treatment, removal, microalgae

REVISIÓN TEÓRICA

1. INTRODUCCIÓN

El agua es una fuente natural que es esencial para el sustento de la vida y el desarrollo económico en cualquier parte del mundo. Sin embargo, el uso inadecuado de este recurso en distintos países en desarrollo están siendo muy preocupantes (mala calidad del agua) sobre todo en la parte de la industrialización, la salud humana y especies naturales (Wollmann et al., 2019). Esto se debe a la generación de residuos orgánicos e inorgánicos a través de las actividades humanas, lo cual una parte de ello termina siendo como aguas residuales. Como por ejemplo en los hogares, la mayoría de los residuos terminan como residuos sólidos (botellas de plástico, bolsas, cartones, etc.) y líquidos (usos domésticos) (Henze & Comeau, 2015). Asimismo, estos tienen origen a través de las actividades industriales (industrias textiles, mineras, entre otras), ganadera (residuos de excretas y urinario) y agrícola (usos de agroquímicos: fungicidas, pesticidas y herbicidas) cuyas aguas residuales contienen sustancias inorgánicas u orgánicas que difícilmente se puede degradar presente en el agua (Larios et al. 2015).

Durante los últimos 50 años, los sistemas biológicos de tratamientos de aguas residuales con microalgas han ganado importancia (ecológico y rentable) y ahora se acepta ampliamente, ya que son tan efectivos como los sistemas de tratamientos de aguas residuales convencionales. Debido a que, es una de las mejores soluciones para resolver problemas ambientales como el calentamiento global, el aumento del agujero de ozono y el cambio climático, ya que estos tienen la capacidad para consumir una gran cantidad de dióxido de carbono en el proceso de la fotosíntesis para producir oxígeno y glucosa (Satpal & K., 2016).

También, las microalgas tienen la capacidad de eliminar nutrientes, metales pesados, sustancias tóxicas orgánicas e inorgánicas y otras impurezas presentes en las aguas residuales mediante el uso de la luz solar, el CO₂ y diversos nutrientes. La principal ventaja de utilizar los sistemas de microalgas es que absorbe la radiación solar en forma de energía en su célula de cloroplasto y toma CO₂ con los nutrientes de las aguas residuales para sintetizar su biomasa y producir oxígeno (Sekaran et al., 2013). Finalmente, esta revisión analiza los componentes, las características y la clasificación del agua residual, así como los métodos de tratamientos (convencionales y biológicos), la aplicación y el potencial de remoción de las microalgas en el tratamiento de las aguas residuales.

2. COMPONENTES DEL AGUA RESIDUAL

La composición se refiere a las sustancias físicas, químicas y biológicas que son constituyentes presentes en el agua residual y se pueden dividir en principales categorías:

- a) **Sólidos suspendidos:** Se define a las impurezas (sólidos no filtrables) retenidas por medio de la filtración de una muestra de agua, estos se expresan en mg/L. Además, pueden causar condiciones indeseables de mayor turbidez en el cuerpo receptor (río, lago o mar) (Magalhães et al., 2016).
- b) **Materia orgánica:** Los principales componentes que se encuentra en la materia orgánica del agua residual son de una combinación de diferentes concentraciones de carbono, nitrógeno, oxígeno e hidrógeno. También a estos se añaden otros componentes importantes como el azufre, el hierro y el fósforo. Siendo que estos componentes se pueden encontrar conjuntamente como proteínas que representa un 40 a 60%, los carbohidratos de 25 a 50 % aproximadamente, las grasas y aceites a un 10 % aprox. (Terry & Summers, 2018).
- c) **Patógenos:** Las corrientes de aguas residuales contienen diferentes tipos de patógenos que presentan un gran riesgo a la salud, como las enfermedades gastrointestinales graves juntos con otras infecciones, y a veces se vuelve fatal si no se brinda el tratamiento médico adecuado. Los principales patógenos pueden ser virus, bacterias, protozoos, parásitos y helmintos (Jones, 2019). Además, los patógenos pueden ingresar a las aguas residuales por muchas fuentes como por ejemplo desechos fecales y animales, y los desechos industriales de la producción de alimentos, particularmente en el procesamiento de animales, también pueden ser una fuente de microorganismos de patógenos (Chahal et al., 2016).
- d) **Nutrientes:** Los principales nutrientes que se encuentra en el agua residual son el nitrógeno y el fósforo, estos elementos son esenciales para el crecimiento y desarrollo de las plantas, pero el exceso de estos elementos en el cuerpo receptor causa la eutrofización y proliferación alterando de esta manera el equilibrio ecosistémico, este problema ya viene afectando desde los últimos siglos (Cai et al., 2013).
- e) **Metales pesados:** Existe 2 fuentes principales de la generación de los metales pesados que son de manera antropogénica y natural, el primero corresponde a las actividades agrícolas e industriales, explotación y extracción de minerales, y

combustión de combustibles fósiles. El segundo corresponde a las actividades volcánicas y erosión de las rocas y suelos. De modo que estos metales cuando son liberados y entran en contacto a un medio acuoso (agua), genera un gran impacto negativo a la salud y al medio ambiente (muerte o alteraciones en el desarrollo), debido a su alta toxicidad, persistencia y solubilidad, estos pueden ser venenoso incluso cuando presentan en concentración bajas. Dentro los metales pesados encontramos al mercurio (Hg), Hierro (Fe), Plomo (Pb), Cadmio (Cd), entre otros (Burakov et al., 2018).

3. CARACTERIZACIÓN DEL AGUA RESIDUAL

La caracterización nos permite determinar o conocer los diferentes parámetros que serán evaluados. Así entender también de qué forma se encuentran las concentraciones de los contaminantes y de qué manera estos se miden.

3.1 Características físicas

3.1.1 Sólidos: Los sólidos incluyen típicamente materiales desde bolsas, botellas plásticas, residuos de alimentos, y hasta el nivel de material coloidal. La siguiente es la definición de sólidos encontrados en aguas residuales:

a) Sólidos totales (ST): El contenido de los sólidos totales (ST) de una muestra es la masa sólida que quedan después que se haya secado en un horno a 103°C durante 24 horas, dividido por la masa original de la muestra. El contenido de ST se informa en masa de porcentajes (%), y para lodos diluidos y líquidos se expresan como masa por volumen (mg/L) (Muhmood et al., 2019).

b) Sólidos volátiles totales (SVT): La determinación de los SVT se refiere a la volatilización (sólidos orgánicos) de la muestra del agua residual a temperaturas altas que varía entre 540°C y 550°C, donde estos se volatilizan completamente a esta temperatura y la parte de residuos o desechos que quedan en la muestra se les llama como sólidos inorgánicos del agua y además este proceso es un indicador para el tratamiento biológico que permite determinar la materia orgánica disponible para biodegradar. (Peces et al., 2014).

c) Sólidos totalmente suspendidos (STS): Es la materia total suspendida que flota en la superficie de las aguas residuales u otros líquidos, o que están suspendidos en ellas, y que se puede eliminar mediante un filtro (L. Wang et al., 2019).

d) Sólidos disueltos totales (SDT): Los SDT se determina cuando la muestra del agua residual se seca a una temperatura de 105°C aprox. Obteniendo de esta manera la parte sólida de la muestra. Por ejemplo, la sal sólida (NaCl) y el azúcar se disuelven en agua y parecen ser invisibles, pero al secar la muestra estos reaparecerán en forma de cristales (Kim et al., 2016).

e) Sólidos sedimentales (SS): Se define como la cantidad de materia orgánica e inorgánica que se decanta (separación de mezclas heterogéneas) en una columna de agua ya sea por muestras de aguas residuales, o cuerpos receptores durante un tiempo determinado, estos se expresan en unidades de masa (mg) o por su concentración (mg/L). Además, los diámetros de estas partículas son inferiores a 62 μ m, considerando como partículas extremadamente finas (Bilotta & Brazier, 2008).

3.1.2 Turbidez: La turbidez es causado por material suspendido en el agua, que puede dispersar o absorber la luz que viaja a través del agua. Donde la dispersión es el proceso por el cual la luz que viaja en una dirección es desviada por partículas en suspensión en una dirección de viaje diferente, mientras que la absorción es la reducción de la intensidad de la luz a medida que viaja a través de la muestra. Se expresan en unidades de turbidez nefelométrica (NTU) (Diaz-Elsayed et al., 2019).

3.1.3. Color: La determinación del color en una muestra del agua residual nos permite indicar el nivel de contaminación de diferentes tipos de materiales y concentraciones que se encuentran la muestra; es decir, como se sabe el agua residual es causado por materiales coloidales, iones metálicos y sólidos en suspensión. De modo que, algunos de estos materiales pueden ser procedentes de naturaleza antropogénica (efluentes industriales, mineras o agrícolas) o natural (derrumbes, erupciones volcánicas, etc). Cabe recalcar que, en los efluentes

industriales o minerales presentan altas cargas iónicas metálicas esto se debe por su estado potencial y fuerza del contaminante (Ahmad et al., 2019).

3.1.4 Temperatura: Conocer la temperatura en los cuerpos receptores o muestras del agua residual nos permite precisar la magnitud o intensidad de los procesos biológicos y las reacciones químicas, así como la baja solubilidad del gas (agotamiento de oxígeno) del medio donde se está manifestando. De modo que, a temperaturas altas las especies acuáticas puede verse afectadas en su desarrollo y crecimiento debido a la aparición de hongos planctónicos indeseables u otras especies desconocidas que pueden causar la eutrofización o proliferación (Ibrahim & Akilli, 2019).

3.1.5 Conductividad: La determinación de la conductividad eléctrica se debe a la cantidad de iones disueltos presentes en los afluentes de las aguas residuales industriales, agrícolas, mineras, etc. De esta manera nos permite entender que cuando la conductividad es alta, las concentraciones de los iones también son altas dentro ellos encontramos a los sulfatos, nitratos y entre otros iones. Este parámetro se mide en unidades siemens por centímetro ($\mu\text{S}/\text{cm}$) a temperatura ambiente (25°C) (Sun et al., 2016).

3.1.6 pH: La determinación del pH es un factor importante en la medición (cantidad de iones de hidrógeno) de las muestras residuales ya que nos permite identificar si el medio a evaluar se encuentra en un estado ácido o básico; es decir, se dice que es ácida cuando el pH es inferior a 7 y mientras que el pH es superior a 7 es básica o alcalina. Asimismo, este parámetro juega un rol importante en los tratamientos de las aguas residuales básicamente en el control de las condiciones óptimas durante el proceso de la actividad biológica (bacterias, algas u otros organismos) donde el pH tiene que ser neutro o ligeramente alcalino entre 7 a 8 para tener una mayor efectividad del tratamiento (J. Chen et al., 2015).

3.1.7 Alcalinidad: La alcalinidad determina la cantidad de hidróxidos, carbonatos, u otras sales básicas presentes en el agua. También tiene la capacidad de neutralizar los medios ácidos que en su mayoría se usan compuestos como hidróxido de calcio y sodio para bajar el nivel de acides del medio. Su medición e

informes técnicos a través de las operaciones de aguas residuales son en carbonato de calcio equivalente (CaCO_3) (W. Li et al., 2015).

3.2 Características químicas

Nos permite determinar la caracterización de los contaminantes químicos que posee el agua residual como la medición de la materia orgánica e inorgánica, la cantidad de elementos de nitrógeno, fósforo, carbono y niveles de oxígeno disuelto. Dentro de ellos se pueden identificar diferentes grupos:

3.2.1 Demanda bioquímica de oxígeno (DBO): El análisis de DBO mide directamente la cantidad de oxígeno consumidos por los microorganismos durante un periodo de tiempo específico (generalmente 5 días) y durante el periodo de biodegradación de las aguas residuales (Jouanneau et al., 2014).

3.2.2 Demanda química de oxígeno (DQO): El análisis de DQO mide el oxígeno consumido en la reducción de agentes oxidantes fuertes en condiciones altamente ácidas a altas temperaturas (Geerdink et al., 2017).

3.2.3 Carbono orgánico total (COT): El análisis de COT se utiliza para evaluar la carga orgánica del agua residual y, permite controlar y evitar los procesos de la eutrofización en los medios acuáticos en función a la cantidad de compuestos orgánicos y el crecimiento microbiano (Schoepfer et al., 2015).

3.2.4 Nitratos: La alta concentración de nitrato tiene los riesgos potenciales de la eutrofización y proliferación de algas tóxicas en las aguas receptoras (J. Wang & Chu, 2016).

3.2.5 Fosfatos: El fósforo como nutrientes es esencial para el crecimiento y desarrollo biológico. Pero, cuando las concentraciones del fosfato son altas en el cuerpo receptor productos de la contaminación por aguas residuales trae como consecuencia la eutrofización (proliferación de algas), disminuyendo así el oxígeno disuelto y provocando la muerte de especies acuáticas (Ye et al., 2017).

3.3 Características biológicas

Las bacterias, los virus y los parásitos constituyen las características biológicas de las aguas residuales. Las actividades de alimentación de estos organismos ayudan a descomponer las aguas residuales; es decir, las bacterias aerobias descomponen la materia

orgánica en presencia del oxígeno, mientras que las bacterias anaerobias descomponen la materia orgánica en ausencia del oxígeno, convirtiendo así en nuevas células y elementos inorgánicos. De modo que, los sustratos obtenidos mediante la descomposición son aprovechados por grupos mayores de los seres vivos, reduciendo así la carga orgánica por medio del proceso de acumulación y remoción de los organismos (Lu et al., 2015).

4. CLASIFICACIÓN DEL AGUA RESIDUAL

4.1 Aguas residuales Municipales: Estos se conocen como aguas residuales de residencias (hogares, asentamientos, etc.), edificios comerciales (hoteles) e instituciones (universidades, colegios, centro de salud, etc.). Además, se puede categorizar en aguas grises y aguas negras (Nowak et al., 2015).

a) Aguas grises: Son desechos de líquidos de baños, lavanderías, cocinas, que no tienen excretas humanas o animales.

b) Aguas negras: Son las aguas residuales generadas en los baños, contienen descargas de orina y excretas.

4.2 Aguas residuales Industriales: Estos proceden del proceso de fabricación y producción, pueden ser más difíciles de tratar, ya que contienen contaminantes tales como aceites, metales pesados, hidrocarburos, productos farmacéuticos, productos químicos y otros subproductos (Leonhauser et al., 2014).

4.3 Aguas residuales agrícolas: Son principalmente el exceso de agua que sale del campo a través de surcos y áreas inundadas durante el riego. Asimismo, pueden contener grandes contenidos de contaminantes como por ejemplos los organoclorados y organofosforados por medio del uso de agroquímicos (Muhmood et al., 2019).

5. SISTEMA DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES

5.1 Método convencional: En general, desde aproximadamente 1900 hasta principios de la década de 1970, los objetivos de tratamiento estaban relacionado con: (i) la eliminación de material flotante y suspendidos de las aguas residuales, (ii) el tratamientos de compuestos orgánicos biodegradables (eliminación de DBO), (iii) la eliminación microorganismos patógenos, y (iv) la eliminación de nutrientes (nitrógeno y fósforo) a través de combinaciones y operaciones física,

química y biológica (Rajasulochana & Preethy, 2016). Dentro de estos métodos los más comunes se encuentran los procesos por lodos activados y filtros de goteo.

5.1.1 Lodos activados: Es un sistema biológico para depurar las aguas residuales donde se emplean organismos de tipo aeróbico (microorganismos en suspensión) que permite la biodegradación de la materia orgánica y forma flóculos (lodos activados) a través estanques de aireación intensa, y así para poder separarlos por medio del proceso de sedimentación eliminando o removiendo el DBO y los sólidos suspendidos (Fulazzaky et al., 2015).

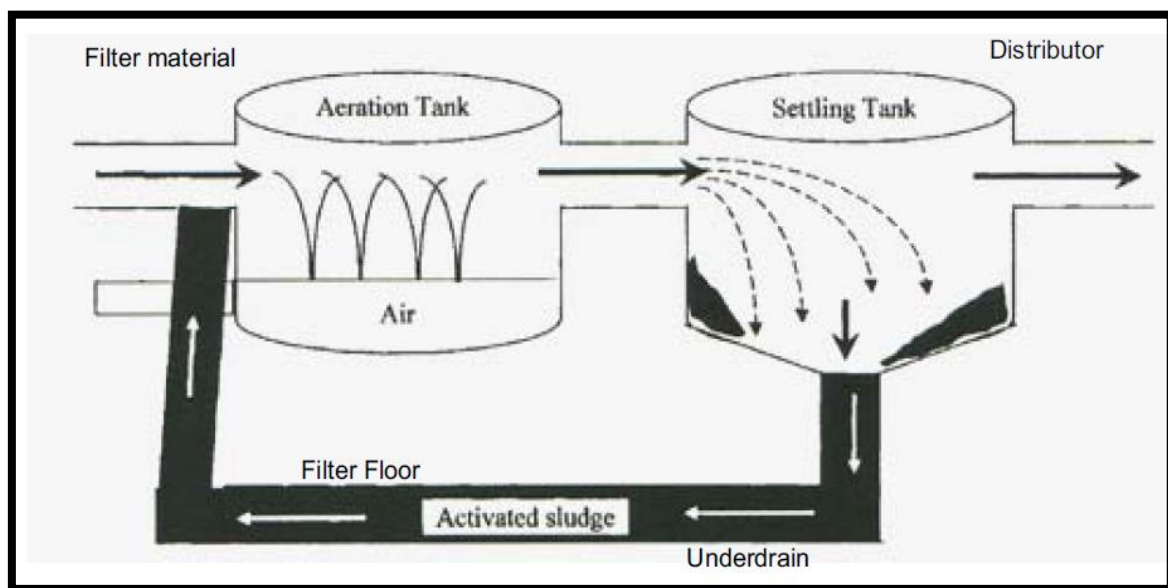


Figura 1. Un sistema de lodo activado

En el estudio de (X. Chen et al., 2019) realizaron una investigación acerca de la relación entre las microalgas (*Chlorella* sp), bacterias (*Scenedesmus* sp) y los lodos activados con el objetivo de construir un sistema apropiado y efectivo para aprovechar al máximo los nutrientes y elevar los lípidos contenidos. Así como remover los componentes de amonio ($\text{NH}_4^+ - \text{N}$), nitrato ($\text{NO}_3^- - \text{N}$), fosfato ($\text{PO}_4^{3-} - \text{P}$) y la DQO de la muestra del agua residual. Teniendo como resultado que la remoción de $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ y $\text{NO}_3^- - \text{N}$ fueron de 87.13%, $\text{PO}_4^{3-} - \text{P}$ y DQO fueron de 99.82%. Por otro lado, la eliminación de los contaminantes y la respuesta de los microorganismos en el lodo activado expuesto a Sulfametazina (SMT), cabe mencionar que los Sulfametazina son medicamentos veterinarios antibacterianos que se usan ampliamente en la agricultura y medicina. Uno de los problemas que genera

estos medicamentos es la persistencia (mayor toxicidad) en el medio acuático causando así alteraciones en el crecimiento y desarrollo de las plantas. Lo cual, para este estudio, se usaron un reactor multietapa (R1) con los componentes de Sulfametazina y el lodo activado, obteniendo de esta manera la eliminación de DQO, NH_4^+ -N y NO_3^- -N, eficiencia alcanzada al 96.4 %, 97.2 % y 82 %, respectivamente, asimismo la remoción de (SMT) en 81 % (N. Li et al., 2019).

5.1.2 Filtros de goteo: Es un reactor biológico que está compuesto por materiales de rocas volcánicas y gravas, la mayor actividad de la degradación de la materia orgánica es por medio de los filtros de goteo donde el medio filtrante se encuentran la mayor parte de la población de microorganismo aerobias y anaerobias, así también como la presencia de hongos, algas y protozoos. De modo que, al estar en contacto directo la parte del medio filtrante (presencia de los microorganismos) y el efluente garantiza una mayor efectividad en la depuración de las aguas residuales (**figura 2**) (Vianna et al., 2012). La eficiencia promedio que tiene este tipo de tratamiento para el DBO, DQO, y NT (nitrógeno total) es de 87.3%, 78.3% y 27.9%, respectivamente (Zyłka et al., 2018).

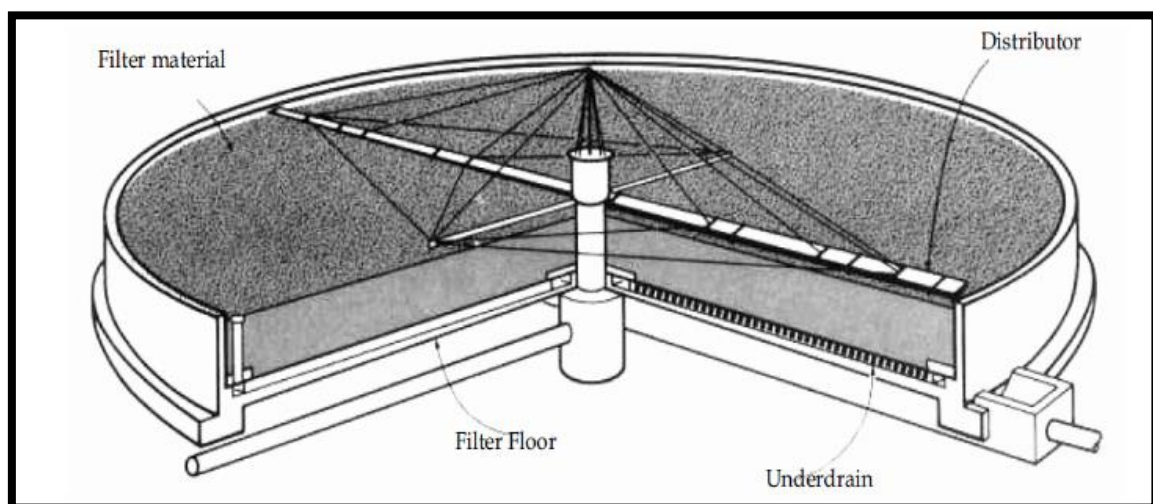


Figura 2. Corte transversal de un filtro de goteo

5.2 Método biológico: Estos son sistemas de tratamientos biológicos de bajo costo, menos sofisticados en operación y mantenimiento para aguas residuales que utiliza principalmente bacterias, protozoos y posiblemente otros microbios especiales para limpiar el agua. A menudo, son más efectivos para eliminar patógenos y compuestos

orgánicos (DBO₅, nitratos, fosfatos, sulfatos, entre otras) e inorgánicos (metales pesados) (Shaikh et al., 2013).

5.2.1. Estanques de estabilización de residuos: Los estanques de estabilización de desechos son grandes cuerpos de aguas artificiales que comprenden varias series de estanques que son anaeróbicas, facultativas y aeróbicas (**figura 3**) (Liu et al., 2020).

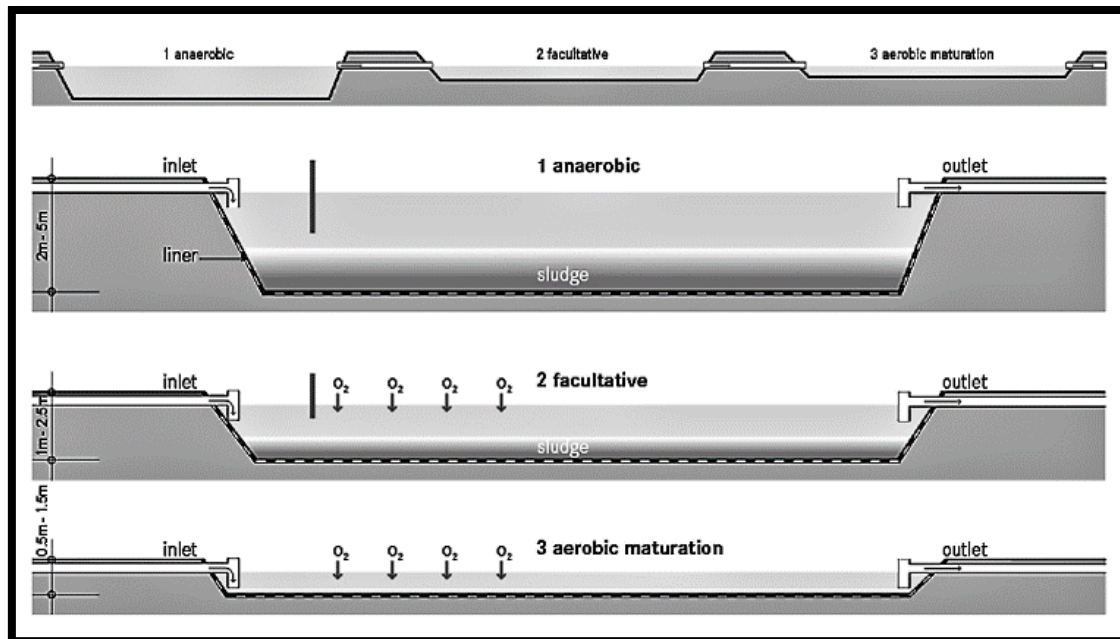


Figura 3. Laguna de estabilización

En las lagunas anaeróbicas se dan la degradación de la materia orgánica a través de las actividades bacterianas aerobias (en presencia del oxígeno), donde el oxígeno consumido es aprovechado de la producción fotosintética de las algas. En las lagunas facultativas su principal trabajo es estabilizar la materia orgánica reduciendo la cantidad de nutrientes (nitrógeno y fósforo) y de las bacterias coliformes. Por último, los estanques de maduración (aeróbicas) suelen eliminar nutrientes y microorganismos patógenos, y estos estanques de maduración están diseñados de poca profundidad (1- 1.5m) para permitir una alta incidencia de la luz solar hacia la parte inferior de la columna de agua (Bolton et al., 2010).

En un estudio de (Rajbhandari & Annachatre, 2004) sobre tratamientos de estanques anaeróbicos de aguas residuales de almidón en la localidad de Tailandia, aproximadamente 500 m³/d de aguas residuales de la industria de almidón se trataron

sobre una serie de estanques anaeróbicas con un área total de 7.39 ha. Donde la eliminación total de DBO y SST (sólido suspendidos totales) fueron más del 90%. Por otro lado, un estudio de (El-Deeb Ghazy et al., 2008) realizaron una evaluación aplicando las tres etapas de una laguna de estabilización en un área urbana de Egipto para tratar el agua residual y determinaron que en el efluente anaeróbico indicó un DBO de valor promedio de 229 mg/L, y en los efluentes facultativos y maduración fueron de 229 mg/L y 180.7 mg/L. Teniendo como eficiencia de remoción del DBO en las 3 etapas de 22, 21.1 y 19,6 % respectivamente (**tabla 1**).

Tabla 1. Algunas características fisicoquímicas de las muestras de aguas residuales (la desviación estándar se encuentra en paréntesis)

Parameters							
Sampling sites	Nitrate NO ³ -N mg L ⁻¹	Dissolved phosphate PO ⁴ -P mg L ⁻¹	Total phosphate PO ₄ -P mg L ⁻¹	Biological oxygen demand mg O ₂ L ⁻¹	Chemical oxygen demand mg O ₂ L ⁻¹	Total suspended solids mg L ⁻¹	pH
WSP influents							
Range	0.81-1.01	11-18	14-26	204-420	445-782	196-370	7.7-8.2
Mean	0.91 (0.15)	14.4 (2.6)	20.1 (4.5)	294.4 (85.9)	566.1 (117.2)	283.3 (65.7)	7.89 (0.184)
Anaerobic effluents							
Range	0.34-0.69	9-15	12-25	165-425	239-750	116-360	7.74-8.2
Mean	0.51 (0.15)	11.6 (2.4)	16.7 (4.2)	229 (94.5)	402.5 (178.0)	214.3 (92.3)	8.019 (0.182)
Facultative effluents							
Range	0.25-0.65	5.5-12	8-13	138-267	207-507	80-300	7.7-8.6
Mean	0.384 (0.163)	7.9 (2.2)	11.1 (1.7)	180.7 (48.4)	321 (114.9)	176.3 (90.2)	8.26 (0.23)
Maturation effluents							
Range	0.17-0.67	4-11	7-13	109-245	221-400	118-190	7.9-9.0
Mean	0.39 (0.15)	7 (2.4)	10.5 (2.3)	145.3 (46.3)	289 (69.2)	157.8 (30.9)	8.34 (0.40)

5.2.2 Construcción de Humedales: Conocido como CW (Constructed Wetlands) siglas en inglés, son sistemas de ingeniería diseñados y construidos para imitar a los procesos humedales naturales. Se ha demostrado que los CW utilizan estos procesos para eliminar contaminaciones de diferentes corrientes de aguas residuales. Donde se tratan mediante procesos físico (sedimentación y filtración), químico (precipitación y adsorción), así como procesos biológicos y químicos (degradación microbiana, absorción de la columna de agua y zona radicular) (Bakhshoodeh et al., 2020).

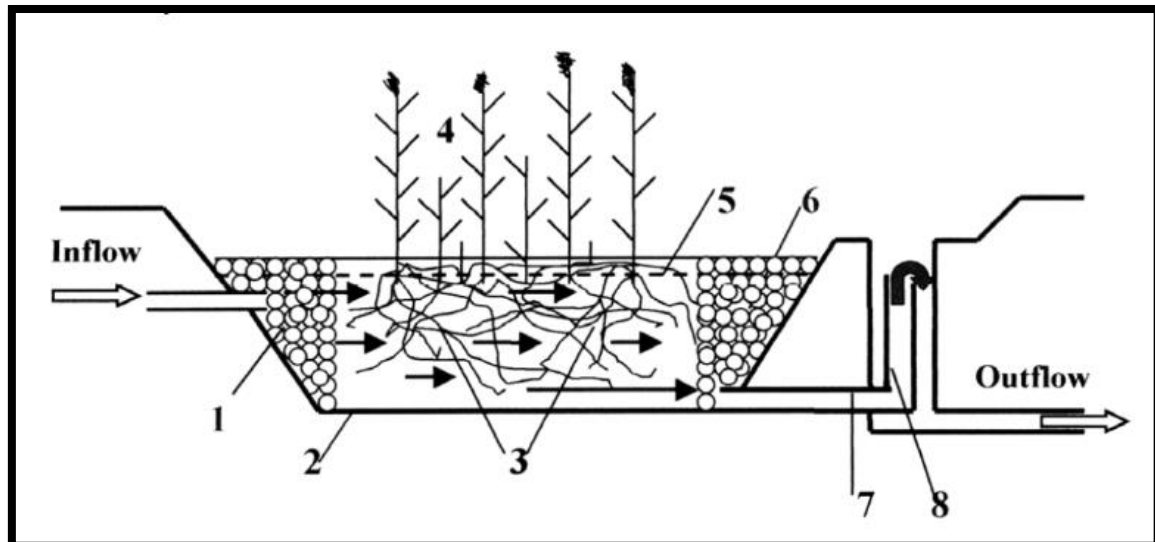


Figura 4. Funcionamiento de un humedal

1. Zona de distribución de entrada llena de grandes piedras; 2. Capa impermeable externa; 3. Zona de infiltración; 4. Plantas micrófitas emergentes; 5. Nivel óptimo del agua dentro del humedal; 6. Zona de recolección de salida; 7. Salida del drenaje por medio de una tubería; 8. Controlador del drenaje. Dentro de sus funciones tenemos: los compuestos orgánicos se degradan de manera efectiva principalmente por la degradación microbiana en condiciones anóxicas/anaeróbicas (**figura 4**) (De La Varga et al., 2016). Además, los sólidos se retienen por procesos de filtración y la sedimentación, siendo así que la remoción sea muy alta (Naja & Volesky, 2011). La eficiencia de remoción para el DQO, DBO, NT (nitrógeno total) y TSS (sólidos suspendido totales) son de 78-80 %, 81-82 %, 63-69 %, 79-89% respectivamente (Ghimire et al., 2019).

En el estudio de (Fountoulakis et al., 2017) se realizó un experimento sobre el uso de halófitos como vegetación de humedales artificiales de flujo vertical para el tratamiento del agua residual doméstica en Grecia. Las especies usadas fueron *A. halimus*, *J. acutus* y *S. perennis*. Donde *J. acutus* son incapaces de acumular grandes cantidades de sales, asimismo, *S. perennis* su tasa de crecimiento es bajo lo cual no son recomendables para la fitorremediación de sal; sin embargo, el *A. halimus* mostró un gran potencial para la acumulación de sales (principalmente sodio (Na)) en sus tejidos y una alta productividad de biomasa, lo que hace interesante para la fito-desalización. Asimismo, las especies halófitas, registraron una mayor eficiencia en la eliminación de patógenos (71.2%) y remoción de la materia orgánica (78- 79 %), del fósforo (60.2%) y del nitrógeno (74.6%).

5.2.3 Biorreactores: Se emplean varios tipos de biorreactores, lo cual el agua residual se recicla en un estanque aeróbico o anaeróbico donde se utilizan microbios suspendidos libres o células inmovilizadas en una matriz para metabolizar los materiales orgánicos, formando un lodo que se recicla y se descarga (Goswami et al., 2018).

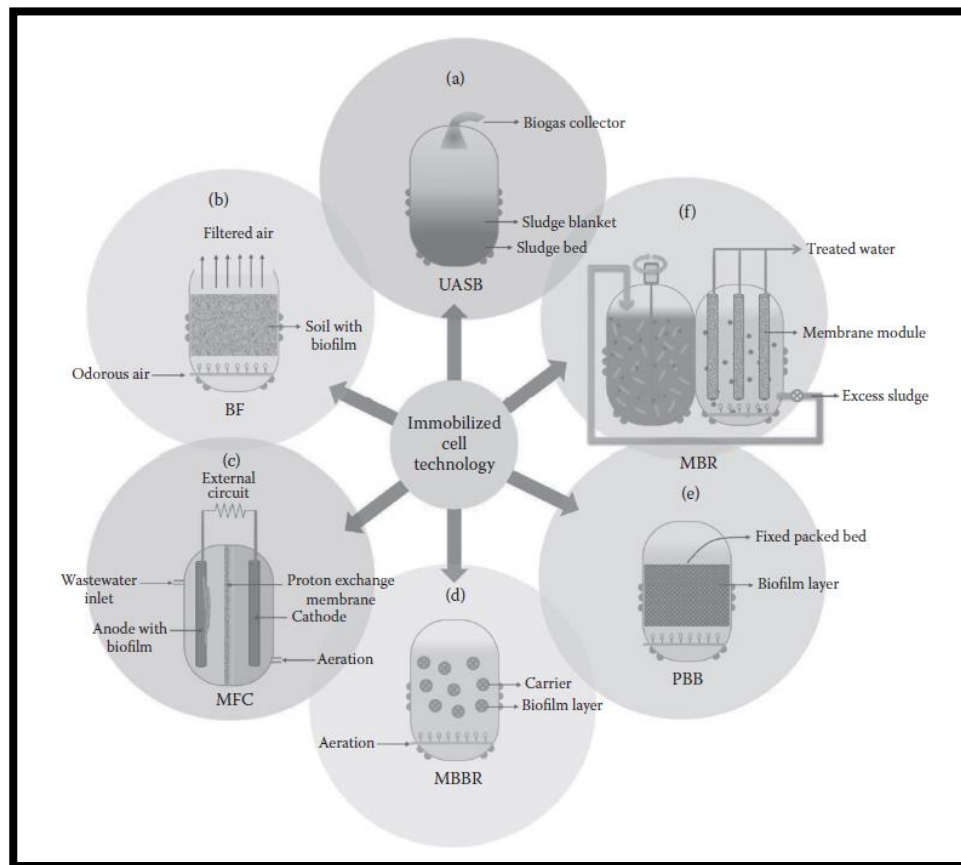


Figura 5. Tipos de biorreactores

El diagrama esquemático (**figura 5**) muestra los 6 tipos diferentes de biorreactores que utilizan células bacterianas inmovilizadas para el tratamiento del agua residual. Dentro de ellos encontramos a los biorreactores anaeróbicos de flujo ascendentes (UASB), el biorreactor de membrana (MBR), los biofiltros (BF), etc. (ElMekawy et al., 2015). El biorreactor de membrana (MBR) es una tecnología eficiente para los tratamientos de aguas residuales municipales, industriales y farmacéuticas; sin embargo, el principal inconveniente que dificulta la aplicación de MBR es la membrana de ensuciamiento que reduce significativamente el rendimiento de la membrana y la vida útil, lo que resulta en un aumento significativo en los costos de mantenimiento y operación (Hasnine et al.,

2017). En el estudio de (Gurung et al., 2017) evaluaron el ensuciamiento de la membrana y el rendimiento del MBR a escala piloto para tratar las aguas residuales municipales durante la temporada de invierno en Finlandia. Se obtuvo la eliminación de los componentes orgánicos como el bisoprolol, el diclofenaco y el bisfenol presentes en la muestra residual a una eficiencia de 65%, 38 % y 97 % respectivamente. De modo que, para la remoción de los metales pesados como el cadmio, el plomo y el vanadio fueron mayores al 80 % y para los restos de los metales pesados como el zinc, el arsénico, el cobre, el níquel y el cobalto estuvieron entre 30 y 60 % de su capacidad de remoción.

Asimismo, el uso del birreactor UASB tiene la capacidad de producir biogás (mezcla entre el metano y el dióxido de carbono) que son aprovechados como fuente de energía, para generar esta fuente se desarrolla bajo condiciones anaeróbicas donde consta de 4 pasos secuenciales que son la hidrólisis, acidogénesis, acetogénesis y metanogénesis, de modo que las bacterias descomponen la materia orgánica y nutrientes orgánicos (fósforo y nitrógeno) para formar los subproductos de CO₂ y CH₄ (Jiraprasertwong et al., 2019). En el estudio de (Ndobeni et al., 2019) se realizó la eliminación orgánica y producción de biogás de las aguas residuales de una industria azucarera en el Sur de África por medio del uso del UASB, la eficiencia de eliminación de la DQO correspondiente fue del 77.6% y se obtuvo una máxima de producción de biogás de 1.1 L/L donde el contenido de metano del biogás osciló entre 65.8 % y 70.7% que está dentro del rango estándar de composición del metano (55-75%).

6. EL USO DE LAS MICROALGAS EN EL TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES

6.1 Caracterización de las microalgas: Las microalgas tienen la capacidad de formar células versátiles donde se puede encontrar una amplia gama de sustancias y nutrientes que son fabricados dentro de sus células, que se puede obtener como los nutrientes, lípidos, vitaminas, sales minerales, carotenoides, etc. De modo que, esto dependerá de las condiciones donde se encuentra las microalgas (Yalçin Duygu et al., 2017). Otras de las atractividad características que posee las microalgas es sobre la capacidad para absorber el compuesto del CO₂ donde estudio demuestran que dentro de un sistema de cultivos de microalgas el nivel de absorción del CO₂ es 200 veces que los árboles, siendo así una solución para el cambio climático (Morais Junior et al., 2020).

Las aguas residuales tienen diferencias significativas en el perfil químico y en las propiedades físicas en comparación con las aguas dulces y marinas o en los medios de cultivos estándar. Se ha demostrado que las microalgas se pueden desarrollar de manera eficiente en medio de las aguas residuales, ya que estas aguas contienen grandes cantidades de nutrientes para su crecimiento como el fósforo y el nitrógeno (Venkata Subhash et al., 2017). Para el proceso de selección de las microalgas se deben considerar 4 aspectos importantes, primero que su tasa de crecimiento sea rápida, segundo la capacidad de eliminar de los nutrientes, tercero la capacidad de adaptabilidad en distintas condiciones ambientales, por último la alta productividad de su biomasa (K. Li et al., 2019). Las especies más usadas son la *Chrorella vulgaris*, *Nannochloropsis* spp., *Botryococcus braunii*, *Arthrospira platensis* y *Phaeodactylum* (Molino et al., 2018).

De modo que, la caracterización del contenido celular de las microalgas nos permite aprender no solo las peculiaridades de algunas especies para producir mayores cantidades de algunos compuestos específicos, como los ácidos grasos de cadena larga (el omega-3 y el ácido eicosapentaenoico), carotenoides (el betacaroteno y la astaxantina) y proteínas, sino también sus aplicaciones en diferentes sectores como la producción de biofertilizantes y biocombustibles a través del aprovechamiento de su biomasa (biogas, bioaceite y bioetanol) (Hao et al., 2017).

6.2 Sistemas de tratamiento y su efectividad de remoción

6.2.1 Cultivo de microalgas y la producción de biomasa: Las aplicaciones para el tratamiento de aguas residuales, el cultivo de las microalgas se realiza generalmente en estanques abiertos de tipo HRAP (estanques de algas de alta velocidad) o fotobiorreactores cerradas. Los estanques abiertos son comúnmente económicos fácil de construir y de operar (uso de baja energía). Se han utilizado para el tratamiento de aguas residuales municipales, industriales y agrícola; sin embargo, tiene baja productividad de biomasa, mayor sensibilidad a contaminantes biológicos, y en consecuencia el cultivo limitado de especies de microalgas (Zeng et al., 2015). Para hacerlo las profundidades deben estar entre 0.15 y 0.45 m, ya que esto nos permite garantizar la alta incidencia de la luz y se usa una rueda de paletas para mejorar la circulación durante el proceso, de modo que se pueda evitar el proceso de sedimentación y estratificación. En términos de costos muchos prefieren construir a base de tierra (bajo costo) los estanques y si

existe alguna fuga se utiliza la arcilla para su respectivo sellado, por otro lado, tenemos las instalaciones costosas que son a base de membranas, pero este ayuda a tener una mayor reflexión de luz solar desde el fondo hasta la parte superior de los estanques con microalgas (Pankratz et al., 2019).

Mientras tanto, en los últimos años se han diseñado y mejorado las instalaciones de sistemas cerradas con el fin tener un mayor control frente a la contaminación externas (bacterias, hongos o protozoos) que estos impiden en el crecimiento y desarrollo de los cultivos de microalgas, estos sistemas son conocido como fotobiorreactores (PBR) que permite a optimizar la producción de los organismos fotosintéticos y dentro de los PBR se encuentra a los tubulares que están hecho de material transparente (vidrio o plástico) con un diámetro menor de 10 cm (Banerjee & Ramaswamy, 2019). En comparación ante estos dos sistemas (abiertos y cerrados), ambos desarrollan la producción de los cultivos de microalgas puras (libres de contaminantes); sin embargo, cuando el medio de cultivo se utilizan las aguas residuales como medio crecimiento, las especies de microalgas puras se ven afectadas debido a la presencia de especies autóctonas que pueden crecer dentro de ella y esto podría ser bien desventajoso. Siendo así que, los fotobiorreactores son más eficiente que los sistemas abiertos en términos de producción y control operativo (mayor captura del CO₂, menor índice de contaminación y regulación de la temperatura) de las microalgas, pero el uso de estos sistemas en relación a la instalación y operación son muy costosos cuando son llevados a mayor escala (Soares et al., 2019).

En la investigación de (Zemke et al., 2013) hicieron el uso del PBR de forma tubular con un volumen de 40 litros donde se cultivaron las especies de microalgas (*Chlorella zoffingiensis*) bajo condiciones de aire libre y a una temperatura que varía entre 20.6°C y 30.8°C con el propósito de tratar las aguas residuales artificiales en el Sur de China y se lograron que su capacidad de producción de la biomasa fue de 17.4 g/m²*día. Además, se reportaron que el uso de PBR con suplementos de aguas residuales municipales bajo condiciones controladas de iluminación y temperatura, se eliminan el 99 % de TN (nitrógeno total) y TP (fósforo total) con *Chlorella vulgaris* y *Scenedesmus obliquus* (Salama et al., 2017). Por otro lado, en la investigación de (Posadas et al., 2015) hicieron un

experimento de tratamiento combinado que consistía en las aguas residuales domésticas y los efluentes de la piscicultura dentro unos estanques de HRAP con una capacidad de volumen de 180 litros bajo tiempos de retención hidráulica (TRH), teniendo como resultado la eficiencia de eliminación de DQO, TN (nitrógeno total) y TP (fósforo total) de 77 %, 83% y 94% respectivamente, este proceso de eliminación fue durante los 10 primeros días del TRH . Del mismo modo, en el estudio de (Santiago et al., 2013) realizaron experimentos a una escala de mayor rango que consistía en unos estanques de 1000 litros de capacidad volumétrica para la producción de las microalgas teniendo como medio de crecimiento y desarrollo las aguas residuales que fueron pretratadas con radiación ultravioleta. Para ambos casos de tratamientos se usaron las especies de microalgas chlorella donde el mayor crecimiento fue en las aguas residuales pretratadas con UV, obteniendo un porcentaje de remoción del DQO, NT y TP de 30, 74 y 19 %.

Para el cultivo de microalgas, los fotobiorreactores sugieren como un avance tecnológico para una mayor producción de biomasa en comparación con los estanques de canales (sistemas de estanques abiertos). Se ha demostrado que en los sistemas de tipo HRAP son más comerciables debido a su fácil instalación y operación (bajo coste de energía) para los tratamientos de las aguas residuales y la producción de biocombustibles a través del aprovechamiento de la biomasa microalgal (Park et al., 2011). Sin embargo, una de las contribuciones desventajosa es a los altos contenidos de toxinas y aparición de organismos autóctonos presentes en los tratamientos con muestras residuales, para ello tiene que ser muy controlado y monitoreado. Por ejemplo, las aguas residuales industriales (posee alto contenido de toxinas orgánicas). Además, el empleo de bacterias con microalgas; es decir, sistemas bacterianos de microalgas son de gran utilidad, ya que algunas bacterias poseen la capacidad de degradar compuestos tóxicos y orgánicos más altos a sustancias inorgánicas que las microalgas puedan utilizar para el crecimiento (Abinandan & Shanthakumar, 2015).

CONCLUSIONES

Luego de realizar una revisión y recolectando datos informativos se llega a la conclusión que cuando el agua suministrada se utiliza para numerosas actividades humanas, se contaminan o sus características cambian, y por lo tanto se convierte en aguas residuales. Pero las aguas residuales pueden ser tratados y garantizando así una mayor seguridad a la salud pública y a la vida acuática. Como se ha descrito en la literatura existen métodos convencionales y métodos biológicos, para su elección se deben basarse en factores tales como las composiciones de las aguas residuales, las experiencias técnicas para la operación y mantenimiento, entre otros. Asimismo, en la actualidad existe mucho interés en el uso de las microalgas debido a su capacidad de eliminar nutrientes orgánicos presentes en el agua residual, lo cual permite que el tratamiento biológico sea amigable con el medio ambiente y teniendo así una mayor eficiencia en la remoción de los contaminantes.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Abinandan, S., & Shanthakumar, S. (2015). Challenges and opportunities in application of microalgae (Chlorophyta) for wastewater treatment: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 52, 123–132. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.07.086>
- Ahmad, T., Aadil, R. M., Ahmed, H., Rahman, U. ur, Soares, B. C. V., Souza, S. L. Q., Pimentel, T. C., Scudino, H., Guimarães, J. T., Esmerino, E. A., Freitas, M. Q., Almada, R. B., Vendramel, S. M. R., Silva, M. C., & Cruz, A. G. (2019). Treatment and utilization of dairy industrial waste: A review. *Trends in Food Science and Technology*, 88, 361–372. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2019.04.003>
- Bakhshoodeh, R., Alavi, N., Oldham, C., Santos, R. M., Babaei, A. A., Vymazal, J., & Paydary, P. (2020). Constructed wetlands for landfill leachate treatment: A review. *Ecological Engineering*, 146(January). <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2020.105725>
- Banerjee, S., & Ramaswamy, S. (2019). Comparison of productivity and economic analysis of microalgae cultivation in open raceways and flat panel photobioreactor. *Bioresource Technology Reports*, 8, 100328. <https://doi.org/10.1016/j.biteb.2019.100328>
- Bilotta, G. S., & Brazier, R. E. (2008). Understanding the influence of suspended solids on water quality and aquatic biota. *Water Research*, 42(12), 2849–2861. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2008.03.018>
- Bolton, N. F., Cromar, N. J., Hallsworth, P., & Fallowfield, H. J. (2010). A review of the factors affecting sunlight inactivation of micro-organisms in waste stabilisation ponds: Preliminary results for enterococci. *Water Science and Technology*, 61(4), 885–890. <https://doi.org/10.2166/wst.2010.958>
- Cai, T., Park, S. Y., & Li, Y. (2013). Nutrient recovery from wastewater streams by microalgae: Status and prospects. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 19, 360–369. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2012.11.030>
- Chahal, C., van den Akker, B., Young, F., Franco, C., Blackbeard, J., & Monis, P. (2016). Pathogen and Particle Associations in Wastewater: Significance and Implications for Treatment and Disinfection Processes. In *Advances in Applied Microbiology* (Vol. 97). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/bs.aambs.2016.08.001>
- Chanaka Udayanga, W. D., Veksha, A., Giannis, A., Lisak, G., Chang, V. W. C., & Lim, T. T. (2018). Fate and distribution of heavy metals during thermal processing of sewage sludge. *Fuel*, 226(February), 721–744. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2018.04.045>
- Chen, J., Mu, L., Cai, J., Yin, H., Song, X., & Li, A. (2015). Thermal characteristics and kinetics of refining and chemicals wastewater, lignite and their blends during combustion. *Energy Conversion and Management*, 100, 201–211. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2015.05.016>
- Chen, X., Hu, Z., Qi, Y., Song, C., & Chen, G. (2019). The interactions of algae-activated sludge symbiotic system and its effects on wastewater treatment and lipid

- accumulation. *Bioresource Technology*, 292(92), 122017. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2019.122017>
- De La Varga, D., Soto, M., Arias, C. A., van Oirschot, D., Kilian, R., Pascual, A., & Álvarez, J. A. (2016). Constructed wetlands for industrial wastewater treatment and removal of nutrients. In *Technologies for the Treatment and Recovery of Nutrients from Industrial Wastewater* (Issue January). <https://doi.org/10.4018/978-1-5225-1037-6.ch008>
- Diaz-Elsayed, N., Rezaei, N., Guo, T., Mohebbi, S., & Zhang, Q. (2019). Wastewater-based resource recovery technologies across scale: A review. *Resources, Conservation and Recycling*, 145(October 2018), 94–112. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2018.12.035>
- El-Deeb Ghazy, M. M., El-Senousy, W. M., Abdel-Aatty, A. M., & Kamel, M. (2008). Performance evaluation of a waste stabilization pond in a rural area in Egypt. *American Journal of Environmental Sciences*, 4(4), 316–326. <https://doi.org/10.3844/ajessp.2008.316.325>
- ElMekawy, A., Mohanakrishna, G., Srikanth, S., & Pant, D. (2015). The Role of Bioreactors in Industrial Wastewater Treatment. In *Environmental Waste Management* (Issue October). <https://doi.org/10.1201/b19243-8>
- Fountoulakis, M. S., Sabathianakis, G., Kritsotakis, I., Kabourakis, E. M., & Manios, T. (2017). Halophytes as vertical-flow constructed wetland vegetation for domestic wastewater treatment. *Science of the Total Environment*, 583, 432–439. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.01.090>
- Fulazzaky, M. A., Abdullah, N. H., Mohd Yusoff, A. R., & Paul, E. (2015). Conditioning the alternating aerobic-anoxic process to enhance the removal of inorganic nitrogen pollution from a municipal wastewater in France. *Journal of Cleaner Production*, 100(3), 195–201. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.03.043>
- Geerdink, R. B., Sebastiaan van den Hurk, R., & Epema, O. J. (2017). Chemical oxygen demand: Historical perspectives and future challenges. *Analytica Chimica Acta*, 961, 1–11. <https://doi.org/10.1016/j.aca.2017.01.009>
- Ghimire, U., Nandimandalam, H., Martinez-Guerra, E., & Gude, V. G. (2019). Wetlands for wastewater treatment. *Water Environment Research*, 91(10), 1378–1389. <https://doi.org/10.1002/wer.1232>
- Goswami, L., Vinoth Kumar, R., Borah, S. N., Arul Manikandan, N., Pakshirajan, K., & Pugazhenthii, G. (2018). Membrane bioreactor and integrated membrane bioreactor systems for micropollutant removal from wastewater: A review. *Journal of Water Process Engineering*, 26(October), 314–328. <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2018.10.024>
- Gurung, K., Ncibi, M. C., & Sillanpää, M. (2017). Assessing membrane fouling and the performance of pilot-scale membrane bioreactor (MBR) to treat real municipal wastewater during winter season in Nordic regions. *Science of the Total Environment*, 579, 1289–1297. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.11.122>
- Hao, W., Yanpeng, L., Zhou, S., Xiangying, R., Wenjun, Z., & Jun, L. (2017). Surface characteristics of microalgae and their effects on harvesting performance by air

- flotation. *International Journal of Agricultural and Biological Engineering*, 10(1), 125–133. <https://doi.org/10.3965/j.ijabe.20171001.2698>
- Hasnine, T., Hanife Sari, E., & Guleda Onkal, E. (2017). *Membrane Bioreactor (MBR) Technology for Wastewater Treatment : Approaches to Membrane Fouling Control*. May, 313–322.
- Ibrahim, A. B. A., & Akilli, H. (2019). Supercritical water gasification of wastewater sludge for hydrogen production. *International Journal of Hydrogen Energy*, 44(21), 10328–10349. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2019.02.184>
- Jiraprasertwong, A., Maitriwong, K., & Chavadej, S. (2019). Production of biogas from cassava wastewater using a three-stage upflow anaerobic sludge blanket (UASB) reactor. *Renewable Energy*, 130, 191–205. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2018.06.034>
- Jones, A. M. (2019). Which pathogens should we worry about? *Paediatric Respiratory Reviews*. <https://doi.org/10.1016/j.prrv.2019.02.007>
- Jouanneau, S., Recoules, L., Durand, M. J., Boukabache, A., Picot, V., Primault, Y., Lakel, A., Sengelin, M., Barillon, B., & Thouand, G. (2014). Methods for assessing biochemical oxygen demand (BOD): A review. *Water Research*, 49(1), 62–82. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2013.10.066>
- Kim, U. J., Lee, I. S., & Oh, J. E. (2016). Occurrence, removal and release characteristics of dissolved brominated flame retardants and their potential metabolites in various kinds of wastewater. *Environmental Pollution*, 218, 551–557. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2016.07.037>
- Leonhauser, J., Pawar, J., & Birkenbeul, U. (2014). Novel Technologies for the Elimination of Pollutants and Hazardous Substances in the Chemical and Pharmaceutical Industries. In *Industrial Wastewater Treatment, Recycling and Reuse*. Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-099968-5.00005-2>
- Li, K., Liu, Q., Fang, F., Luo, R., Lu, Q., Zhou, W., Huo, S., Cheng, P., Liu, J., Addy, M., Chen, P., Chen, D., & Ruan, R. (2019). Microalgae-based wastewater treatment for nutrients recovery: A review. *Bioresource Technology*, 291(June), 121934. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2019.121934>
- Li, N., Liu, Q., Zhou, G. Q., Dai, M. X., & Kong, Q. (2019). Contaminant removal and microorganism response of activated sludge in sulfamethazine wastewater treatment. *International Biodeterioration and Biodegradation*, 143(May). <https://doi.org/10.1016/j.ibiod.2019.05.022>
- Li, W., Niu, Q., Zhang, H., Tian, Z., Zhang, Y., Gao, Y., Li, Y. Y., Nishimura, O., & Yang, M. (2015). UASB treatment of chemical synthesis-based pharmaceutical wastewater containing rich organic sulfur compounds and sulfate and associated microbial characteristics. *Chemical Engineering Journal*, 260, 55–63. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2014.08.085>
- Liu, L., Hall, G., & Champagne, P. (2020). The role of algae in the removal and inactivation of pathogenic indicator organisms in wastewater stabilization pond systems. *Algal Research*, 46(December 2019), 101777. <https://doi.org/10.1016/j.algal.2019.101777>

- Lu, X., Zhang, X. X., Wang, Z., Huang, K., Wang, Y., Liang, W., Tan, Y., Liu, B., & Tang, J. (2015). Bacterial pathogens and community composition in advanced sewage treatment systems revealed by metagenomics analysis based on high-throughput sequencing. *PLoS ONE*, *10*(5), 1–15. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0125549>
- Magalhães, S. C., Scheid, C. M., Calçada, L. A., Lutterbach, L. M. M., Rezende, R. S., & Waldmann, A. T. A. (2016). Real time prediction of suspended solids in drilling fluids. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, *30*, 164–175. <https://doi.org/10.1016/j.jngse.2016.02.001>
- Molino, A., Iovine, A., Casella, P., Mehariya, S., Chianese, S., Cerbone, A., Rimauro, J., & Musmarra, D. (2018). Microalgae Characterization for Consolidated and New Application in Human Food, Animal Feed and Nutraceuticals. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, *15*(11), 2436. <https://doi.org/10.3390/ijerph15112436>
- Muhmood, A., Lu, J., Dong, R., & Wu, S. (2019). Formation of struvite from agricultural wastewaters and its reuse on farmlands: Status and hindrances to closing the nutrient loop. *Journal of Environmental Management*, *230*(May 2018), 1–13. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2018.09.030>
- Naja, G. M., & Volesky, B. (2011). Constructed Wetlands for Water Treatment. *Comprehensive Biotechnology, Second Edition*, *6*(September 2010), 353–369. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-088504-9.00249-X>
- Ndobeni, A., Oyekola, O., & Welz, P. J. (2019). Organic removal rates and biogas production of an upflow anaerobic sludge blanket reactor treating sugarcane molasses. *South African Journal of Chemical Engineering*, *28*(January), 1–7. <https://doi.org/10.1016/j.sajce.2019.01.002>
- Nowak, O., Enderle, P., & Varbanov, P. (2015). Ways to optimize the energy balance of municipal wastewater systems: Lessons learned from Austrian applications. *Journal of Cleaner Production*, *88*, 125–131. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2014.08.068>
- Pankratz, S., Oyedun, A. O., & Kumar, A. (2019). Novel satellite based analytical model developed to predict microalgae yields in open pond raceway systems and applied to Canadian sites. *Algal Research*, *39*(August 2018), 101431. <https://doi.org/10.1016/j.algal.2019.101431>
- Park, J. B. K., Craggs, R. J., & Shilton, A. N. (2011). Wastewater treatment high rate algal ponds for biofuel production. *Bioresource Technology*, *102*(1), 35–42. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2010.06.158>
- Peces, M., Astals, S., & Mata-Alvarez, J. (2014). Assessing total and volatile solids in municipal solid waste samples. *Environmental Technology (United Kingdom)*, *35*(24), 3041–3046. <https://doi.org/10.1080/09593330.2014.929182>
- Posadas, E., Muñoz, A., García-González, M. C., Muñoz, R., & García-Encina, P. A. (2015). A case study of a pilot high rate algal pond for the treatment of fish farm and domestic wastewaters. *Journal of Chemical Technology and Biotechnology*, *90*(6), 1094–1101. <https://doi.org/10.1002/jctb.4417>
- Rajasulochana, P., & Preethy, V. (2016). Comparison on efficiency of various techniques

- in treatment of waste and sewage water – A comprehensive review. *Resource-Efficient Technologies*, 2(4), 175–184. <https://doi.org/10.1016/j.reffit.2016.09.004>
- Rajbhandari, B. K., & Annachhatre, A. P. (2004). Anaerobic ponds treatment of starch wastewater: Case study in Thailand. *Bioresource Technology*, 95(2), 135–143. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2004.01.017>
- Salama, E. S., Kurade, M. B., Abou-Shanab, R. A. I., El-Dalatony, M. M., Yang, I. S., Min, B., & Jeon, B. H. (2017). Recent progress in microalgal biomass production coupled with wastewater treatment for biofuel generation. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 79(March), 1189–1211. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.05.091>
- Santiago, A. F., Calijuri, M. L., Assemany, P. P., Calijuri, M. D. C., & Reis, A. J. D. Dos. (2013). Algal biomass production and wastewater treatment in high rate algal ponds receiving disinfected effluent. *Environmental Technology (United Kingdom)*, 34(13–14), 1877–1885. <https://doi.org/10.1080/09593330.2013.812670>
- Satpal, & K., K. A. (2016). Waste Water Treatment Using Micro-Algae - A review Paper. *International Journal of Engineering Technology, Management and Applied Sciences*, 4(2), 0–5.
- Schoepfer, S. D., Shen, J., Wei, H., Tyson, R. V., Ingall, E., & Algeo, T. J. (2015). Total organic carbon, organic phosphorus, and biogenic barium fluxes as proxies for paleomarine productivity. *Earth-Science Reviews*, 149, 23–52. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2014.08.017>
- Sekaran, G., Karthikeyan, S., Nagalakshmi, C., & Mandal, A. B. (2013). Integrated Bacillus sp. immobilized cell reactor and Synechocystis sp. algal reactor for the treatment of tannery wastewater. *Environmental Science and Pollution Research*, 20(1), 281–291. <https://doi.org/10.1007/s11356-012-0891-3>
- Shaikh Ziauddin Ahammad, David W. Graham, Jan DolfinShaikh Ziauddin Ahammad, D. W. G. (2013). Wastewater Treatment: Biological. *Encyclopedia of Environmental Management, July 2014*, 2645–2656. <https://doi.org/10.1081/E-EEM-120046063>
- Soares, R. B., Martins, M. F., & Gonçalves, R. F. (2019). A conceptual scenario for the use of microalgae biomass for microgeneration in wastewater treatment plants. *Journal of Environmental Management*, 252(September), 109639. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2019.109639>
- Sun, Y., Chen, Z., Wu, G., Wu, Q., Zhang, F., Niu, Z., & Hu, H. Y. (2016). Characteristics of water quality of municipal wastewater treatment plants in China: Implications for resources utilization and management. *Journal of Cleaner Production*, 131, 1–9. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.05.068>
- Terry, L. G., & Summers, R. S. (2018). Biodegradable organic matter and rapid-rate biofilter performance: A review. *Water Research*, 128, 234–245. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2017.09.048>
- Venkata Subhash, G., Rajvanshi, M., Navish Kumar, B., Govindachary, S., Prasad, V., & Dasgupta, S. (2017). Carbon streaming in microalgae: extraction and analysis methods for high value compounds. *Bioresource Technology*, 244, 1304–1316. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2017.07.024>

- Vianna, M. R., de Melo, G. C. B., & Neto, M. R. V. (2012). Wastewater treatment in trickling filters using *Luffa cylindrica* as biofilm supporting medium. *Journal of Urban and Environmental Engineering*, 6(2), 57–66. <https://doi.org/10.4090/juee.2012.v6n2.057066>
- Wang, J., & Chu, L. (2016). Biological nitrate removal from water and wastewater by solid-phase denitrification process. *Biotechnology Advances*, 34(6), 1103–1112. <https://doi.org/10.1016/j.biotechadv.2016.07.001>
- Wang, L., Chang, Y., & Li, A. (2019). Hydrothermal carbonization for energy-efficient processing of sewage sludge: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 108(March), 423–440. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2019.04.011>
- Wollmann, F., Dietze, S., Ackermann, J. U., Bley, T., Walther, T., Steingroewer, J., & Krujatz, F. (2019). Microalgae wastewater treatment: Biological and technological approaches. *Engineering in Life Sciences*, 19(12), 860–871. <https://doi.org/10.1002/elsc.201900071>
- Yalçın Duygu, D., Udo UDOH, A., Özer, T., & Erkaya, İ. A. (2017). *The Characteristics and Importance of Microalgae Culture Collections*. 13(131), 80–87.
- Ye, Y., Ngo, H. H., Guo, W., Liu, Y., Li, J., Liu, Y., Zhang, X., & Jia, H. (2017). Insight into chemical phosphate recovery from municipal wastewater. *Science of the Total Environment*, 576, 159–171. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.10.078>
- Zemke, P. E., Sommerfeld, M. R., & Hu, Q. (2013). Assessment of key biological and engineering design parameters for production of *Chlorella zofingiensis* (Chlorophyceae) in outdoor photobioreactors. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 97(12), 5645–5655. <https://doi.org/10.1007/s00253-013-4919-5>
- Zeng, X., Guo, X., Su, G., Danquah, M. K., Zhang, S., Lu, Y., Sun, Y., & Lin, L. (2015). Bioprocess considerations for microalgal-based wastewater treatment and biomass production. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 42, 1385–1392. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.11.033>
- Zyłka, R., Dabrowski, W., Gogina, E., & Yancen, O. (2018). Trickling filter for high efficiency treatment of dairy sewage. *Journal of Ecological Engineering*, 19(4), 269–275. <https://doi.org/10.12911/22998993/89657>