

**LAS MICROALGAS UNA ALTERNATIVA PARA LA REMOCIÓN DE
MATERIA ORGÁNICA DE AGUAS RESIDUALES DOMÉSTICAS**

INGRID YURLEY MEDINA MOJICA

PROGRAMA DE INGENIERÍA QUÍMICA

**DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA AMBIENTAL, CIVIL Y
QUÍMICA**

FACULTAD DE INGENIERÍAS Y ARQUITECTURA



UNIVERSIDAD DE PAMPLONA

PAMPLONA, Junio 17 del 2020

**LAS MICROALGAS UNA ALTERNATIVA PARA LA REMOCIÓN DE
MATERIA ORGÁNICA DE AGUAS RESIDUALES DOMÉSTICAS**

INGRID YURLEY MEDINA MOJICA

**Trabajo de monografía presentado como requisito para optar al título de
INGENIERA QUÍMICA**

Directora: ALBA LUCÍA ROA PARRA

Bacterióloga y L.C., M.Sc, Ph.D

Codirectora: LAURA VANESSA DAZA SERNA

Ingeniera Química, M.Sc

PROGRAMA DE INGENIERÍA QUÍMICA

**DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA AMBIENTAL, CIVIL Y
QUÍMICA**

FACULTAD DE INGENIERÍAS Y ARQUITECTURA

UNIVERSIDAD DE PAMPLONA

Pamplona, Junio 17 del 2020

TABLA DE CONTENIDO

1. Introducción.....	8
2. Justificación.....	9
3. Objetivos.....	10
3.1 Objetivo general.....	10
3.2 Objetivos específicos.....	10
4. Las microalgas una alternativa para la remocion de materia organica de aguas residuales domesticas.....	11
4.1 Las microalgas.....	11
4.1.1 Factores de crecimiento microalgal.....	11
4.1.2 Sistemas de cultivo para microalgas.....	13
4.1.3 Condiciones de cultivo microalgal.....	14
4.1.4 Aplicaciones de las microalgas.....	16
4.2 Tratamiento de aguas residuales domésticas.....	17
4.2.1 Aguas residuales.....	17
4.2.1.1 Aguas residuales domésticas (ARD).....	18
4.3 Las microalgas como alternativa para el tratamiento de las ard.....	24
4.3.1 Cultivo de microalgas en tratamiento de ARD.....	26
4.3.2 Estudio de tratamiento de ARD con microalgas.....	27
5. Analisis de resultados y discusión.....	28
5.1 Tratamiento convencional de aguas residuales.....	28
5.2 Tratamiento de ard con microalgas.....	29
5.2.1 Aplicación biotecnológica de la biomasa obtenida en el tratamiento de ARD con microalgas.....	31
5.2.2 Sistema alternativo de microalgas para tratamiento de ARD.....	33
5.3 Comparación entre el método convencional y el tratamiento con microalgas en ARD.....	34

6. Conclusiones.....	36
7. Recomendaciones y trabajos futuros	38
8. Referencias bibliográficas	39
9. Anexos	46

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Factores que intervienen en el crecimiento de microalgas.	12
Tabla 2. Características de las condiciones de cultivo para microalgas.	15
Tabla 3. Composición genérica para el ARD no tratada.	20
Tabla 4. LMP en los vertimientos puntuales a cuerpos de aguas superficiales	23
Tabla 5. Composición del agua residual procedente del tratamiento primario y secundario y composición del lodo generado después de la digestión.	23
Tabla 6. Sistemas de cultivo de microalgas en ARD.....	26
Tabla 7. Cantidad en mg/L y % remoción en ARD utilizando microalgas.	30
Tabla 8. Comparación entre el método convencional y el tratamiento con microalgas en ARD	35

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Clasificación de los sistemas de cultivo para microalgas.....	13
Figura 2. Aplicaciones biotecnológicas de las microalgas.	16
Figura 3. Características físicas, químicas y biológicas del agua residual doméstica.	19
Figura 4. Tratamiento convencional de aguas residuales domésticas.....	21
Figura 5. Potencialidades y requerimientos para la remoción de contaminantes en ARD utilizando microalgas.....	25
Figura 6. Porcentajes de remoción de ST y DBO.....	28
Figura 7. Remoción de N y P en ARD utilizando especies microalgales del genero <i>Scenedesmus</i>	32
Figura 8. Composición bioquímica de biomasa microalgal obtenida en el tratamiento de ARD	33
Figura 9. Diagrama de bloques para tratamiento de ARD con microalgas	34

GLOSARIO

Afluente: Aguas residuales que entran en una depuradora o que son sometidas a un proceso de tratamiento.

Célula inmovilizada: Célula viva, a la cual por medios naturales o artificiales se le ha limitado el movimiento de su locación original, y mantiene el metabolismo activo.

Demanda Biológica de Oxígeno: Cantidad de oxígeno que es requerido para la descomposición de la materia orgánica por los organismos unicelulares. Se utiliza para medir la cantidad de contaminación orgánica en aguas residuales.

Demanda Química de Oxígeno: Cantidad de oxígeno que es consumido en la oxidación de materia orgánica y materia inorgánica oxidable. Es usado para medir la cantidad total de contaminantes orgánicos presentes en aguas residuales.

Efluente: Líquido que sale de una planta de tratamiento de agua residual.

Eutrofización: Enriquecimiento excesivo de nutrientes del agua principalmente nitrógeno y fósforo, la cual causa un crecimiento excesivo de plantas acuáticas e incrementan la actividad de microorganismos anaeróbicos. Como resultado los niveles de oxígenos disminuyen rápidamente, haciendo la vida imposible para los organismos acuáticos aeróbicos.

Lodo: suspensión de un sólido en un líquido proveniente de tratamiento de aguas, residuos líquidos u otros similares.

Nitrificación: Proceso biológico, durante el cual bacterias nitrificantes convierten el amoníaco tóxico en nitrato para disminuir su efecto dañino. Esto es comúnmente utilizado para eliminar sustancias de nitrógeno de las aguas residuales, pero en lagos y en pantanos esto ocurre de forma natural.

Vertimiento puntual: El que se realiza a partir de un medio de conducción, del cual se puede precisar el punto exacto de descarga al cuerpo de agua, alcantarillado o al suelo

1. INTRODUCCIÓN

La calidad de los recursos hídricos se ha visto afectada ya que en muchas ocasiones los vertimientos de aguas residuales domésticas superan los límites máximos permisibles (LMP), lo que hace que se transmitan enfermedades y sea imposible la reutilización posterior del agua; debido al riesgo sanitario que esta representa, por ende, con el fin de proteger la salud pública y el ambiente, las aguas residuales deben pasar por un proceso antes de ser vertidas de forma directa (Allende & Mendoza, 2018).

El tratamiento convencional de aguas residuales domésticas (ARD) consiste en una serie de operaciones unitarias de tipo físico, químico y biológico (Rozo, 2016), distribuidas en las etapas de pretratamiento, tratamiento primario, secundario y terciario con el fin de minimizar la contaminación que se envía a los cuerpos receptores de agua. Sin embargo, estos tratamientos convencionales requieren altas cantidades de energía y altos costos, lo que hace que no todas las poblaciones tengan acceso a un adecuado tratamiento de aguas residuales. Adicionalmente, estos tratamiento emiten gases de efecto invernadero como CH_4 , N_2O y CO_2 , este último es el responsable del 72% de estas emisiones (Alcántara et al., 2020), por lo tanto, es importante implementar sistemas de tratamiento de ARD que favorezcan el medio ambiente, que requieran baja energía y bajos costos.

En los últimos años se ha presentado un interés en el tratamiento de ARD con microalgas ya que estos microorganismos recuperan nutrientes, transformándolos en biomasa y consecuentemente producen oxígeno para mejorar la calidad del efluente (Soriano, 2014), se presenta disminución de CO_2 que es uno de los gases que causan efecto invernadero, por ende, es un proceso amigable con el ambiente y finalmente la biomasa que se obtiene en el proceso puede ser posteriormente revalorizada en forma de bioproductos (Barreiro, 2019).

2. JUSTIFICACIÓN

El aumento en la urbanización ha influido en un mayor consumo de recursos hídricos en las actividades diarias, lo que ha llevado a un agotamiento de los recursos de agua dulce (Abinandan & Shanthakumar, 2015); la escasez de esta, amenaza el desarrollo social y económico y se ha convertido en un problema que compete a todos (Russel et al., 2020).

Los recursos de agua dulce se ven afectados negativamente por aguas contaminadas y no tratadas al liberar cantidades excesivas de nutrientes (Shahid et al., 2020); la descarga de aguas residuales no tratadas, especialmente las domésticas contienen una gran cantidad de materia orgánica, nitrógeno (N) y fósforo (P) lo que provoca la destrucción del ecosistema y la eutrofización de los cuerpos de aguas naturales. El fenómeno de eutrofización hace que las algas y otros plancton se multipliquen rápidamente y se disminuya el oxígeno disuelto, se deteriore la calidad del agua y se presenten muertes masivas de peces y otros organismos, lo que evidencia la necesidad e importancia de emplear métodos efectivos, que tengan la capacidad de disminuir las concentraciones de contaminantes en aguas residuales (Goncalves, Pires & Simões, 2017). Es importante mencionar que las sustancias orgánicas como el carbono, N, P y las sales inorgánicas presentes en las aguas residuales actúan como sustrato nutritivo para el crecimiento de algunos microorganismos como las microalgas (Viswanaathan & Sudhakar, 2019). Se ha demostrado que estos microorganismos cuentan con el potencial metabólico requerido para reducir de manera efectiva altas concentraciones de nutrientes presentes en corrientes de aguas residuales, por lo tanto, las microalgas, se pueden utilizar en la purificación de estas fuentes (Guldhe et al., 2017).

El uso de las microalgas como alternativa biotecnológica en el tratamiento de aguas residuales tiene ciertas ventajas tales como la reducción en los requerimientos de energía y los gases de efecto invernadero generados, en comparación con los tratamientos convencionales de aguas residuales, la eficiencia de eliminación de nutrientes de las microalgas es mayor para los niveles de N y P (Nagarajan et al., 2020), adicionalmente, la biomasa se puede utilizar para la producción de sustancias de interés, que pueden ser empleadas en la industria farmacéutica, alimentaria, entre otras (Gonçalves et al., 2017).

3. OBJETIVOS

3.1 OBJETIVO GENERAL

Determinar la aplicabilidad de las microalgas como alternativa biotecnológica para la remoción de materia orgánica de aguas residuales domésticas

3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Identificar los tratamientos físico-químicos y biológicos realizados a las aguas residuales domésticas
- Analizar las potencialidades y factores que limitan el uso de las microalgas en la remoción de contaminantes en agua domésticas para dar cumplimiento a la resolución 0631 de 2015

4. LAS MICROALGAS UNA ALTERNATIVA PARA LA REMOCION DE MATERIA ORGANICA DE AGUAS RESIDUALES DOMESTICAS

4.1 LAS MICROALGAS

Las microalgas son organismos microscópicos fotosintéticos de tipo eucariota o procariota que tienen una estructura multicelular simple o unicelular (Moreno García et al., 2020), están presentes tanto en el sistema acuático como en el terrestre, por lo tanto, representan una gran variedad de especies, que tienen la capacidad de vivir en una amplia gama de entornos (Rizwan, Mujtaba, Memon, Lee & Rashid, 2018).

Las microalgas para su crecimiento necesitan principalmente luz, agua y la fuente de carbono; utilizan la luz para la producción de compuestos orgánicos debido a que poseen un sistema biológico eficiente capaz de utilizarla, el agua la necesitan porque obtienen los nutrientes de estos hábitats acuáticos y requieren la fuente de carbono como el CO₂ para producir alrededor del 50% del oxígeno atmosférico (Rizwan et al., 2018); debido a los requerimientos mencionados, las microalgas pueden crecer en diferentes matrices de agua, como marinas, dulces, residuales, agrícolas, residuales industriales y domésticas ya que estas fuentes están en la capacidad de proporcionarlos (Cheah et al., 2016).

4.1.1 Factores de crecimiento microalgal. Los factores que influyen el crecimiento de las microalgas se dividen en tres categorías: factores ambientales, bióticos y parámetros del proceso (Yousuf, 2020), en la tabla 1 se muestran los parámetros de cada categoría, en que afectan el crecimiento de las microalgas ya sea por la existencia o carencia de estos, y el rango tolerable y óptimo en el desarrollo de estos microorganismos a nivel general, según lo reportado por algunos autores.

Tabla 1. Factores que intervienen en el crecimiento de microalgas.

Fuente: Autor

Categoría	Parámetro	Afecta	Rango tolerable	Rango óptimo
Factores ambientales	pH	La distribución de CO ₂ , el crecimiento, la disponibilidad de carbono y de nutrientes (Anyanwu et al., 2018)	7 – 9 (Culebro, 2015)	8.2 – 8.7 (Culebro, 2015)
	Temperatura	La tasa de crecimiento de microalgas (Anyanwu et al., 2018)	16 -27 °C (Viswanaathan & Sudhakar, 2019)	18 – 24 °C (Viswanaathan & Sudhakar, 2019)
	Nutrientes	La producción biológica de compuestos bioactivos (Anyanwu et al., 2018)	-	Nitrógeno y fosforo son los principales (Kumar et al., 2020)
Parámetros de proceso	Agitación	La concentración celular homogénea en el medio (Yousuf, 2020)	-	-
	Intensidad luminosa	La productividad y la asimilación de CO ₂ (Anyanwu et al., 2018)	1000 – 10000 lux (Viswanaathan & Sudhakar, 2019)	2500 – 5000 lux (Viswanaathan & Sudhakar, 2019)
Factor Biótico	Especies invasivas	El crecimiento de las microalgas y contaminan el medio (Yousuf, 2020)	-	-

Para tener un cultivo controlado y funcional, es importante tener en cuenta los parámetros que se muestran en la tabla 1, por ejemplo, la luz es fundamental para la fotosíntesis de las microalgas (Candela, 2016), el pH está relacionado con el equilibrio entre especies químicas como CO₂, carbonatos y bicarbonatos, cuando el CO₂ predomina el pH está por debajo de 7 y cuando predominan los carbonatos el pH está por encima de 10 (Yousuf, 2020), por ende el control de este parámetro se logra mediante aireación o inyección controlada de CO₂, también mediante adición de ácidos o bases (Cartagena & Malo, 2017); los nutrientes son importantes para la síntesis de componentes celulares (Zhuang, Li & Hao, 2020), la temperatura es importante para tener una tasa máxima de crecimiento y por ende se debe conocer el valor óptimo (Culebro, 2015), la agitación no permite que las microalgas se sedimenten y en cuanto

al factor biótico, algunos autores recomiendan trabajar con microalgas extremófilas para evitar especies no deseadas en los cultivos, ya que estas crecen en ambientes extremos en los que las especies invasivas no pueden sobrevivir (Yousuf, 2020).

4.1.2 Sistemas de cultivo para microalgas. Las microalgas pueden ser cultivadas ya sea en estanques abiertos o fotobiorreactores (PBR) cerrados; la elección del sistema de cultivo depende de una serie de factores como la naturaleza de la especie de microalga, la disponibilidad de nutrientes, el clima y lo más importante el uso final de la biomasa obtenida (Rizwan et al., 2018), en la figura 1 se muestran las ventajas y limitaciones de estos dos sistemas basado en lo expuesto por Anyanwu et al. (2018) y Hernández-Pérez & Labe (2014), de igual manera se observan los tipos de sistemas abiertos y cerrados, las imágenes que allí se presentan son tomadas del trabajo de Yousuf (2020).

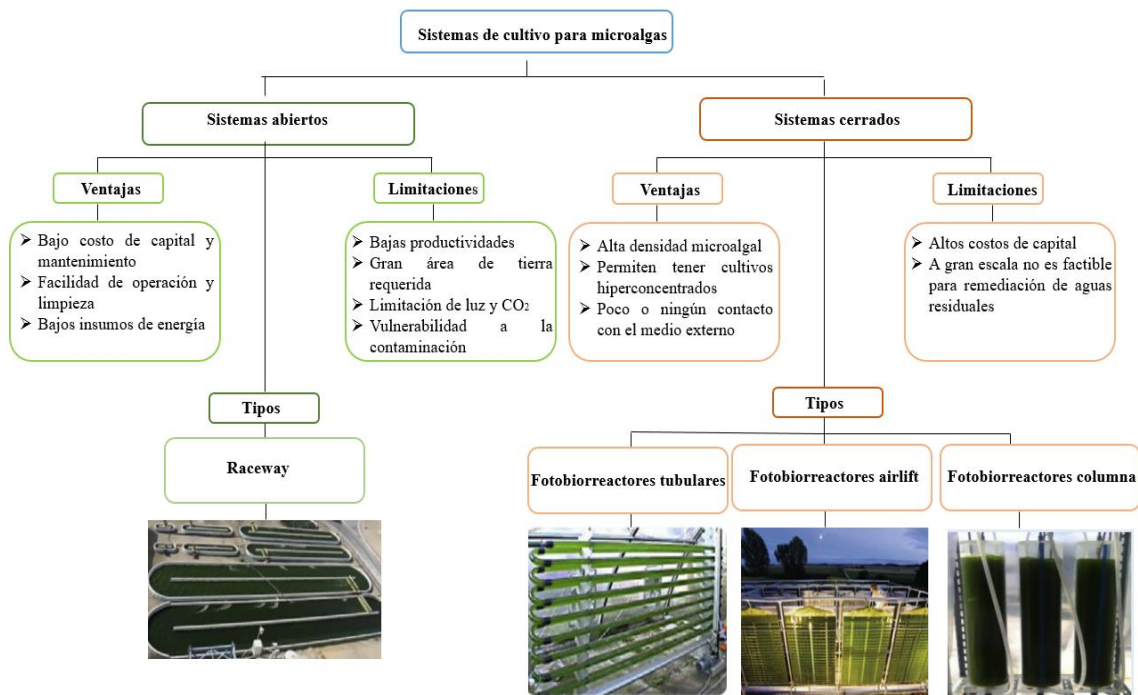


Figura 1. Clasificación de los sistemas de cultivo para microalgas

Fuente: Autor

Como lo muestra la figura 1, existen dos sistemas de cultivo de microalgas, los abiertos como el *Raceway* y los cerrados como los tubulares, *airlift* y tipo columna; estos sistemas se han venido utilizando para el cultivo de microalgas durante años.

Los PBR minimizan la contaminación y permiten el control de ciertas variables como pH, temperatura, luz, entre otros. En este tipo de sistema se produce calentamiento y acumulación de O₂, lo que requiere sistemas de refrigeración y de intercambio de gases, aumentando los costos operativos de producción de biomasa (Schneider et al., 2018).

Los sistemas abiertos están diseñados para que se asemejen al entorno natural de las microalgas (Umamaheswari & Shanthakumar, 2019), son cultivos básicos, económicos, sin embargo, tienen un control deficiente sobre las condiciones de operación, lo que disminuye la productividad final; a escala comercial aproximadamente el 95% de la producción de microalgas a nivel mundial se lleva a cabo en estanques abiertos (Schneider et al., 2018), en Argelia y Países Bajos la productividad de la microalga *P. tricornitum* en reactores abiertos es de 6370 ton/km² año y de 4150 ton/km² año, respectivamente, la diferencia en la productividad se puede atribuir a la diferencia en la irradiancia solar, factores climáticos, ubicación y sistema de cultivo, se estima que alrededor de 9100 ton/km² año es el límite superior de producción de microalgas en estanques abiertos (Banerjee & Ramaswamy, 2017).

En el caso del cultivo de microalgas para tratamiento de aguas residuales, los sistemas abiertos son económicamente factibles y rentables a gran escala, debido a la facilidad de instalación, operación y los bajos requerimientos de energía (Nagarajan et al., 2020), los PBR a gran escala en el tratamiento de aguas residuales no son tan factibles debido a los grandes volúmenes que se necesitan, sin embargo a pequeña escala han probado ser efectivos utilizando energía solar y un costo mínimo de energía (Hernández-Pérez & Labbé, 2014). Por lo tanto, para elegir el sistema de cultivo a utilizar, se deben considerar variables como el uso de energía, el uso del agua, entre otros, con el objetivo de desarrollar procesos sostenibles y que reduzcan los impactos ambientales (Schneider et al., 2018).

4.1.3 Condiciones de cultivo microalgal. El crecimiento de las microalgas en distintas condiciones de cultivo da como resultado una variación en la productividad de la biomasa, ya que estas condiciones influyen en las características de crecimiento y la composición bioquímica microalgal (Kadir, Lam, Uemura, Lim & Lee, 2018). Las condiciones de cultivo son: el cultivo fototrófico, heterotrófico, mixotrófico y fotoheterotrófico, cada condición proporciona diferentes fuentes de energía y nutrientes (Chew et al., 2018). En la tabla 2, se muestran las características de las cuatro condiciones de cultivo y los problemas que tienen el escalado, basado en lo expuesto por Kadir et al. (2018) y Chew et al. (2018).

Tabla 2. Características de las condiciones de cultivo para microalgas.

Fuente: Autor

Condición	Fuente de Carbono	Fuente de energía	Densidad celular	Costo	Problemas al escalar
Fototrófico	Inorgánico	Lumínica	Baja	Bajo	Altos costos Baja biomasa Baja contaminación
Heterotrófico	Orgánico	Orgánica	Alta	Medio	Altos costos del sustrato Alta productividad de biomasa Contaminación
Mixotrófico	Inorgánico y orgánico	Lumínica y orgánica	Media	Alto	Alta productividad de biomasa Altos costos Contaminación
Fotoheterotrófico	Orgánico	Lumínica	Media	Alto	Altos costos de capital y operativos

Las condiciones de cultivo para microalgas se ha venido utilizando en el tratamiento de aguas residuales, la condición heterotrófica y mixotrófica pueden ofrecer flexibilidad para mejorar la economía de la producción, y la fototrófica puede capturar el CO₂ generado por las plantas de tratamiento de aguas residuales (Shandilya & Pattarkine, 2019).

La condición de cultivo más utilizada para el crecimiento de microalgas es la fototrófica en donde las células cosechan energía luminosa y usan como fuente de carbono CO₂, sin embargo, las condiciones heterotróficas y mixotróficas proporcionan una alta productividad de biomasa y un alto rendimiento de compuestos bioquímicos, no obstante estos requieren fuentes de carbono orgánico como acetato o glucosa para el crecimiento, que son responsables del 80% del costo total del medio de cultivo, lo que hace que los costos sean altos (Kadir et al., 2018), en el cultivo fotoheterotrófico, las microalgas necesitan azúcares y una fuente de luz al mismo

tiempo, además requiere un diseño especial de fotobiorreactor lo que aumenta el costo de capital y operativo (Chew et al., 2018).

4.1.4 Aplicaciones de las microalgas. Las microalgas son reconocidas como una poderosa plataforma biotecnológica (Guldhe et al., 2017), estos microorganismos son fuente de una amplia gama de compuestos naturales como minerales, proteínas, pigmentos, enzimas, azúcares, lípidos con valiosos ácidos grasos, esteroides y vitaminas, además la biomasa de microalgas es de interés ya que es una fuente de energía diversificada y renovable (Gonzalez, de Carvalho, Aulestia, Gonzalez & Soccol, 2020), en la figura 2, se presentan algunas de las aplicaciones de las microalgas, basado en lo expuesto por Rizwan et al. (2018) y De Jesus Raposo, De Moraes & De Moraes (2013).

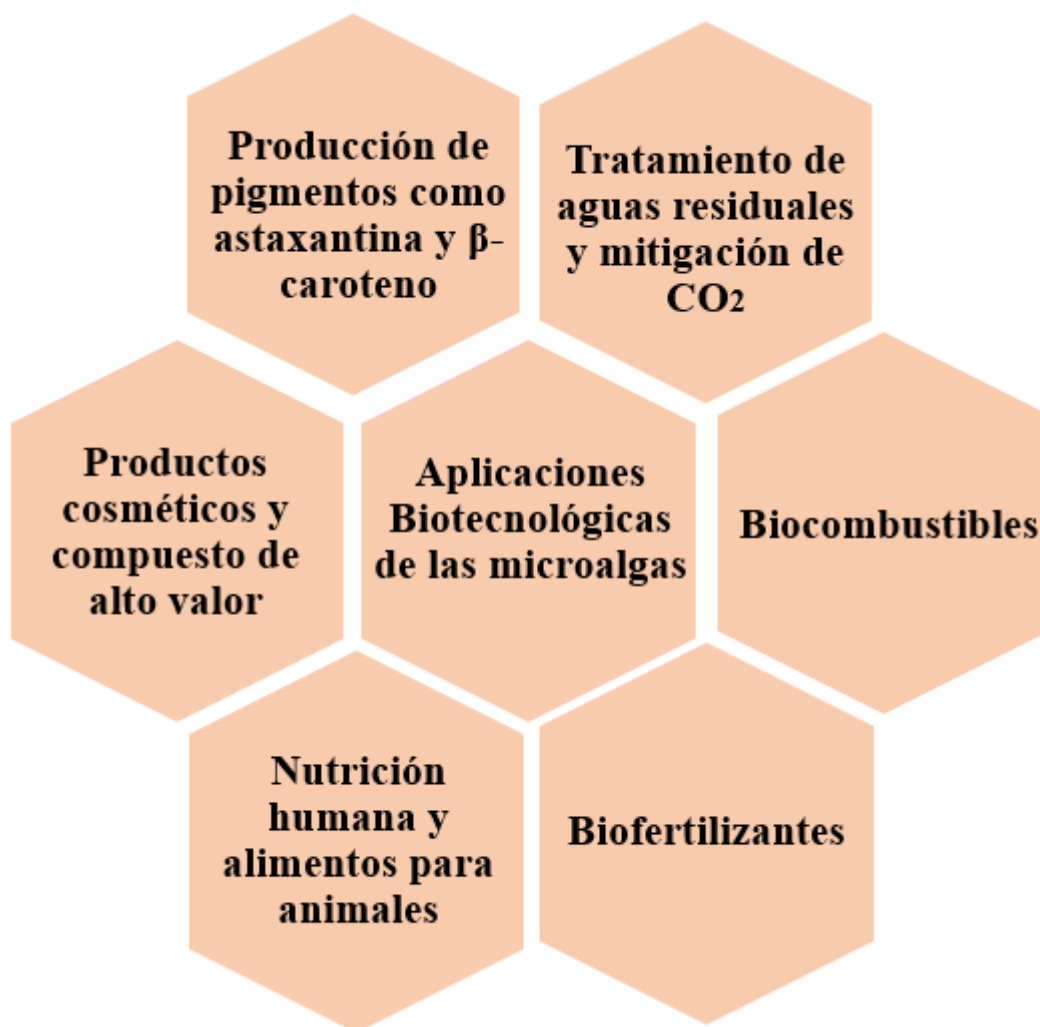


Figura 2. Aplicaciones biotecnológicas de las microalgas.

Fuente: Autor.

Como lo muestra la figura 2, las microalgas han demostrado tener una amplia gama de aplicaciones (De Jesus Raposo et al., 2013), entre estas la producción de pigmentos como carotenoides, que son importantes colorantes naturales en la industria alimentaria o utilizados con fines farmacéuticos por su actividad biológica; de igual manera las microalgas producen lípidos, que se pueden utilizar como biocombustible (con 14 a 20 cadenas de carbono) y como alimento (20 cadenas de carbono) (Gonzalez et al., 2020). Las microalgas se usan en la agricultura como fuente de biofertilizante y acondicionadores del suelo, ya que estos microorganismos pueden elevar el nitrógeno y carbono residuales de la tierra, mejorar la conductividad y el pH del suelo; de igual manera se ha demostrado que las microalgas se pueden utilizar como suplemento alimenticio, ya que tienen un impacto positivo en la fisiología de los animales (Rizwan et al., 2018).

La mitigación de CO₂ con microalgas, es una aplicación biotecnológica interesante, ya que estos microorganismos tienen la capacidad de fijar el CO₂ fotosintéticamente, lo cual es una estrategia efectiva para reducir la presencia de este gas de efecto invernadero en la atmosfera. Una aplicación innovadora es el tratamiento de aguas residuales con microalgas, este tipo de fuente es rica en compuestos orgánicos, que pueden ser utilizados por estos microorganismos para su crecimiento, por ende, el uso de sistemas de microalgas y el tratamiento de aguas residuales puede ser una alternativa atractiva no sólo para la remediación de aguas sino también para el crecimiento de estos microorganismos (Rizwan et al., 2018), generando una biomasa que puede ser utilizada para las aplicaciones biotecnológicas antes mencionadas.

Para aumentar el conocimiento del potencial biotecnológico que tienen las microalgas, es importante desarrollar una correcta estrategia de aislamiento y detección de cepas, ya que el uso de cepas locales asegura el dominio y una alta adaptabilidad a las condiciones ambientales, esto evita la invasión de especies no nativas; seguidamente se deben evaluar parámetros físicos y químicos, esto favorecerá las condiciones técnicas de producción y beneficiará la producción de metabolitos de interés (González et al., 2020).

4.2 TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES DOMÉSTICAS

4.2.1 Aguas residuales. Pueden ser líquidos desechables o desechos transportados por el agua como consecuencia de diferentes actividades domésticas, agrícolas, de urbanización e industriales. Generalmente, las aguas residuales pueden contener considerables cantidades de contaminantes orgánicos, nutrientes como N y P, compuestos orgánicos y sedimentos (Gonçalves et al., 2017).

4.2.1.1 Aguas residuales domésticas (ARD). Aquellas procedentes de los hogares, así como de las instalaciones en las que se desarrollen actividades comerciales, industriales o de servicios (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2015); estas contienen sustancias con una estructura química compuesta principalmente por carbono, hidrogeno, oxígeno y nitrógeno como hidratos de carbono (25- 50%) y proteínas (40- 60%), provenientes de las heces humanas o de los desechos de productos alimentarios (Rozo, 2016).

Otros contaminantes de las ARD son los sólidos y el N, este último es uno de los principales contaminantes que causa el deterioro de los cuerpos hídricos, ya que puede causar eutrofización y descenso de los niveles de oxígeno, de igual manera se encuentran agentes patógenos, principalmente coliformes fecales, estos son indicadores de contaminantes biológicos, capaces de producir enfermedades y pueden ir en mayor o menor cantidad en las ARD (Rozo, 2016).

4.2.1.1.1 Características del agua residual doméstica. La calidad del ARD, se puede definir por sus parámetros físicos, químicos y biológicos, la figura 3 muestra la clasificación de estas características, basado en lo expuesto por Rawat, Ranjit, Mutanda & Bux, (2011).

Como lo muestra la figura 3, las características físicas del ARD son temperatura, olor, color y sólidos totales; la temperatura afecta las reacciones biológicas y químicas de los organismos acuáticos, este parámetro puede determinar el pH, la conductividad, el nivel de saturación de gases y diversas formas de alcalinidad. El color es un indicativo de contaminación por descarga de residuos, arrastre de sólidos o descomposición de material vegetal y microorganismos (Mollina, 2016), las ARD adquieren un aspecto negro debido a las reacciones biológicas de los materiales orgánicos e inorgánicos. Los olores, se deben a impurezas disueltas, el más característico es el de sulfuro de hidrogeno producido por microorganismos anaerobios y los sólidos totales son denotados por materiales disueltos y suspendidos que permanecen como residuo en las aguas residuales (Rawat et al., 2011).

Entre las características químicas, están el material orgánico, inorgánico y los gases; en el material orgánico se encuentran hidratos de carbono, proteínas y grasas. Los compuestos inorgánicos comunes que se encuentran en el agua residual son cloruros, sulfatos y fosfatos (Villacrez, 2018); entre los gases se encuentra el sulfuro de hidrogeno y metano por la descomposición de residuos domésticos y el oxígeno que se va consumiendo por la actividad biológica y química (Rawat et al., 2011).

Las características biológicas son importantes en el tratamiento de aguas residuales, ya que la cantidad de especies micro y macro determinan la efectividad del tratamiento (Rawat et al., 2011). En este tipo de característica se encuentran las bacterias entéricas, entero patógenas, los parásitos y virus (Villacrez, 2018).

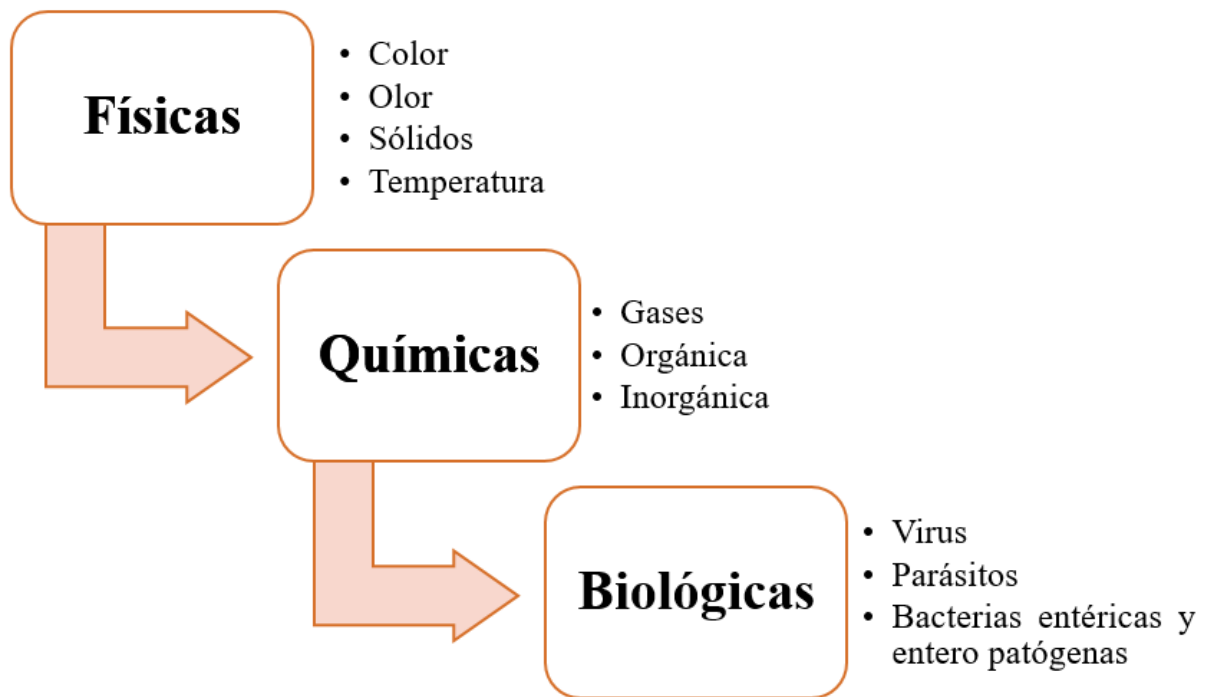


Figura 3. Características físicas, químicas y biológicas del agua residual doméstica.

Fuente: Autor.

4.2.1.1.2 Composición del ARD. Se pueden encontrar diferentes compuestos en el agua residual de origen doméstico (Garcia, 2010), la composición de esta depende de los hábitos de la población generadora, en la tabla 3 se muestran la composición típica de un ARD no tratada con base en lo expuesto por Rawat et al. (2011).

Los parámetros que se muestran en la tabla 3 hacen parte de la caracterización inicial del ARD sin tratar, es importante conocer la composición física, química y biológica del agua antes de iniciar el tratamiento y así identificar el estado del agua residual; los datos de la caracterización inicial también se pueden utilizar para determinar la eficiencia del tratamiento de aguas residuales.

Tabla 3. Composición genérica para el ARD no tratada.

Fuente: Rawat et al., 2011.

Contaminante	Unidad	Concentración		
		Baja	Media	Alta
Sólidos totales	mg/L	350	720	1200
Sólidos totales disueltos	mg/L	250	500	850
Sólidos sedimentables	mg/L	5	10	20
Sólidos suspendidos	mg/L	100	220	350
DBO	mg/L	110	220	400
DQO	mg/L	250	500	1000
N total	mg/L	20	40	85
N amoniacal	mg/L	12	25	50
Nitratos	mg/L	0	0	0
Nitritos	mg/L	0	0	0
Fosforo total	mg/L	4	8	15
Grasas y aceites	mg/L	50	100	150
Alcalinidad total (CaCO ₃)	mg/L	50	100	200
Cloruros	mg/L	30	50	100
Coliformes totales	NMP/L	10 ⁶ – 10 ⁷	10 ⁷ -10 ⁸	10 ⁷ -10 ⁹

4.2.1.1.3 Tratamiento del ARD. Con el fin de proteger la salud pública y el ambiente, las ARD deben pasar por un proceso antes de ser vertidas (Mellado, 2019) ya que tienen un alto contenido de materia en suspensión y demanda de oxígeno, por lo que es inadecuado verter este tipo de aguas en el medio natural de forma directa (Allende & Mendoza, 2018).

El tratamiento de ARD consiste en un conjunto de operaciones unitarias de tipo físico, químico y biológico (Rozo, 2016), en las operaciones biológicas del tratamiento convencional de aguas residuales se encuentran los procesos aeróbicos/ anaeróbicos que convierten los contaminantes presentes en el agua residual en compuestos inertes que permiten la reutilización de manera

segura del agua; el tratamiento convencional proporciona niveles satisfactorios de eliminación de nitrógeno, carbono y fósforo, sin embargo, se requiere un consumo de energía alto, tiene un impacto ambiental significativo debido a la emisión de gases de efecto invernadero como CO₂, CH₄ y N₂O, entre otros (Acién et al., 2016).

Para lograr diferentes niveles de eliminación de contaminantes en las aguas residuales, los procedimientos individuales de tratamiento se combinan en una variedad de sistemas clasificados como tratamientos de aguas residuales, entre estos están el pretratamiento, el tratamiento primario, secundario y terciario (Rawat et al., 2011), estos se muestran en la figura 4, basado en lo propuesto por Morrissey, (2018).

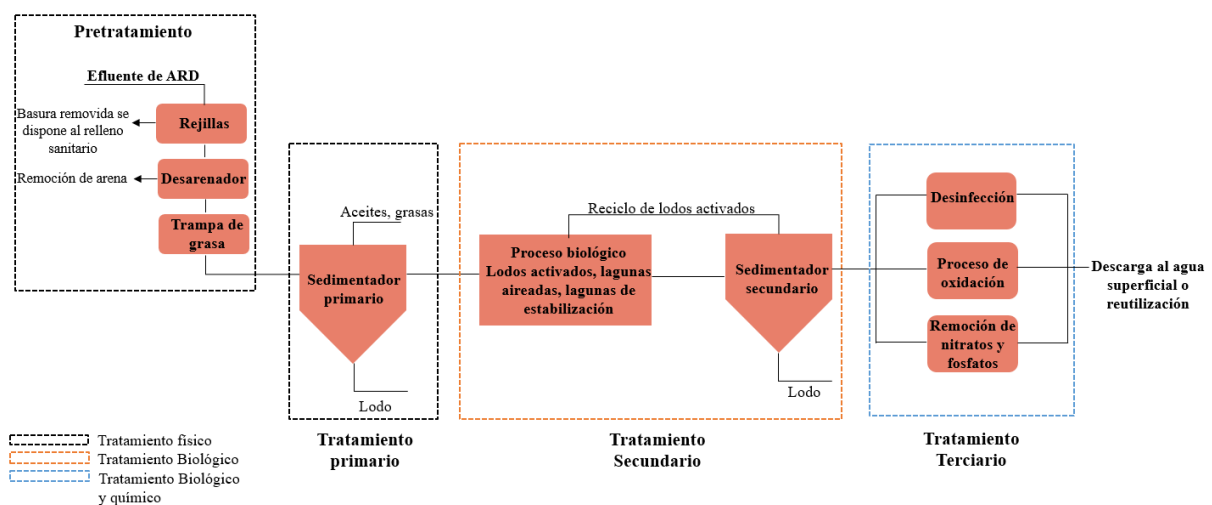


Figura 4. Tratamiento convencional de aguas residuales domésticas.

Fuente: Morrissey, 2018.

La combinación de tratamientos que se muestran en la figura 4 tienen la finalidad de obtener aguas residuales cuya carga orgánica y contaminantes han sido depurados. El pretratamiento se realiza para retener sólidos gruesos, material flotante, plásticos, grasas, arena y grava, para este comúnmente se utiliza canales con rejillas gruesas, finas y desarenadores; el tratamiento primario es físico y se realiza para remover material en suspensión, con excepción de los sólidos disueltos en el agua (Mellado, 2019), con este tratamiento generalmente se elimina el 35% de la demanda biológica de oxígeno (DBO) y el 60% de los sólidos en suspensión, lo cual es insuficiente para cumplir con la mayoría de los requisitos reglamentarios, por este motivo, se deben hacer tratamientos posteriores (Morrissey, 2018).

En el tratamiento secundario se realizan procesos biológicos, generalmente se emplean bacterias para la degradación de materia orgánica a CO₂ y otros compuestos minerales, estas

bacterias requieren concentraciones de oxígeno disuelto de al menos 2 mg/L, debido a que este ayuda a oxidar la materia orgánica presente, el oxígeno es suministrado a través de aireación, con el consiguiente consumo energético que repercute en elevados costos de proceso (Morales, 2016).

Los procesos biológicos más utilizados en esta etapa de proceso son lodos activados, lagunas aireadas y lagunas de estabilización (Ministerio de desarrollo económico, 2000); en esta etapa del tratamiento se logran resultados eficientes en la remoción de la DBO entre un 50 y un 95%. Una vez se elimine la materia orgánica, la biomasa microbiana que se genera es separada en un sedimentador secundario, en estos quedan retenidos los microorganismos en forma de lodos, de los cuales una parte se recicla a los tanques de aireación con el fin de asegurar una concentración adecuada de microorganismos para la eliminación de materia orgánica, y el lodo permanece más tiempo en contacto con el influente en el reactor, los lodos que no son reincorporados al tanque de aireación pueden ser tratados para su degradación, este tratamiento consiste en tanques de digestión anaerobia en donde los lodos de la sedimentación primaria y secundaria son revalorizados en forma de biogás. Cuando los sistemas de tratamiento no cuentan con sistemas anaerobios, los lodos sufren un proceso de compostaje para utilidad en la agricultura o son incinerados para su eliminación (Barreiro, 2019).

El tratamiento terciario busca principalmente la remoción de nutrientes como N y P y así evitar que la descarga del ARD ocasione eutrofización (Mellado, 2019), los procesos más utilizados son nitrificación, adsorción sobre carbón activado, intercambio iónico, entre otros (Lopez, 2019), de igual manera, el tratamiento terciario puede incluir la desinfección, ya que se deben destruir los microorganismos patógenos, con el fin de evitar la propagación de enfermedades transmitidas por el agua y minimizar los problemas de salud pública (Abdel-Raouf, Al-Homaidan, & Ibraheem, 2012). Es importante que esta última etapa del tratamiento de agua residual convencional, cumpla con lo establecido en la Resolución 0631 del 2015, en donde se establecen los límites máximos permisibles (LPM) en los vertimientos puntuales a cuerpos de agua superficiales, estos parámetros se muestran en la tabla 4.

Tabla 4. LMP en los vertimientos puntuales a cuerpos de aguas superficiales**Fuente: Resolución 0631 del 2015**

Parámetro	Unidades	LMP
pH	Unidades de pH	6 – 9
DQO	mg/L O ₂	200
Sólidos suspendidos totales	mg/L	100
Sólidos sedimentables	mg/L	5
Grasas y aceites	mg/L	20

En las plantas de tratamiento de agua residual convencional no sólo se deben tratar los efluentes líquidos, se deben también tratar los lodos generados, esto se realiza mediante digestión anaerobia, en donde la materia orgánica es consumida por bacterias anaeróbicas y es posible generar energía eléctrica mediante la utilización del biogás producto de la digestión; esta etapa se enfoca en eliminar o disminuir la materia orgánica en los lodos, sin embargo, seguirán presentes otros compuestos como material inorgánico (Rojas & Mendoza, 2012). Los lodos de la salida del digester se caracterizan por tener una cantidad alta de N (500 mg/L en forma de amonio), P (12 mg/L) y DQO (300 mg/L) (Morales, 2016), debido a que los contaminantes que contienen los afluentes se eliminan en gran medida por la absorción en los lodos (primario y secundario) (Oropeza García, 2006). En la tabla 5, se muestra la composición del agua residual efluente del tratamiento primario y secundario de manera secuencial y la composición de lodos que se generan en el tratamiento de aguas residuales después de la digestión, según lo planteado por Morales (2016).

Tabla 5. Composición del agua residual procedente del tratamiento primario y secundario y composición del lodo generado después de la digestión.**Fuente: Autor**

Concentración (mg/L)	Tratamiento primario	Tratamiento secundario	Digestión anaerobia
DQO	500	110.0	300.0
N-NO ₃	2.4	0.0	5.3
N-NH ₄	62.6	20.8	506.5
P-PO ₄	11.3	10.0	12.0

Los procesos de depuración de aguas residuales convencionales mencionados requieren sistemas de tratamiento que consumen altas cantidades de energía entre 0.49 – 0.72 kWh/m³. El gasto energético de estos tratamientos de lodos activados puede suponer entre un 45 y un 75% de los gastos totales de planta de tratamiento de agua residual (PTAR); este gasto energético alto, se encuentra asociado al suministro de oxígeno que se incorpora a través de sistemas mecánicos como bombas o agitadores de superficie, para que las bacterias aerobias mediante oxidación biológica eliminen los contaminantes del agua residual. Por otro lado, los costos del tratamiento convencional aumentan cuando la población a la que le prestan el servicio es pequeña y por ende la PTAR también lo es, por consiguiente, en muchos lugares no se puede hacer frente a los gastos que conlleva este proceso y los efluentes que se generan son vertidos sin un tratamiento adecuado (Barreiro, 2019).

Estos sistemas convencionales para tratar aguas residuales emiten gases de efecto invernadero como CO₂, CH₄ y N₂O, a causa de la actividad microbiana de los fangos activos y del tratamiento de lodos, de igual manera estos tratamientos son ineficientes en el reciclaje de N y P, ya que la eliminación de estos, se basa en procesos como la desnitrificación en forma de N₂ y la precipitación del P. El N y el P son componentes esenciales en los fertilizantes químicos y su fabricación tiene considerables consecuencias económicas, energéticas y ambientales. Por lo tanto, es importante implementar sistemas de tratamiento que favorezcan el reciclaje de estos nutrientes, para contribuir a disminuir su demanda con un consiguiente beneficio económico y ambiental (Barreiro, 2019).

4.3 LAS MICROALGAS COMO ALTERNATIVA PARA EL TRATAMIENTO DE LAS ARD.

El tratamiento de aguas residuales con microalgas es muy atractivo, debido a las capacidades fotosintéticas de estos microorganismos (Abdel-Raouf et al., 2012), el principal objetivo de utilizar las microalgas en el tratamiento de ARD es la utilización y transformación de los nutrientes a biomasa microalgal, con la consecuente producción de oxígeno para mejorar la calidad del efluente, de igual manera la disponibilidad de este para la oxidación bacteriana continua de la materia orgánica, mediante el ciclo de oxigenación fotosintética de aguas residuales (Soriano, 2014). En la figura 5, se muestran las potencialidades y requerimientos para la remoción de contaminantes en ARD utilizando microalgas, en base a lo expuesto por Barreiro (2019) y Nagarajan et al. (2020).

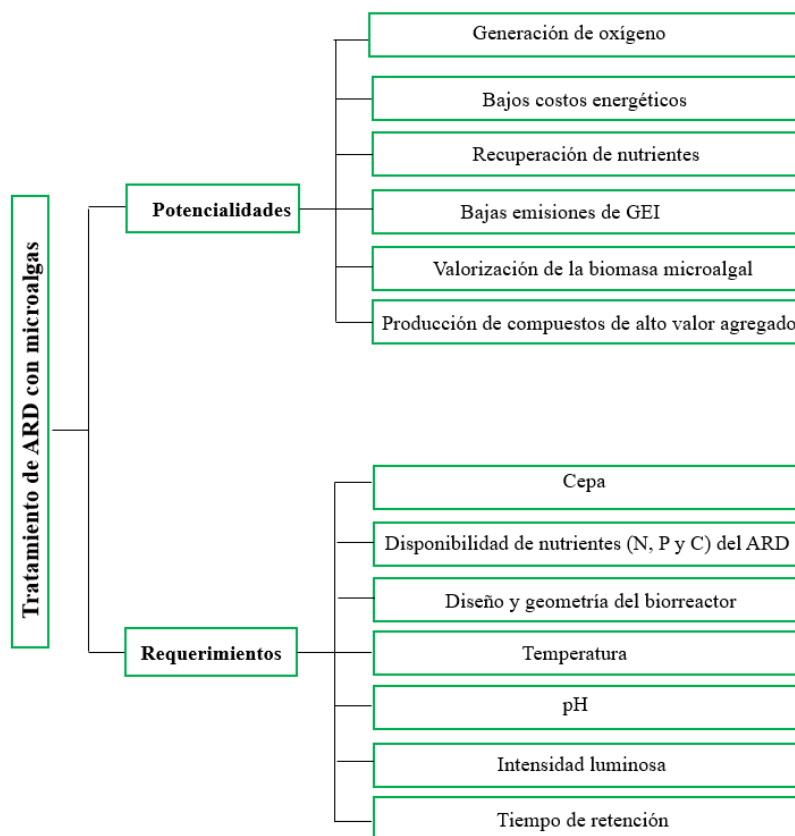


Figura 5. Potencialidades y requerimientos para la remoción de contaminantes en ARD utilizando microalgas

Fuente: Autor.

El tratamiento de ARD con microalgas, tiene varias potencialidades como lo muestra la figura 5, entre ellas la recuperación de nutrientes y transformación de estos en biomasa, con la consecuente producción de oxígeno (Soriano, 2014), los requerimientos de energía y los costos son bajos comparados con los tratamientos convencionales de aguas residuales, (Nagarajan, 2020), se presenta disminución de CO₂ que es uno de los gases que causan efecto invernadero, por ende es un proceso amigable con el ambiente; finalmente la biomasa que se obtiene en el proceso puede ser posteriormente revalorizada en forma de bioproductos o biofertilizantes (Barreiro, 2019).

Entre los requerimientos que se deben tener en cuenta el tratamiento de ARD con microalgas, se encuentra la cepa a utilizar, ya que debe tolerar las condiciones extremas presentes en el agua residual y crecer en ambientes con cierta relación de carga de DBO/DQO, en las ARD esta relación generalmente es de 200- 700 mg/L, de igual manera deben poder aprovechar el N y P, estos se encuentran en las ARD en un rango de 50-500 mg/L y 10 -12 mg/L respectivamente (Nagarajan, 2020). Se debe considerar el diseño y la geometría del biorreactor,

ya que en este prácticamente se llevará a cabo el proceso, por eso se deben considerar una serie de parámetros; es importante también tener en cuenta la temperatura, ya que esta que puede afectar la velocidad de crecimiento, la tasa de división celular y la velocidad fotosintética. La intensidad luminosa es un factor que determina el rendimiento de un proceso fotosintético; el pH influye en el desarrollo de las microalgas y finalmente el tiempo de retención dependerá de la composición del agua residual. Todos estos factores influyen en el desarrollo de las microalgas, afectando su productividad y la eliminación de nutrientes del ARD (Barreiro, 2019).

4.3.1 Cultivo de microalgas en Tratamiento de ARD. Para el tratamiento de aguas residuales, el cultivo de microalgas se puede realizar en sistemas de células suspendidas o libres y en sistemas de células inmovilizadas (generalmente inmovilizadas en quitosano o alginato), en la tabla 6 se muestran las ventajas y limitaciones de estos dos sistemas en el tratamiento de agua residual, basado en lo propuesto por Goncalves et al. (2017) y Zhuang et al. 2020.

Tabla 6. Sistemas de cultivo de microalgas en ARD

Fuente: Autor

Sistema de cultivo	Ventajas	Limitaciones
Células suspendidas o libres	Aptos para tratar cantidades grandes de ARD Aplicable a gran escala	Recolección de microalgas antes de la eliminación de las aguas residuales
Células inmovilizadas	La cosecha de microalgas es más fácil y económica Las microalgas están más protegidas a la fotoinhibición La matriz de inmovilización confiere a las células una mayor resistencia a los ambientes hostiles, como la salinidad, la toxicidad del metal y el pH. Alta densidad celular	Altos costos asociados a la matriz polimérica Puede ocurrir una limitación de la luz

Como ya se mencionó la remoción de contaminantes de aguas residuales se puede realizar por células suspendidas o inmovilizadas; utilizando células suspendidas o libres, se han encontrado

remociones de 63.2, 95, y 69.3% para DQO, N y P respectivamente (Lopez, 2019) y para el caso de células inmovilizadas se han reportado porcentajes de remoción de 91.6, 78.2, y 87.5 para DQO, N y P respectivamente (Zhuang et al., 2020), esto quiere decir que los dos sistemas presentan porcentajes altos de remoción de contaminantes de ARD, por ende se puede utilizar cualquier tipo de sistema, sin embargo es importante mencionar que el sistema de células inmovilizadas facilita la recuperación de microalgas de las aguas residuales tratadas (tabla 6), esto es importante, ya que el cosechado puede representar entre el 20 y el 30% del costo total de la producción (Soriano, 2014).

4.3.2 Estudio de tratamiento de ARD con microalgas: Se han realizado estudios de tratamiento de ARD con microalgas en reactores abiertos en paralelo de volúmenes de 3000 m³ con tiempos de retención de 8 días para tratamiento secundario y remoción de nutrientes de ARD, el efluente de estos reactores pasa a dos tanques de sedimentación secundarios, con la ayuda de la adición de coagulante para asegurar una alta separación de biomasa, esta es sometida a un espesamiento, y se trata previamente en una unidad de pretratamiento térmico antes de la digestión anaerobia;. para evaluar la factibilidad del escalado calcularon los costos energéticos, teniendo en cuenta las entradas como la electricidad para las ruedas de paleta de los reactores, la electricidad para otras unidades del proceso (pretratamiento, sedimentación y espesamiento) y electricidad y calor para el digester anaeróbico y en las salidas tuvieron en cuenta la energía se produce a partir del metano derivado de la codigestión de biomasa con lodo. La investigación confirmó la viabilidad del balance positivo de energía eléctrica haciendo posible que la PTAR basada en microalgas se convierta en un productor de energía en lugar de un consumidor de esta, de igual manera, demostraron que esta alternativa tiene bajos consumos energéticos comparados con los tratamientos convencionales de ARD, la entrada de energía total en el tratamiento con microalgas varió de 430 a 776 kWh/d y el consumo estimado en una PTAR convencional es de 1095 kWh/d (Díez-Montero et al., 2018).

Para tratar ARD con microalgas a gran escala la recolección o cosecha de biomasa microalgal es un cuello de botella, el cual depende de la cepa, de las condiciones del cultivo y del producto final. La biomasa se puede cosechar con varias operaciones unitarias, entre estas la floculación combinada con flotación/sedimentación y finalmente la deshidratación mediante centrifugación o filtración, de igual manera se ha propuesto para la recolección de microalgas el método de electrocoagulación (Soriano, 2014), el cual no causa cambios significativos en la calidad de la biomasa (Gouveia et al., 2016).

5. ANALISIS DE RESULTADOS Y DISUSIÓN

5.1 TRATAMIENTO CONVENCIONAL DE AGUAS RESIDUALES

El tratamiento convencional de aguas residuales tiene elevados costos, esto hace que sea difícil que poblaciones pequeñas tengan acceso a estos procesos, por ende, en algunos municipios de Colombia aún no se cuenta con un sistema adecuado para tratar las ARD y los efluentes que allí se generan son vertidos sin un tratamiento adecuado, lo que hace que se deterioren rápidamente los cuerpos superficiales de agua.

En la figura 6 se encuentran tabulados los datos de sólidos totales (ST) y DBO en %remoción del municipio de Bello, Cartagena de Indias, Madrid y Tuluá, los datos presentados corresponden a los años 2019, 2019, 2018, y 2009 respectivamente, además se muestra los datos para Bogotá D.C, del año 2009 y son reportados por el Sistema Único de Información (SUI, 2020).

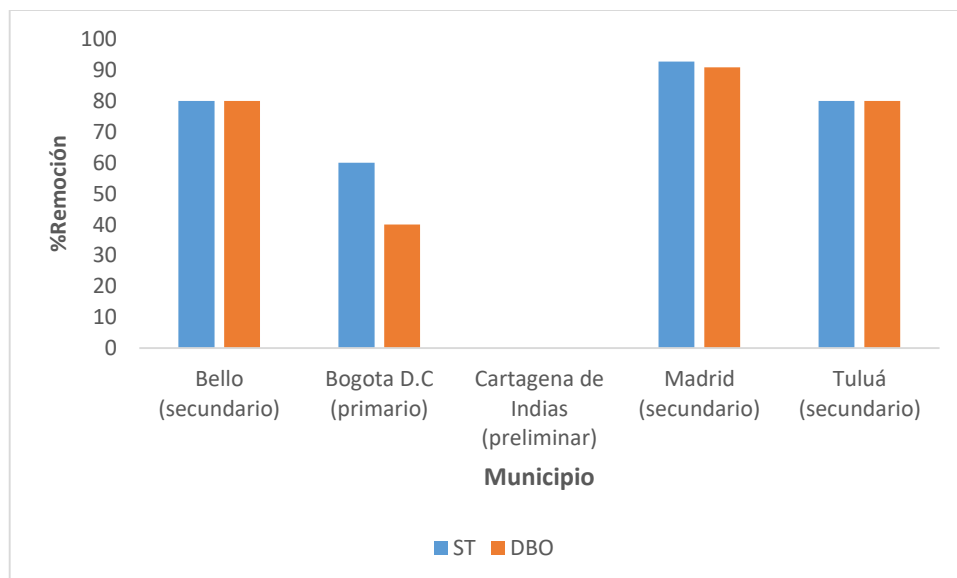


Figura 6. Porcentajes de remoción de ST y DBO

Fuente: Autor.

Como se observa en la figura 6 el tratamiento de agua residual más avanzado es el secundario, este se realiza en municipios como Bello (Antioquia), Madrid (Cundinamarca) y Tuluá (Valle del Cauca) con datos %remoción de ST de 80%, 92.75%, y 80% y DBO de 80%, 90.94% y 80% respectivamente; el mayor porcentaje de remoción de ST y DBO se presenta en Madrid, debido a que la PTAR cuenta con un sistema avanzado con las siguientes unidades de tratamiento: desarenación, rejillas, flotación, lodos activados, tratamiento de lodos y una desinfección con rayos ultravioleta (SUI, 2020), es decir es una planta integral, es importante

destacar que esta planta de tratamiento realiza desinfección a diferencia de Bello y Tuluá, con esto se asegura la eliminación de microorganismos patógenos que puedan llegar a transmitir enfermedades y problemas de salud pública.

El tratamiento primario es realizado en Bogotá D.C, esta PTAR tiene unidades de tratamiento de desarenación, rejillas, sedimentación químicamente asistida utilizando cloruro férrico y polielectrolito aniónico para facilitar la coagulación, estabilización de lodos y tratamiento de lodos; los %remoción que se logran para ST y DBO son de 60 y 40% respectivamente, es decir no se alcanza a remover el 50% de DBO.

El municipio de Cartagena no reporta datos de remoción de ST y DBO, esto es debido a que allí sólo se realiza un tratamiento preliminar, es decir sólo se hace remoción de sólidos grandes y por ende el agua residual generada no tiene tratamiento alguno, lo que indica que no se está cumpliendo con la resolución 0631 del 2015 (tabla 4). Los datos para este municipio son del año 2019, lo cual es preocupante, ya que el efluente generado después de este tratamiento preliminar contiene cantidades considerables de contaminantes, carga orgánica y nutrientes que provocan eutrofización y enfermedades, esto hace indispensable que se gestionen tratamientos de aguas residuales que sean viables ambiental y económicamente.

5.2 TRATAMIENTO DE ARD CON MICROALGAS

Las microalgas tienen el potencial de proporcionar una remediación rentable en el tratamiento de aguas residuales, en los últimos años se han realizado investigaciones de esta potencialidad; en la tabla 7 se observan resultados encontrados por algunos autores que demuestran la capacidad de las microalgas para eliminar contaminantes como materia orgánica expresada en DQO, y nutrientes como N y P de ARD.

Tabla 7. Cantidad final en el efluente en mg/L y porcentaje de remoción en ARD utilizando microalgas.

Fuente: Autor.

Microalga	ARD tomada	N		P		DQO		Ref
		mg /L	%R	mg/L	%R	mg/L	%R	
<i>Botryococcus sp.</i> 15	Salida de la laguna de oxidación	0.05 NO ₃	80	1.5 PO ₄	70	65	79.8	(Barrantes & Tapullima, 2018)
<i>Chorella sp.</i> 14	Después del espesamiento de lodos activados	12.7 NT	89.1	40.4 PT	80.9	210	90.8	(Li et al., 2011)
<i>Chlorococcum littorale</i> 17	Después de lodos activados	1.3 NT	94.2	39.6 PO ₄	56.5	160	38.46	(López, 2016)
<i>Chlorella sp.</i> 7	Después del tratamiento primario avanzado	5 NO ₃	95	30.7 PO ₄	69.3	173	63.2	(Lopez, 2019)
<i>Desmodesmus sp.</i> 7	Después del tratamiento primario avanzado	3.5 NO ₃	96.5	11.7 PO ₄	88.3	137	70.9	(Lopez, 2019)

NT: Nitrógeno total, PT: Fosforo total, %R: Porcentaje de remoción, Ref: Referencia

La tabla muestra los porcentajes de remoción encontrados en algunos estudios utilizando diferentes microalgas en el tratamiento de ARD, se observa que la que presenta la mayor remoción de carga orgánica expresada en DQO es la microalga *Chlorella sp* (90.8%), sin embargo, esta tiene un contenido final en el efluente de 210 mg/L y si se compara con lo establecido en la Resolución 0631 del 2015 (tabla 4) este parámetro excede el LMP (200 mg/L),

es importante tener en cuenta que los afluentes no tienen la misma concentración inicial de contaminantes, por ende, aunque la microalga *Chlorella* sp. es eficiente en la remoción de materia orgánica, este afluente tiene la concentración de DQO inicial más alta.

La microalga que presentó el menor porcentaje de remoción de DQO fue *Chlorococcum littorale* (38.46), sin embargo, el contenido reportado en mg/L cumple con el LMP, esto es debido a que la concentración inicial del afluente es baja (260 mg/L).

El N y P son nutrientes que como se ha mencionado en este documento causan eutrofización en los cuerpos de agua, las microalgas también cumplen un papel importante en la remoción de estos y como se presenta en la tabla 7, los %remoción son altos superan el 50% de remoción en aguas residuales utilizando diferentes microalgas, de igual manera es importante destacar que estos nutrientes que inicialmente traen las aguas residuales son esenciales para el crecimiento de las microalgas y por esto se reportan altas remociones de estos.

Los %remoción de N, P y DQO dependen en gran medida del agua residual que se va a tratar y del tratamiento que se le realizó previamente a esta, ya que como se observa en la tabla 7 el ARD fue tomada en diferentes puntos del tratamiento convencional (después del tratamiento primario, secundario y terciario); algunos autores sugieren que el tratamiento de aguas residuales con microalgas podría usarse como un tratamiento terciario para eliminar la contaminación orgánica e inorgánica restantes, después de los procesos convencionales de tratamiento primario y secundario (Ferreira et al., 2019), de igual manera algunos estudios abordan el tratamiento con microalgas de ARD de efluentes primarios y han reportado altas eficiencias en la asimilación de N y P (Ji et al., 2013); por ende, el tratamiento de efluentes con microalgas se puede lograr en cualquier punto en que se tome el agua residual a tratar, sin embargo, estas variaciones pueden conducir a diferentes composiciones de biomasa cultivada (Choudhary et al., 2020).

5.2.1 Aplicación biotecnológica de la biomasa obtenida en el tratamiento de ARD con microalgas. Las ARD contienen nutrientes necesarios para el cultivo de microalgas como N y P, de igual manera tienen carbono en muchas formas, este puede ser metabolizado por las microalgas en modo mixotrófico/ heterotrófico para la consecuente producción de biomasa (Nagarajan et al., 2020). Las microalgas cultivadas en aguas residuales son una fuente de metabolitos primarios (carbohidratos, proteínas y lípidos) y secundarios (pigmentos y antioxidantes) que pueden ser utilizados para producir biocombustibles, biopolímeros, biofertilizantes, nutracéuticos, compuestos de grado alimenticio, piensos, suplementos, etc., y las aguas residuales tratadas pueden reutilizarse para fines agrícolas o industriales (Shahid et

al., 2020). En la tabla del anexo I, se muestran estudios reportados en literatura sobre el cultivo de microalgas en ARD con los porcentajes de remoción de nutrientes (N y P) y la composición bioquímica de metabolitos primarios en la biomasa obtenida.

La tabla del anexo I muestra los porcentajes de remoción de N y P en ARD tomadas después del tratamiento primario y secundario utilizando diferentes especies microalgales del genero *Scenedesmus*, estas microalgas presentan altas eficiencias de remoción (figura 8), para el caso de N se presentan remociones desde un 67 a un 100%; y para P remociones por encima de un 95%, esto indica que el agua residual que se va a tratar con microalgas, se puede tomar del efluente proveniente del tratamiento primario o secundario.

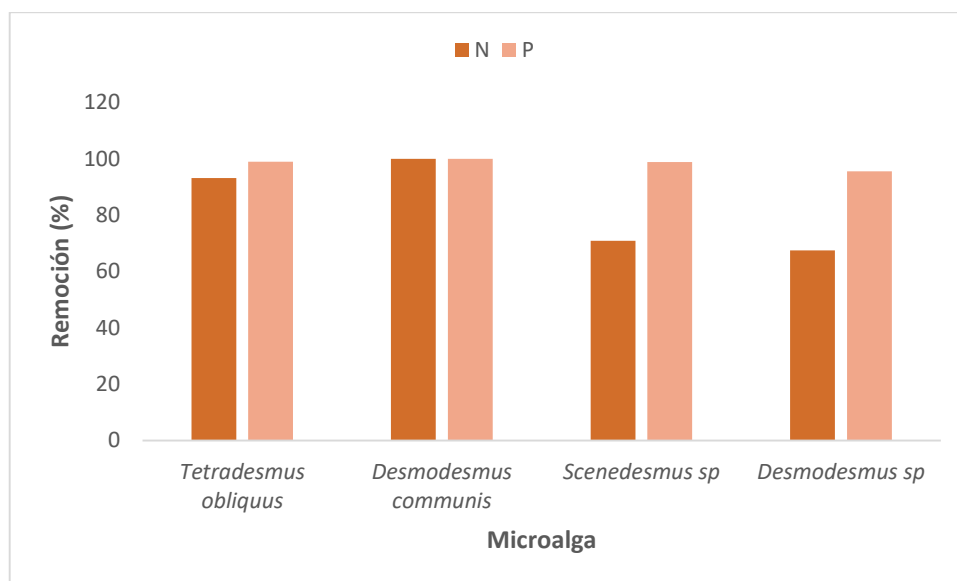


Figura 7. Remoción de N y P en ARD utilizando especies microalgales del genero *Scenedesmus*.

Fuente: Autor.

Las microalgas que se cultivan en aguas residuales tienen dos desafíos el primero es tratar el agua residual y que su vertimiento este acorde a lo estipulado por la Resolución 0631 del 2015 y el segundo es producir compuestos útiles como lípidos, carbohidratos y proteínas de manera simultánea. La figura 9 muestra la composición bioquímica obtenida por cada especie microalgal, en donde se puede observar que la biomasa obtenida por *Tetradesmus obliquus* y *Desmodesmus communis* en el tratamiento de ARD tomados de efluentes primarios están compuestas en su mayoría por carbohidratos y en el caso de la biomasa obtenida de *Scenedesmus sp* y *Desmodesmus sp* están compuestas principalmente por proteínas, las ARD tratadas con estas dos microlagas fueron tomadas del efluente secundario; el contenido de lípidos fue relativamente bajo en todos los casos; esta variación en la composición de la

biomasa que se obtiene depende de las diferentes especies de microalgas y de las condiciones de cultivo.

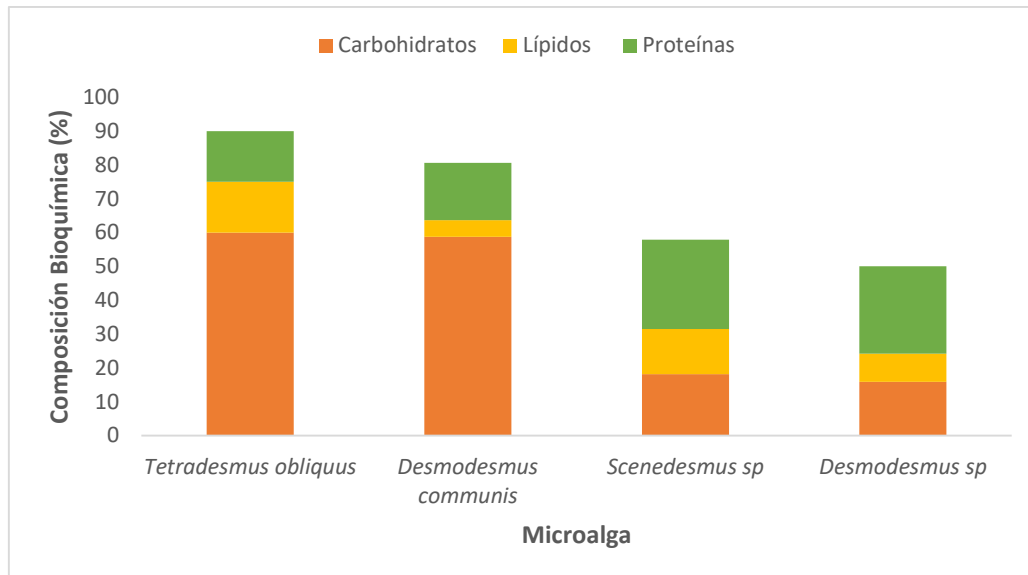


Figura 8. Composición bioquímica de biomasa microalgal obtenida en el tratamiento de ARD

Fuente: Autor.

De la biomasa que se obtiene de microalgas en el tratamiento de ARD se pueden producir varios tipos de productos, por ejemplo, los triacilglicerol (TAG) en los lípidos de microalgas pueden convertirse en biodiesel a través del proceso de transesterificación, los sacáridos podrían usarse para producir bioetanol o biogás mediante fermentación o digestión anaeróbica y la proteína de la biomasa es una materia prima para alimentos para animales, y podría usarse como alimentos para peces (Wu et al., 2014).

5.2.2 Sistema alternativo de microalgas para tratamiento de ARD. Como se ha mencionado el cultivo de microalgas es eficiente para la remoción de materia orgánica, nutrientes como N y P y es una alternativa a los métodos convencionales de tratamiento de agua residual, estas se pueden cultivar en estanques abiertos como el *Raceway* o en biorreactores cerrados (figura 1). La figura 10, muestra el diagrama de bloques para el tratamiento de ARD utilizando microalgas, esta alternativa es propuesta por Soriano (2014).

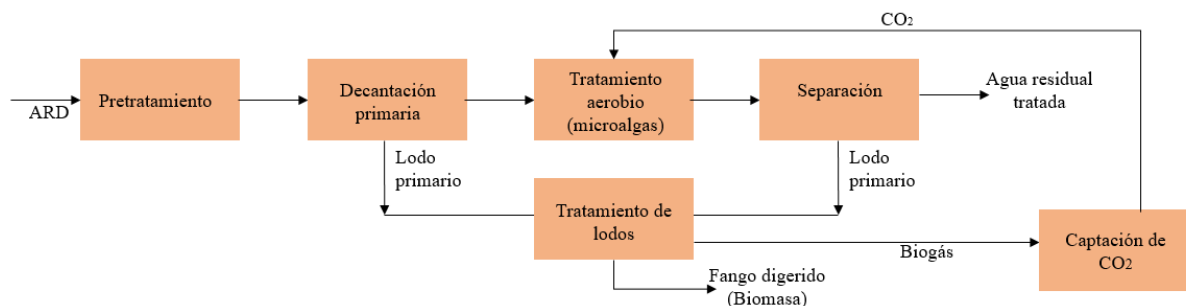


Figura 9. Diagrama de bloques para tratamiento de ARD con microalgas

Fuente: Soriano, 2014.

El diagrama de bloques (figura 10) muestra los tratamientos que se pueden utilizar en el tratamiento de ARD con microalgas, inicialmente el agua residual pasa al pretratamiento, que es el mismo que se realiza en el tratamiento convencional, con el fin de eliminar sólidos grandes; seguidamente se pasará a una decantación primaria en donde se obtienen dos corrientes, una de sólidos llamado lodo primario y el agua a tratar, seguidamente esta pasa a un tratamiento aerobio, este se realiza reactores abiertos tipo *Raceway* por su facilidad de escalado y bajo costo, en estos reactores el ARD entra en contacto con las microalgas durante un periodo de tiempo con el objetivo de descomponer la materia orgánica y remover sustancias inorgánicas presentes en el agua residual, seguidamente se separa el lodo formado que contiene la biomasa del agua residual tratada; los lodos generados en esta separación son llevados a un tratamiento de lodos junto con los generados en la decantación primaria, estos son sometidos a una digestión anaerobia a través del cual se obtiene biomasa que se puede utilizar como biofertilizante y biogás compuesto principalmente por metano y CO_2 , este último se recicla al reactor *Raceway* para que sea utilizado por las microalgas y favorecer el proceso fotosintético (Soriano, 2014).

El tratamiento de ARD con microalgas, es una alternativa interesante para los departamentos en donde actualmente no se realiza ningún tratamiento a las aguas residuales generadas, o en el caso en donde sólo se realiza un tratamiento preliminar y no se cumple con los LMP en la resolución 0631 del 2015, como en el municipio de Cartagena (figura 6), debido a que el agua residual a tratar puede ser tomada de un pretratamiento.

5.3 COMPARACIÓN ENTRE EL MÉTODO CONVENCIONAL Y EL TRATAMIENTO CON MICROALGAS EN ARD

Es importante proteger el estado ecológico de las aguas superficiales de la contaminación generada por ARD, en Colombia se utiliza el tratamiento convencional (pretratamiento, tratamiento primario, secundario y terciario), sin embargo, hoy en día el cultivo de

microorganismos fotosintéticos como las microalgas ha generado gran atención, debido a que se presenta tres ventajas combinadas: la eliminación del exceso de nutrientes, la producción de biomasa y el consumo de CO₂. En la tabla 8 se realiza la comparación entre el método convencional y el método alternativo con microalgas en el tratamiento de ARD.

Tabla 8. Comparación entre el método convencional y el tratamiento con microalgas en ARD

Fuente: Autor

Tratamiento convencional	Tratamiento alternativo con microalgas
En el proceso de lodos activos, la aireación supone un 45-75% del costo energético total de la PTAR (Soriano, 2014).	El tratamiento en reactores <i>Raceway</i> requiere menor consumo energético, ya que las microalgas consumen el CO ₂ , produciendo mediante la fotosíntesis el oxígeno necesario para las bacterias aerobias, además estos tipos de reactores suelen utilizar ruedas de paleta para favorecer la agitación. (Soriano, 2014).
El consumo de energía se estima en 0.5 kWh/m ³ (Nagarajan et al., 2020)	Se estima un consumo de energía de 0.2 kWh/m ³ (Nagarajan, 2020)
Emiten gases de efecto invernadero como CO ₂ , CH ₄ y N ₂ O, a causa de la actividad microbiana de los fangos activos y del tratamiento de lodos (Barreiro, 2019)	Las microalgas pueden secuestrar carbono de fuentes puntuales reduciendo las emisiones de gases de efecto invernadero (Nagarajan et al., 2020)

Como se muestra en la tabla 8, el tratamiento con microalgas tiene muchas ventajas en comparación con el tratamiento convencional, entre estos el consumo energético y las emisiones de gases de efecto invernadero disminuyen; al presentarse una disminución en la energía que se requiere para tratar ARD con microalgas, se presenta una disminución de costos, lo que es interesante ya que se abre la posibilidad de migrar a este tratamiento alternativo de aguas residuales, el cual es más amigable ambientalmente.

6. CONCLUSIONES

Los tratamientos de ARD convencionales son una serie de operaciones de tipo físico, químico y biológico que requieren alto consumo energético, emiten gases de efecto invernadero, desperdician recursos reciclables y generan un exceso de descarga de lodos, por ende, es importante implementar sistemas de tratamiento alternativos que consuman menos energía, favorezcan el reciclaje de recursos, sean amigables con el ambiente y más económicos.

El tratamiento de ARD con microalgas tiene muchas ventajas en comparación con el tratamiento convencional, entre estas el consumo energético y las emisiones de gases de efecto invernadero disminuyen; al presentarse una disminución en la energía, se presenta una disminución de costos, lo que es interesante ya que se abre la posibilidad de migrar a este tratamiento alternativo.

Las microalgas pueden usarse como un tratamiento terciario para eliminar contaminación orgánica e inorgánica restante, después de los procesos convencionales de tratamiento primario y secundario, sin embargo, también han sido utilizadas ARD de efluentes primarios y se han reportado altas eficiencias de remoción de contaminantes, por ende, el tratamiento de efluentes con microalgas se puede lograr en cualquier punto en que se tome el agua residual a tratar, esto hace interesante el uso de estos microorganismos en municipios de Colombia donde no hay un tratamiento adecuado de las aguas residuales generadas ya que se pueden utilizar aguas provenientes del tratamiento primario o de un pretratamiento y tener eficiencias de remoción de contaminantes altas.

Los microorganismos fotosintéticos como las microalgas son atractivas para el tratamiento de aguas residuales ya que producen oxígeno que es utilizado para la oxidación bacteriana continua de la materia orgánica, lo que permite que se presenten altas eficiencias en la remoción de DQO, de igual manera durante el proceso de crecimiento asimilan nutrientes inorgánicos que en las ARD son contaminantes y se deben remover, por lo tanto, las microalgas logran porcentajes de remoción de N y P altos en los afluentes de aguas residuales.

El cultivo de microalgas en aguas residuales cumple dos funciones muy importantes la primera es depurar el agua residual y que el efluente tratado este acorde a lo estipulado en la Resolución 0631 del 2015 y la segunda es producir compuestos útiles como lípidos, carbohidratos y

proteínas de manera simultánea, los cuales se utilizan para producir diferentes productos como biodiesel, bioetanol y materia prima de alimentos para animales respectivamente.

7. RECOMENDACIONES Y TRABAJOS FUTUROS

Las investigaciones de microalgas en tratamiento de ARD han demostrado altas eficiencias en la remoción de materia orgánica y nutrientes en cualquier punto en que tome el efluente a tratar, por ende, es interesante que, en las próximas investigaciones, se tome el agua de un tratamiento previo convencional no tan avanzado como el pretratamiento o tratamiento primario, con el fin de que no necesariamente tenga que existir una PTAR convencional para iniciar la investigación con estos microorganismos.

Utilizar el sistema de células inmovilizadas para el tratamiento de ARD, ya que este permite que la cosecha de microalgas sea más fácil y económica, lo que es importante ya que la recolección de biomasa representa entre el 20 y el 30% del costo total de la producción.

8. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Abdel-Raouf, N., Al-Homaidan, A. A., & Ibraheem, I. B. M. (2012). Microalgae and wastewater treatment. *Saudi Journal of Biological Sciences*, 19(3), 257–275. <https://doi.org/10.1016/j.sjbs.2012.04.005>
- 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>
- Acién, F. G., Gómez-Serrano, C., Morales-Amaral, M. M., Fernández-Sevilla, J. M., & Molina-Grima, E. (2016). Wastewater treatment using microalgae: how realistic a contribution might it be to significant urban wastewater treatment? *Applied Microbiology and Biotechnology*, 100(21), 9013–9022. <https://doi.org/10.1007/s00253-016-7835-7>
- Alcántara, C., de Godos, I., & Muñoz, R. (2020). Wastewater treatment and biomass generation with algae. *Wastewater Treatment Residues as Resources for Biorefinery Products and Biofuels*, 229–254. <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-816204-0.00011-4>
- Allende, G., & Mendoza, A. (2018). *Proyecto de un diseño de una planta de tratamiento de aguas residuales domésticas del Distrito de Lambayeque con el uso de un reactor UASB*. <http://repositorio.unprg.edu.pe/bitstream/handle/UNPRG/3424/BC-TES-TMP-2247.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Anyanwu, R. C., Rodriguez, C., Durrant, A., & Olabi, A. G. (2018). Microalgae Cultivation Technologies. *Reference Module in Materials Science and Materials Engineering*, 1–23. <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-803581-8.09258-4>
- Banerjee, S., & Ramaswamy, S. (2017). Dynamic process model and economic analysis of microalgae cultivation in open raceway ponds. *Algal Research*, 26(November 2016), 330–340. <https://doi.org/10.1016/j.algal.2017.08.011>
- Barrantes, E., & Tapullima, R. (2018). *Universidad nacional de ucayali*. <http://repositorio.unu.edu.pe/bitstream/handle/UNU/2305/000002149T.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Barreiro, N. (2019). *Caracterización de los consorcios microalgas-bacterias en el tratamiento de agua residual urbana*.

- Candela, R. (2016). *Las microalgas y el tratamiento de aguas residuales: conceptos y aplicaciones. Una revisión bibliográfica* (Issue June).
- Cartagena, J., & Malo, B. (2017). *Evaluación del uso de la microalga *Chorella vulgaris* en la remoción de materia orgánica de las aguas residuales de la PTAR El Salitre a nivellaboratorio.*
- Cheah, W. Y., Ling, T. C., Show, P. L., Juan, J. C., Chang, J. S., & Lee, D. J. (2016). Cultivation in wastewaters for energy: A microalgae platform. *Applied Energy*, 179, 609–625. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2016.07.015>
- Chew, K. W., Chia, S. R., Show, P. L., Yap, Y. J., Ling, T. C., & Chang, J. S. (2018). Effects of water culture medium, cultivation systems and growth modes for microalgae cultivation: A review. *Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers*, 91, 332–344. <https://doi.org/10.1016/j.jtice.2018.05.039>
- Choudhary, P., Assemany, P. P., Naaz, F., Bhattacharya, A., Castro, J. de S., Couto, E. de A. do C., Calijuri, M. L., Pant, K. K., & Malik, A. (2020). A review of biochemical and thermochemical energy conversion routes of wastewater grown algal biomass. *Science of the Total Environment*, 726, 137961. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.137961>
- Culebro, J. (2015). *Cosechado de microalgas cultivadas en lagunas de alta carga para el tratamiento de aguas residuales: efecto del almidón sobre la floculación y la producción de biogás.*
- De Jesus Raposo, M. F., De Moraes, R. M. S. C., & De Moraes, A. M. M. B. (2013). Health applications of bioactive compounds from marine microalgae. *Life Sciences*, 93(15), 479–486. <https://doi.org/10.1016/j.lfs.2013.08.002>
- Díez-Montero, R., Solimeno, A., Uggetti, E., García-Galán, M. J., & García, J. (2018). Feasibility assessment of energy-neutral microalgae-based wastewater treatment plants under Spanish climatic conditions. *Process Safety and Environmental Protection*, 119, 242–252. <https://doi.org/10.1016/j.psep.2018.08.008>
- Diniz, G. S., Silva, A. F., Araújo, O. Q. F., & Chaloub, R. M. (2017). The potential of microalgal biomass production for biotechnological purposes using wastewater resources. *Journal of Applied Phycology*, 29(2), 821–832. <https://doi.org/10.1007/s10811-016-0976-3>

- Ferreira, G. F., Ríos Pinto, L. F., Maciel Filho, R., & Fregolente, L. V. (2019). A review on lipid production from microalgae: Association between cultivation using waste streams and fatty acid profiles. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, *109*(July 2018), 448–466. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2019.04.052>
- García, J. (2010). *Efecto del uso de plantas y configuración de los sistemas en la remoción de organismos patógenos mediante el uso de humedales construidos para el tratamiento de aguas residuales domésticas en condiciones tropicales*.
- Gonçalves, A. L., Pires, J. C. M., & Simões, M. (2017). A review on the use of microalgal consortia for wastewater treatment. *Algal Research*, *24*, 403–415. <https://doi.org/10.1016/j.algal.2016.11.008>
- Gonzalez, E. G., de Carvalho, J. C., Aulestia, D. T. M., Gonzalez, O. I. M., & Soccol, C. R. (2020). Bioprospection of green microalgae native to Paraná, Brazil using a multi-criteria analysis: Potential for the production of lipids, proteins, and carotenoids. *Bioresource Technology Reports*, *10*, 100398. <https://doi.org/10.1016/j.biteb.2020.100398>
- Gouveia, L., Graça, S., Sousa, C., Ambrosano, L., Ribeiro, B., Botrel, E. P., Neto, P. C., Ferreira, A. F., & Silva, C. M. (2016). Microalgae biomass production using wastewater: Treatment and costs. Scale-up considerations. *Algal Research*, *16*, 167–176. <https://doi.org/10.1016/j.algal.2016.03.010>
- Guldhe, A., Kumari, S., Ramanna, L., Ramsundar, P., Singh, P., Rawat, I., & Bux, F. (2017). Prospects, recent advancements and challenges of different wastewater streams for microalgal cultivation. *Journal of Environmental Management*, *203*, 299–315. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2017.08.012>
- Hernández-Pérez, A., & Labbé, J. I. (2014). Microalgas, cultivo y beneficios. *Revista de Biología Marina y Oceanografía*, *49*(2), 157–173. <https://doi.org/10.4067/S0718-19572014000200001>
- Ji, M. K., Abou-Shanab, R. A. I., Kim, S. H., Salama, E. S., Lee, S. H., Kabra, A. N., Lee, Y. S., Hong, S., & Jeon, B. H. (2013). Cultivation of microalgae species in tertiary municipal wastewater supplemented with CO₂ for nutrient removal and biomass production. *Ecological Engineering*, *58*, 142–148. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2013.06.020>
- Kadir, W. N. A., Lam, M. K., Uemura, Y., Lim, J. W., & Lee, K. T. (2018). Harvesting and

- pre-treatment of microalgae cultivated in wastewater for biodiesel production: A review. *Energy Conversion and Management*, 171(March), 1416–1429. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2018.06.074>
- Kumar, V., Nanda, M., Pruthi, V., Sharma, N., Vlaskin, M. S., & Tomar, M. S. (2020). Integration of wastewater valorization with microalgae for biofuel production. In *Biovalorisation of Wastes to Renewable Chemicals and Biofuels*. Elsevier Inc. <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-817951-2.00018-3>
- Li, Y., Chen, Y. F., Chen, P., Min, M., Zhou, W., Martinez, B., Zhu, J., & Ruan, R. (2011). Characterization of a microalga *Chlorella* sp. well adapted to highly concentrated municipal wastewater for nutrient removal and biodiesel production. *Bioresource Technology*, 102(8), 5138–5144. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2011.01.091>
- López, I. (2016). *Análisis de efectividad de Chlorococcum littorale y Scenedesmus sp. en biorremediación de aguas residuales*. <https://bdigital.zamorano.edu/bitstream/11036/5733/1/IAD-2016-T024.pdf>
- Lopez, W. (2019). *Evaluación de dos especies de microalgas para determinar la eficiencia de remoción de nutrientes de aguas residuales de la PTAR taboada del callao, Perú* (Vol. 53, Issue 9). <https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004>
- Ma, S., Yu, Y., Cui, H., Yadav, R. S., Li, J., & Feng, Y. (2020). Unsterilized sewage treatment and carbohydrate accumulation in *Tetrademus obliquus* PF3 with CO₂ supplementation. *Algal Research*, 45(January 2019), 101741. <https://doi.org/10.1016/j.algal.2019.101741>
- Mellado, G. (2019). *Determinación De La Eficiencia De Tres Especies Macrófitas Para El Tratamiento De Aguas Residuales Domésticas*.
- Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. (2015). *Resolución 0631 de 2015* (p. 62).
- Ministerio de desarrollo económico. (2000). Reglamento Técnico del sector de agua potable y saneamiento básico- RAS 2000. Título E-Tratamiento de aguas residuales. In *Reglamento Técnico Del Sector De Agua Potable Y Saneamiento Basico*. http://www.minvivienda.gov.co/Documents/ViceministerioAgua/010710_ras_titulo_e_.pdf
- Mollina, Y. (2016). *TRATAMIENTO BIOLÓGICO DE AGUAS RESIDUALES DEL*

LABORATORIO DE INVESTIGACIÓN, ANÁLISIS Y MONITOREO IAM-Q DE LA SECRETARÍA DEL AMBIENTE DEL DMQ.

- Morales, M. del M. (2016). Tratamiento de aguas residuales con microalgas en reactores abiertos. *Tesis Doctoral*, 153. <https://www.educacion.gob.es/teseo/imprimirFicheroTesis.do?idFichero=r00YhW0Jlss%3D>
- Moreno García, L., Gariépy, Y., Barnabé, S., & Raghavan, V. (2020). Biorefinery of microalgae biomass cultivated in wastewaters. In *Refining Biomass Residues for Sustainable Energy and Bioproducts*. <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-818996-2.00007-7>
- Morrissey, A. (2018). Treatment and Recycling of Domestic and Industrial Wastewater. In *Encyclopedia of Renewable and Sustainable Materials*. Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-803581-8.11082-3>
- Nagarajan, D., Lee, D. J., Chen, C. Y., & Chang, J. S. (2020). Resource recovery from wastewaters using microalgae-based approaches: A circular bioeconomy perspective. *Bioresource Technology*, 302, 122817. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2020.122817>
- Oropeza García, N. (2006). Lodos residuales : estabilización y manejo. *Caos Conciencia*, 1(figura 1), 51–58.
- Rawat, I., Ranjith Kumar, R., Mutanda, T., & Bux, F. (2011). Dual role of microalgae: Phycoremediation of domestic wastewater and biomass production for sustainable biofuels production. *Applied Energy*, 88(10), 3411–3424. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2010.11.025>
- Rizwan, M., Mujtaba, G., Memon, S. A., Lee, K., & Rashid, N. (2018). Exploring the potential of microalgae for new biotechnology applications and beyond: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 92(March 2017), 394–404. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.04.034>
- Rojas, R., & Mendoza, L. (2012). Utilizacion de biosolidos para la recuperacion energetica en México. *SciELO*, 7(2), 74–94.
- Rozo, A. (2016). *Evaluación de la respuesta al incremento simultáneo de la carga hidráulica*

y la carga orgánica en humedales de flujo vertical para tratamiento de aguas residuales domésticas bajo condiciones tropicales.

- Russel, M., Meixue, Q., Alam, M. A., Lifen, L., Daroch, M., Blaszcak-Boxe, C., & Kumar Gupta, G. (2020). Investigating the potentiality of *Scenedesmus obliquus* and *Acinetobacter pittii* partnership system and their effects on nutrients removal from synthetic domestic wastewater. *Bioresource Technology*, 299, 122571. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2019.122571>
- Samorì, G., Samorì, C., Guerrini, F., & Pistocchi, R. (2013). Growth and nitrogen removal capacity of *Desmodesmus communis* and of a natural microalgae consortium in a batch culture system in view of urban wastewater treatment: Part I. *Water Research*, 47(2), 791–801. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2012.11.006>
- Schneider, R. de C. de S., de Moura Lima, M., Hoeltz, M., de Farias Neves, F., John, D. K., & de Azevedo, A. (2018). Life cycle assessment of microalgae production in a raceway pond with alternative culture media. *Algal Research*, 32(April), 280–292. <https://doi.org/10.1016/j.algal.2018.04.012>
- Shahid, A., Malik, S., Zhu, H., Xu, J., Nawaz, M. Z., Nawaz, S., Asraful Alam, M., & Mehmood, M. A. (2020). Cultivating microalgae in wastewater for biomass production, pollutant removal, and atmospheric carbon mitigation; a review. *Science of the Total Environment*, 704, 135303. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.135303>
- Shandilya, K. K., & Pattarkine, V. M. (2019). Using microalgae for treating wastewater. In *Advances in Feedstock Conversion Technologies for Alternative Fuels and Bioproducts: New Technologies, Challenges and Opportunities*. Elsevier Inc. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-817937-6.00007-2>
- Sistema Unico de Información de Servicios públicos domiciliarios (2020). Recuperado de <http://www.sui.gov.co/web/>
- Soriano, P. (2014). *Planta demostración de depuración de aguas residuales con microalgas.*
- Umamaheswari, J., & Shanthakumar, S. (2019). Phycoremediation of paddy-soaked wastewater by indigenous microalgae in open and closed culture system. *Journal of Environmental Management*, 243(March), 435–443. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2019.05.023>

- Villacrez, H. (2018). *Eficacia de un coagulante a base de aloe vera para el tratamiento primario de aguas residuales domésticas*. Moyobamba, 2018.
- Viswanaathan, S., & Sudhakar, M. P. (2019). Microalgae: Potential agents for co2 mitigation and bioremediation of wastewaters. In *New and Future Developments in Microbial Biotechnology and Bioengineering: Microbes in Soil, Crop and Environmental Sustainability*. Elsevier B.V. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-818258-1.00008-X>
- Wu, Y. H., Hu, H. Y., Yu, Y., Zhang, T. Y., Zhu, S. F., Zhuang, L. L., Zhang, X., & Lu, Y. (2014). Microalgal species for sustainable biomass/lipid production using wastewater as resource: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 33, 675–688. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.02.026>
- Yousuf, A. (2020). Fundamentals of Microalgae Cultivation. In *Microalgae Cultivation for Biofuels Production*. Elsevier Inc. <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-817536-1.00001-1>
- Zhuang, L. L., Li, M., & Hao Ngo, H. (2020). Non-suspended microalgae cultivation for wastewater refinery and biomass production. *Bioresource Technology*, 308, 123320. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2020.123320>

9.ANEXOS

Anexo I

Composición bioquímica de metabolitos primarios y porcentajes de remoción de nutrientes en ARD utilizando microalgas.

Microalga	Etapas de tratamiento	N (mg/L)	%Remoción	P (mg/L)	%Remoción	%Carbohidratos	%Lípidos	%Proteína	Referencia
<i>Tetradasmus obliquus</i>	Después de la eliminación de sólidos suspendidos	2.9	93.2	0.02	99	60	15	15	(Ma et al., 2020)
<i>Desmodesmus communis</i>	Efluente primario	0	100	0	100	58.8	4.9	16.9	(Samorì et al., 2013)
<i>Scenedesmus</i> sp	Efluente de la laguna de estabilización	11.4	70.9	0.11	98.9	18.1	13.4	26.4	(Diniz et al., 2017)
<i>Desmodesmus</i> sp	Efluente de la laguna de estabilización	11.8	67.5	0.38	95.5	15.9	8.3	25.8	(Diniz et al., 2017)