

Uso de lagunas algales de alta tasa para tratamiento de aguas residuales

Using high rate algal ponds
for wastewater treatment

Víctor Alfonso Cerón Hernández*

Universidad del Valle – Instituto Cinara Cali (Colombia)

Carlos Arturo Madera Parra**

Universidad del Valle, Cali (Colombia)

Miguel Peña Varón***

Universidad del Valle – Instituto Cinara Cali (Colombia)

* Biólogo, M.Sc. en Ingeniería Sanitaria y Ambiental. victor.a.ceron@correounivalle.edu.co

** Profesor, Ph. D., escuela EIDENAR – Facultad de Ingeniería.
carlos.a.madera@correounivalle.edu.co

*** Profesor titular de Ciencias Ambientales e Ingeniería, Facultad de Ingeniería. M. Sc., Ph.D. miguel.pena@correounivalle.edu.co

Correspondencia: Víctor Alfonso Cerón Hernández. (572) 3392345-Calle 13 # 100-00 Edificio 341, Segundo piso - AA 25157. Universidad del Valle, Cali.

Resumen

Se han propuesto muchos sistemas para la descontaminación de las aguas residuales domésticas, industriales y lixiviados. Actualmente se espera tratar las aguas residuales y derivar un beneficio económico-ambiental. Es en este contexto que los sistemas algales de alta tasa se propusieron inicialmente para el tratamiento de aguas residuales domésticas. Sin embargo, la investigación realizada alrededor de esta tecnología ha mostrado ventajas y beneficios que no se tenían contemplados inicialmente. En la actualidad se están realizando implementaciones en el tratamiento de las aguas residuales, buscando la producción de biocombustibles, biomasa algal para alimento (animal y humano), la obtención de productos farmacéuticos y la bioprospección de las algas. Adicional a esto, se está investigando sobre la captura y reducción del dióxido de carbono (CO₂) atmosférico, mecanismos de eliminación de contaminantes específicos y la optimización de la hidrobiología del sistema. Sin embargo, hace falta información sobre la función y la ecología de las algas y la relación alga/bacteria, efecto del comportamiento hidrodinámico de la laguna sobre la producción algal, el efecto de las variables ambientales del trópico en el desempeño del sistema y el desarrollo de criterios de diseño para zonas tropicales.

Palabras clave: aguas residuales, fotosíntesis, lagunas algales de alta tasa, microalga, tratamiento de aguas residuales.

Abstract

Many systems have been proposed for the decontamination of domestic and industrial wastewater and leachates. It is currently expected to treat wastewater and derive economic and environmental benefit. It is in this context that high rate algal systems (HRAPs) were originally proposed for the treatment of domestic wastewater. However, the research around this technology has shown advantages and benefits that were not initially contemplated. Actually, deployments are being made for the treatment of wastewater, seeking the production of biofuels, algal biomass for food (animal and human), obtaining pharmaceuticals and bioprospecting of algae. In addition to this, research on the capture and reduction of carbon dioxide (CO₂), specific mechanisms for pollutant removal and Hydrobiology optimization of the system is being done. However, there is a lack of necessary information about the function and ecology of algae, the relationship algae/bacteria, the effect of hydrodynamic performance of the pond on algal production, the effect of the tropical environmental variables on the performance of the system and the developing of design standards for tropical zones.

Keywords: high-rate algal pond, microalgae, photosynthesis, wastewater, wastewater treatment.

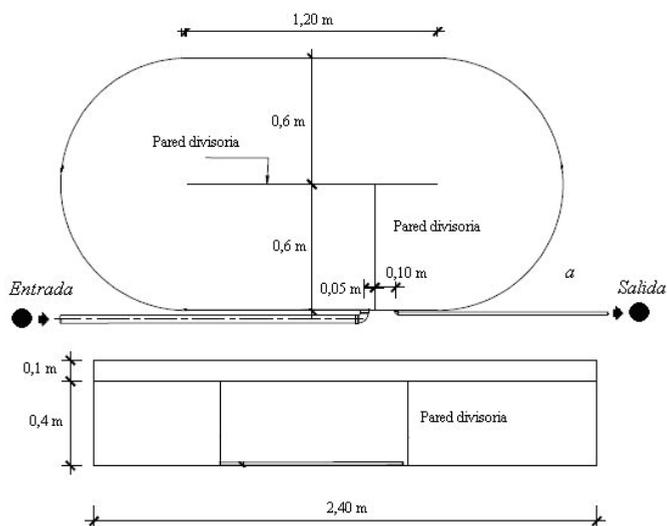
Fecha de recepción: 27 de mayo de 2013
Fecha de aceptación: 31 de octubre de 2014

INTRODUCCIÓN

Las microalgas se encuentran en los sistemas naturales de tratamiento de aguas residuales municipales, agropecuarias e industriales, generando a través de la fotosíntesis un suplemento de oxígeno para los microorganismos heterótrofos que degradan los residuos orgánicos [1]. Así mismo, los compuestos inorgánicos son controlados por varios procesos como la fotólisis y la sorción, entre otros [2], [3]. Con base en este concepto se diseñaron en un principio las lagunas algales de oxidación y estabilización [4]. Posteriormente, el profesor William J. Oswald y su grupo en la Universidad de California en Berkeley desarrollaron el concepto de laguna algal de alta tasa (HRAP, en inglés), para el tratamiento del material orgánico presente en el agua y obtener una producción de algas para alimentación animal [5]-[7].

La implementación de esta clase de sistemas algales de alta tasa se generalizó en los años setenta en países como Israel, India, Tailandia y, posteriormente, fue retomada en los Estados Unidos de Norteamérica. El papel de las algas en el tratamiento de aguas residuales empezó a investigarse en Texas y California después de la Segunda Guerra Mundial, al implementar sistemas de este tipo para pequeñas comunidades rurales, debido a su simplicidad en el funcionamiento en comparación con tecnologías como lodos activados [8]. En ese momento era una tecnología muy prometedora para el crecimiento algal, pues los nutrientes y la fuente de carbono eran proporcionados por las aguas residuales, mientras que los gastos de construcción y operación del sistema se compensaban con los beneficios del tratamiento y recuperación de las aguas [9]. Un beneficio derivado es la producción de biomasa [4], ya que si se compara con fotobiorreactores (que presentan altas tasa de producción), la producción de biomasa algal en HRAP puede ser equiparable [10].

Además de ser lagunas con una configuración simple y de bajo costo, las HRAP (figura 1) pueden tratar efluentes variables en calidad, de bajo contenido de materia orgánica y nutrientes, eliminar patógenos y producir biomasa, que, al ser cosechada, podría ser empleada como fertilizante, alimento (animal como humano) o para generar biocombustibles [11], [12]. El objetivo de este trabajo es describir los usos e implementaciones que tienen las lagunas algales de alta tasa para el tratamiento de diferentes contaminantes.



Fuente: elaboración propia

Figura 1. Esquema general de una laguna algal de alta tasa típica.

METODOLOGÍA

Para la elaboración de este artículo, se realizó una búsqueda y revisión bibliográfica en las siguientes bases de datos multidisciplinarias: Sciedirect, Springer Link, Ebscohost, Scirus, Jstor, Annual Reviews y Redalyc. Para la búsqueda de información se utilizaron palabras clave en inglés, como: *high rate pond algae*, *innovation pond*, *algae*, *raceway* y *photosynthesis*. Paralelamente, para un manejo adecuado, la información se clasificó según fecha y autores, evitando descargar el mismo artículo dos veces. Se utilizaron los siguientes criterios para la selección de los artículos: año de publicación, pertinencia del tema, región de investigación y aplicabilidad.

PRINCIPALES CARACTERÍSTICAS Y FUNCIONAMIENTO

Las HRAP se clasifican como sistemas de alta tasa debido a la mejora en el rendimiento de la biomasa algal y la capacidad de tratamiento de aguas residuales, en comparación con sistemas de lagunas de estabilización [13], [14], ya que su tiempo de retención celular es mucho mayor que el tiempo

de retención hidráulico. Las principales características de estos sistemas se resumen en la tabla 1.

Tabla 1. Principales características de las lagunas algales de alta tasa

Característica	Unidad	Referencia
Profundidad	0,2-1 m	[15],[16]
Largo	2-3 m	[14],[17]
Forma	Abierta y circular	[12], [18]
Tipo de mezcla	Mezcla completa continua	[13]
Tiempo de residencia hidráulico	2-8 días	[12], [18]
Tiempo de residencia celular	4-13 días	[19],[12]
Implementación-usos	Aguas residuales municipales, industriales y agrícolas	[20]
Energía	Luz solar	[17]

Este sistema se ve afectado por el ritmo diurno, ya que su funcionamiento está sujeto a la actividad fotosintética de las algas en la mezcla y en la columna de agua, lo cual genera variaciones en la concentración de oxígeno disuelto (OD) y el pH durante el día [8]. Al mediodía puede fácilmente sobrepasar los 20 mg/L⁻¹ de OD y el pH alrededor de 9. En la noche, estos parámetros pueden alcanzar valores bajos, y llegar a presentarse períodos anóxicos [12], [21]. Sin embargo, el rendimiento del sistema depende del proceso de mezcla, el cual está determinado por las propiedades hidrodinámicas, como la velocidad de circulación, la presencia de zonas muertas y el rozamiento del agua con las paredes del sistema, que a su vez son influenciadas por la geometría de la laguna [22].

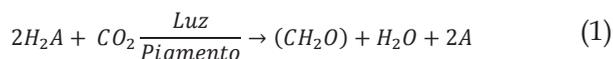
Estas variaciones son intrínsecas del sistema y son las que afectan el tratamiento durante el día. Aun así durante la noche, la superficie sufre un proceso de reaireación mediante la difusión entre la atmósfera y la columna de agua, pero éste no es suficiente para proveer la demanda de oxígeno para una respiración aeróbica, lo que da lugar a un tratamiento pobre en términos de eliminación de materia orgánica que llega a una sobrecarga temporal del sistema [8]. Por otro lado, cuando el pH se reduce durante la noche, se puede reducir la eliminación del nitrógeno y el fósforo, ya que se afectan los procesos de volatilización y la precipitación relacionados con el pH [23], aunque la ruta de eliminación del nitrógeno se encuentra en discusión.

El funcionamiento de las HRAP se basa principalmente en la oxidación de la materia orgánica mediante la oxigenación fotosintética proporcionada por las microalgas presentes en el sistema, las cuales son impulsadas por la energía solar y el CO_2 disuelto en el agua, derivado principalmente de la mineralización de la materia orgánica llevado a cabo por la comunidad bacteriana presente [24], [25]. Las algas posteriormente liberan oxígeno mediante el proceso de fotosíntesis, el cual es utilizado por las bacterias, que también mineralizan nutrientes como nitrógeno y fósforo, aunque también se produce asimilación de la biomasa microalgal [26], con lo que se consigue un buen proceso de reciclaje de nutrientes [24], [27].

Teniendo en cuenta la termodinámica de estos sistemas, se estima que cerca de 300 unidades bacterianas se necesitan para suplir el carbono necesario en forma de dióxido de carbono (CO_2) por unidad algal, esta cifra hace referencia a condiciones ideales. Sin embargo, en condiciones prácticas, la relación alga/bacteria es de aproximadamente 1:250, y una fuente alternativa de CO_2 tiene que considerarse para mantener el sistema termodinámicamente en equilibrio. No obstante, Oron *et al.* [24] reportaron que, para condiciones favorables de explotación de algas con alta productividad, la relación alga/bacteria en HRAP puede estar en el orden de 1:100 o incluso superiores, y que esta relación puede ser un criterio de funcionamiento de la laguna, el cual puede ser utilizado como guía para generar cambios necesarios para aumentar el crecimiento de algas y mejorar la calidad del efluente o su productividad.

Fijación de CO_2

La fotosíntesis es un proceso fundamental que tiene lugar en las HRAP, ya que las algas al igual que las plantas verdes reducen, a expensas del agua y con la energía solar absorbida por los pigmentos clorofílicos [28], sustratos oxidados como el CO_2 , molécula de la cual obtienen el carbono. La reacción general que describe este proceso es [29], [30]:



Donde CH_2O simboliza un hidrato de carbono; así pues, durante la asimilación del anhídrido de carbono, la intensidad de la fotosíntesis depende de la radiación solar [31], [32].

Sin embargo, la disolución natural del CO_2 del aire en la matriz de agua puede alcanzar $0,10 \text{ g/L}^{-1} \text{ H}_2\text{O}$ [29], lo cual no es suficiente para satisfacer los requerimientos que pueden estar en el orden de $4,0 \text{ g/L}^{-1} \text{ día}^{-1}$ de CO_2 en las HRAP, aunque sólo sea necesario durante el día, ya que en la noche las algas respiran produciendo CO_2 . Por tal razón, se ha sugerido la inyección de aire en horas del día. Sin embargo, se ha estimado que en el aire hay $0,0383\%$ de CO_2 , por lo que se necesitaría todo el CO_2 disponible en $37,000 \text{ m}^3$ de aire para conseguir una alta productividad de algas [33], [34], que puede estar alrededor de $30 \text{ g/m}^2\text{d}^{-1}$ de biomasa algal (peso seco) [35].

Las algas ante el déficit de CO_2 en la matriz agua utilizan bajo condiciones fototróficas el CO_2 atmosférico como fuente de carbono para sintetizar compuestos orgánicos [36]. No obstante, existen varios problemas con este método de cultivo de algas: la limitación de CO_2 es uno de ellos, ya que es un gas atmosférico de baja proporción en la atmósfera, menos de 400 ppm. Otra limitante es la suspensión del cultivo de algas, que es superficial en las lagunas (15-30 cm) y disminuye la productividad del sistema, asociada también a la baja tasa de transferencia del CO_2 a la matriz agua [37]. Por su parte, en las HRAP se estima que pueden obtener sólo el 5% de sus necesidades de carbono de la atmósfera [29], lo cual limita su implementación cuando no se cuenta con un sistema de inyección de CO_2 .

Sin embargo, Weissman y Tillett [38] reportaron que la captura de CO_2 en sistemas lagunares de gran escala, bajo óptimas condiciones de operación, puede ser de hasta un 99%. Este valor se podría alcanzar con una adecuada solubilidad de CO_2 en el agua [29]. Hasta el momento se ha propuesto la implementación de un sistema de difusión, modificando un tubo Venturi, lo que mejoraría la solubilidad del mismo en lagunas de cultivo a cielo abierto [39].

Fotosistemas y pigmentos

Durante la fotosíntesis, la energía lumínica (energía solar por lo general) se convierte en energía química [40], [41], mientras que el CO_2 es capturado (ecuación 1) [41]. Sin embargo, la saturación fotosintética es del 25% de la intensidad de luz solar, debido a la lenta transferencia de electrones y el procesos de fijación de CO_2 [42]. Esta reacción es llevada a cabo en los fotosistemas I y II de las algas eucariotas y en las cianobacterias [43]. Estos fotosistemas son un complejo proteico transmembranal de múltiples

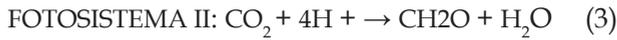
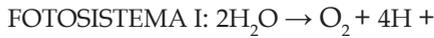
subunidades cuya complejidad depende del organismo. Estos organelos poseen moléculas de clorofila las cuales absorben la luz en forma de radiación que viaja a una velocidad de $c \sim 3 \times 10^8 \text{ m/s}^{-1}$. Sin embargo, las algas toman la región del espectro de luz visible que va desde 380 nm a cerca de 750 nm (el rango de luz visible se expresa en $\text{nm} = 10^{-9} \text{ m}$), es decir, del azul oscuro al rojo, respectivamente [42], [44], [45]. De este espectro de luz visible, se refleja el verde (450-495 nm), debido a que poseen grandes sistemas de dobles enlaces conjugados. De forma similar, muchas algas y bacterias fotosintéticas pueden absorber otros espectros de la luz como el rojo, marrón y púrpura [31], debido a otros pigmentos además de la clorofila *a*, los cuales absorben principalmente el azul-verde (450-475 nm) y el rojo (630-675 nm), como es el caso de la clorofila *b* y *c*, que extienden el rango de absorción de la luz [45], [46].

Adicional a las diferentes clases de clorofila, las algas presentan otros pigmentos llamados *accesorios* [43]. Los carotenoides son un grupo de pigmentos biológicos llamados *Cromóforos*, con una absorción de luz entre los 400 y 550 nm (e.g. α -caroteno, β -caroteno y astaxantina). Otro pigmento accesorio que ayuda en la captura de luz son las xantofilas como luteína, violaxantina, zeaxantina, fucoxantina, entre otros que se encuentran en menor proporción [45], pero incrementan la capacidad de absorción de la luz y protegen los fotosistemas contra daños, especialmente en condiciones de alta intensidad de luz o ultravioleta [46].

Para las algas fotosintéticas, utilizar la luz solar les permite generar energía química libre, que es almacenada en los enlaces de las moléculas de ATP y NADPH, los cuales obtienen el electrón del agua, que es un donador inorgánico (2); esto ocurre en la fase catabólica de la fotosíntesis. En la fase anabólica, por su parte, el ATP y NADPH son utilizados en la síntesis de hidratos de carbono y otros compuestos orgánicos a partir de CO_2 y H_2O [41], [45].



Sin embargo, no sólo se generan moléculas energéticas en la fotosíntesis, pues es sólo una parte del proceso. La ecuación 3 muestra un resumen del proceso que ocurre en los dos fotosistemas que se encuentran en las células algales y en las cianobacterias [20].



En una laguna algal, el arranque del sistema, es decir, el tiempo que necesitan las poblaciones algales en aclimatarse al nuevo ambiente, requiere de un periodo de fotoaclimatación en donde los organismos responden a la cantidad de luz disponible mediante la variación de su pigmento contenido en el cloroplasto; estos cambios se pueden dar por dos estrategias: la primera hace alusión a un cambio en la cantidad de fuente alimenticia, sin ningún tipo de alteración en el número de cloroplastos (o unidad fotosintética) [47]. La segunda alternativa podría ser un cambio en el número de cloroplastos sin alterar su tamaño [48]. Ambas estrategias se encuentran en diversas clases de algas analizadas hasta ahora [49]. Por ejemplo, en *Dunaliella tertiolecta* y *Skeletonema costatum* se estableció su respuesta de aclimatación, en la que respondían diferencialmente a los cambios de luz y de nutrientes (los cambios se vieron en el tamaño del complejo antena de los fotosistemas frente a cambios en el número de centros de reacción, que se encuentran en el cloroplasto) [50]. Sin embargo, no se conoce en qué circunstancias las microalgas eligen una de las dos alternativas.

Todas estas estrategias se han establecido en estudios de poblaciones microalgales aisladas en cultivos axénicos [51], ya que a diferencia de las plantas presentan un ritmo de crecimiento rápido y pueden ser manipuladas fácilmente. Por ejemplo, en especies del género *Chlorella* se han podido establecer los principales mecanismos en la fotosíntesis, como la oxidación del agua [52]; transiciones de estado, como cambios en la capacidad de absorción de la luz de cada fotosistema (*C. pyrenoidosa*) [53]; y cloro-respiración (una actividad respiratoria que tiene lugar en el cloroplasto; *C. sorokiniana*) [54]. Todas estas variaciones se dan por la regulación del transporte de electrones en la fotosíntesis, que tiene lugar en la célula cuando se equilibra la generación de ATP y NADPH (moléculas energéticas) como respuesta a estímulos ambientales, de los cuales el más crítico es la intensidad de luz y la disponibilidad de nutrientes, incluyendo el CO_2 como fuente de carbono [51].

PARÁMETROS AMBIENTALES

Energía lumínica

La luz es una de las principales condicionantes del funcionamiento general del sistema, al proporcionar toda la energía necesaria para que la comunidad microalgal pueda realizar la fotosíntesis [20]. Un aumento de la radiación solar directa afecta a las microalgas presentes en el medio, hasta el extremo de alcanzar el punto de compensación de luz y en otros casos la fotoinhibición [45], que puede afectar negativamente los receptores de luz de las algas y producir una disminución en la tasa de fotosíntesis y la productividad. Sin embargo, en los sistemas abiertos como las HRAP, la mezcla y el crecimiento en densidad influyen en la distribución de la radiación de una manera uniforme a todas las células, y disminuyen la ocurrencia de la fotoinhibición en el sistema [20], [55]. Este efecto de sombreado creado por la biomasa algal hace que en los primeros 0,15 m (generalmente se construyen a una profundidad de 0,3 m) de las HRAP no penetre la luz disponible (PAR), dejando el resto del estanque en oscuridad. Sin embargo, los flujos turbulentos, resultantes del flujo de agua alrededor de la laguna y de rueda de paletas de mezclado (o burbujeo artificial), proporcionan un grado de mezcla vertical a través de la profundidad del estanque y aseguran que la biomasa algal esté expuesta a luz [20]. Como ejemplo del efecto de sombra que produce el incremento de la densidad algal, la tabla 2 muestra la penetración de la luz en un cultivo de *Nannochloropsis* sp., en donde la penetración de los diferentes espectros de luz visible disminuyen con el aumento de la biomasa.

Tabla 2. Profundidad* de penetración de la Luz (cm) en cultivos de *Nannochloropsis* sp. afectada por la concentración celular

Long. de onda	Peso seco (g l ⁻¹)			Penetración de la luz (cm)
	2	10	50	
Azul (410-450 nm)	0,960115	0,192023	0,038405	
Verde (580-600 nm)	9,433679	1,886736	0,377347	
Rojo (670-678 nm)	1,252403	0,250481	0,050096	

*Para la profundidad en la que la energía luminosa es del 10% de la luz incidente. Tomado y modificado de [55].

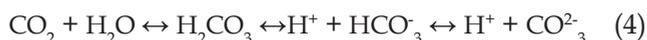
Temperatura

La temperatura del agua afecta la química y las reacciones biológica de los organismos acuáticos. En algunas ocasiones, temperaturas altas puede aumentar la densidad de especies planctónicas y hongos indeseables. Puede afectar diversos parámetros fisicoquímicos como el pH, conductividad eléctrica, el nivel de saturación o la solubilidad de los gases, y diversas formas de alcalinidad, entre otros [56]. Así mismo, puede influenciar la composición de especies algales, las cuales responden a la variación de otros parámetros fisicoquímicos [57].

La producción de algas se ve influenciada por altas temperaturas, hasta alcanzar una temperatura óptima a la cual las algas presentan una tasa fotosintética adecuada, donde se evita la respiración y/o fotorrespiración algal, que ocurre en altas temperaturas ($> 38\text{ }^{\circ}\text{C}$) y reduce la productividad global [58], [59]. La temperatura óptima para cultivos de microalgas es generalmente entre 20 y $24\text{ }^{\circ}\text{C}$, aunque puede variar con la composición del medio de cultivo, las especies o la cepa cultivada. Se ha planteado que entre 16 y $27\text{ }^{\circ}\text{C}$ se cultivan la mayoría de las especies. Temperaturas inferiores a $16\text{ }^{\circ}\text{C}$ retrasan el crecimiento, mientras que temperaturas superiores a $35\text{ }^{\circ}\text{C}$ son letales para una serie de especies [60]; en algunas ocasiones, también puede alterar el equilibrio iónico del agua (pH) y la solubilidad del gas (oxígeno y CO_2). Sin embargo, las diferentes especies de algas pueden responder a estos cambios en diferentes grados [61].

pH

El pH del agua afecta muchos de los procesos bioquímicos que se encuentran asociados al crecimiento de las algas presentes en esta clase de sistemas, incluyendo la biodisponibilidad de CO_2 para la fotosíntesis, la disponibilidad y asimilación de nutrientes en forma de iones. Éste, a su vez, es controlado por el sistema carbonato que, en equilibrio con los iones de hidrógeno e hidroxilo, interacciona con el dióxido de carbono tal como se describe en la ecuación 4 [62]:



Así mismo, pueden afectar la productividad de las algas, la respiración de algas y bacterias, la alcalinidad, la composición iónica del medio, la actividad de autótrofos y heterótrofos (por ejemplo, nitrificación y desnitrificación) y la eficiencia, si existe sistema de adición de CO₂ [12], [63], [64]. Por tales motivos, se debe tener en cuenta que si existe un dispositivo de adición de CO₂, el control del pH es una variable importante en la operación del sistema [65]. Se ha establecido que el pH óptimo en agua dulce es de 8 [66]. Sin embargo, con este valor podría disminuir la productividad algal al inhibir el crecimiento [20]. Aunque algunas especies de algas de los géneros *Amphora* sp. y *Ankistrodesmus* sp. no son inhibidas a pH mayores a 8 [67], así como algunas especies de *Chlamydomonas* sp. [68].

Oxígeno disuelto

Como se trata de sistemas de alta tasa fotosintética, la saturación de oxígeno disuelto en el día puede llegar a niveles superiores al 200% y alcanzar concentraciones hasta de 20 g/m³ [11], [69]. Estos niveles de oxígeno disuelto pueden afectar la productividad de las algas así como promover la oxidación bacteriana, y afectar en ocasiones el tratamiento de las aguas residuales [59], [69]. No obstante, se necesitan realizar más investigaciones de las HRAP para determinar el efecto del oxígeno disuelto sobre la productividad y tratamiento de las aguas residuales [20].

Nutrientes

Los nutrientes requeridos para el crecimiento de las algas en las HRAP son las distintas formas de nitrógeno, por ende es un nutriente crítico que puede regular el contenido de lípidos en las células algales [70]. En muchos casos se utilizan medios de cultivo para favorecer el crecimiento de estos organismos, lo que los hace financieramente insostenibles. Por ejemplo, en 2012 Ashokkumar y Rengasamy estimaron el costo del medio para el crecimiento implementado en el cultivo de *Botryococcus braunii* en USD 63.000 ha⁻¹ año⁻¹. Así mismo, estimaron el costo de los medios de cultivo requeridos para producir 1 tonelada de biomasa de algas en estanques abiertos en USD 1.228. Este análisis demuestra que el costo para el medio de crecimiento de *B. braunii* es demasiado alto para una implementación a escala industrial [71], por tal motivo futuras investigaciones se deben dirigir a reducir el suplemento de nutrientes. Hasta el momento se ha planteado

utilizar diferentes tipos de residuos, como aguas municipales, que son ricas en nutrientes orgánicos e inorgánicos [72], [73].

Para el caso de las HRAP, se presenta una buena eliminación de nutrientes a comparación con sistemas convencionales de tratamiento de aguas residuales [8], [63]. Park y Craggs en el 2011 mostraron que en HRAP con adición de CO₂ se logra una eliminación del nitrógeno total y amoniacal de hasta el 69,1% y 84,5%, respectivamente. Adicionalmente, se consiguen altas producciones de biomasa algal del 80,5%; por lo tanto, el crecimiento algal y la actividad fotosintética pueden tener una gran influencia en la eficiencia de eliminación de nitrógeno presente en el agua a tratar [63].

ALGAS PRESENTES EN SISTEMAS ALGALES DE ALTA TASA

Las HRAP presentan condiciones particulares para el crecimiento de estos organismos, los cuales pueden ser utilizados en el tratamiento de aguas residuales. Entre estas características están: 1) alta tasa de crecimiento (mayor productividad) cuando las aguas residuales contienen altos contenidos de nutrientes, preferiblemente nitrógeno amoniacal y fosfato (N y P), que pueden estar entre 56-800 mg/L⁻¹ [15], [74] y 0,02 y 2,00 mg/L⁻¹ [75], respectivamente. 2) Tolerancia a variaciones estacionales (invierno, verano, otoño y primavera) y diurnas (día y noche) en condiciones al aire libre, especialmente en cambios de la temperatura y radiación solar. Y 3) forman en ocasiones agregados que facilitan su cosecha a través de procesos físicos (sedimentación) [20]. Sin embargo, la predominancia de algunas especies de algas en las HRAP puede estar determinada por factores ambientales tales como la temperatura, la luz (natural o artificial) y factores operacionales como el pH, composición y concentración de nutrientes y el tiempo de retención hidráulica, y parámetros biológicos como la adaptación en la presiembra, depredadores y parásitos [16].

No obstante, se pueden encontrar algunas especies de los géneros de algas, como *Desmodesmus* sp., *Micractinium* sp. [11], *Actinastrum* sp., *Pediastrum* sp. [76], *Dictyosphaerium* sp. y *Coelastrum* sp. [77], que suelen formar grandes colonias que sedimentan fácilmente (diámetro: 50-200 μm), lo que permite una rentable y sencilla cosecha de la biomasa por gravedad [20], [35], [64], [78]. Park y Craggs [69] reportan que los organismos dominantes al evaluar un sistema algal de alta tasa durante 5 meses fueron colonias de *Scenedesmus*

sp., *Microactinium* sp. y *Pediastrum* sp., y pocas células observadas de *Ankistrodesmus* sp., las cuales formaron bioflóculos de gran tamaño (diámetro: >500 μ m) cuando se aplicaba CO_2 , permitiendo que se depositaran rápidamente en conos de cosechado cuando el sistema tenía un tiempo de retención de 12 horas aproximadamente, lo que sugiere que si se promueve el crecimiento de determinadas especies de algas que presenten estas características de alta sedimentabilidad (organismo coloniales y de agregación alga/bacteria), se podría aumentar la eficiencia de cosecha de algas en el efluente. Un buen ejemplo de esto es la Cianobacteria *Spirulina* sp., que presenta una forma natural en espiral (20–100 mm longitud) y es relativamente rentable y energéticamente eficiente su cosecha por el método de microfiltración [10]. Así mismo, Nurdoga y Oswald [79] reportaron que géneros de algas flageladas como *Euglena*, *Lepocinclis* y *Chlamydomonas* fueron dominantes en asociación con *Microactinium*. Otro género de microalga utilizada tanto en fotobiorreactores como en sistemas de tratamiento de aguas residuales es *Chlorella* sp., el cual presenta eficiencias en la producción de metabolitos secundarios y tratamiento de afluentes contaminados [57], [80].

Por otro lado, la diversidad de microalgas que existe en esta clase de lagunas tiene dos ventajas ecológicas importantes, en comparación con fotobiorreactores que generalmente emplean una o dos especies de microalgas: 1) la teoría ecológica de diversidad propone que los ecosistemas con varias especies pueden tener rendimientos en biomasa mucho mayores que sistemas con pocas especies. En este sentido, la estimación de la biomasa algal, al tener un mayor suministro de nutrientes y CO_2 , debe ser significativamente mayor cuando se presenta una riqueza de especies, a diferencia de sistemas pobres en riqueza de especies. 2) La posible complementariedad de recursos y asociaciones de la gran diversidad de microalgas es más eficiente que los sistemas con una sola especie de organismos, y mejora así el desempeño del reactor [81].

Sin embargo, el crecimiento de varios grupos de microorganismos como cianobacterias y algas en general puede conllevar a interacciones como competencia e inhibición, las cuales se dan por la explotación de recursos limitados [82]. En los entornos hipertróficos, como es el caso de las lagunas algales de alta tasa, se presenta la interacción interespecífica entre cianobacterias y algas verdes, en donde sustancias inhibitorias restringen la

captación de nutrientes en ambos sentidos, lo que limita su crecimiento y por ende su densidad [83], [84].

En consecuencia, es importante determinar hasta el grado de especie los organismos presentes en estos sistemas. Infortunadamente, existen limitaciones en los métodos tradicionales (taxonomía clásica), donde se presentan determinaciones sólo hasta el nivel de género o determinaciones erradas. Esta situación es común, teniendo en cuenta que hasta el momento existen 2.000 especies descritas de *Euglenas* y 1.000 sin determinar [85]. De *Chlamydomonas* existen más de 400 especies descritas [76].

Adicional a esto hay una deficiencia de profesionales (taxónomos) capacitados en este tipo de investigaciones. Actualmente, se está trabajando con métodos moleculares como DGGE (*Denaturing Gradient Gel Electrophoresis*), *primers* generales y específicos, secuenciación de genes, entre otras técnicas, para intentar obtener una aproximación específica de los organismos [76]. Sin embargo, sólo identifican organismos que concuerden con bases de datos ya establecidas, lo cual genera incertidumbre pues hay especies que no están reportadas en tales bases de datos.

IMPLEMENTACIONES - USOS

Las HRAP pasaron de ser sistemas de investigación a aplicarse como solución de problemas ambientales con alto impacto, debido a su versatilidad y adaptación a las circunstancias del problema. La tabla 3 muestra un resumen de los principales usos que ha tenido este sistema.

Tabla 3. Principales implementaciones de sistemas algales de alta tasa.

Tópico	Año	Sistemas implementados	Grupos algales	Referencia
Tratamiento de aguas residuales	1990-2012	Sistemas de algas para el tratamiento de diferentes afluentes de aguas residuales.	<i>Scenedesmus</i> sp., <i>Micractinium</i> sp., <i>Actinastrum</i> sp. y <i>Pediastrum</i> sp.	[12], [15], [18], [35], [63], [75],[86]
Producción de biocombustibles	2009-2013	Implementación de sistemas algales para la producción de biocombustibles	<i>Chlorella vulgaris</i> , <i>Spirulina</i> sp. y <i>Coelastrum</i> sp.	[11], [20], [33], [35], [57], [70], [74]
Tratamientos de lixiviados	2011	Sistema anaerobio-laguna algal de alta tasa	<i>Scenedesmus quadricauda</i> , <i>Euglena gracilis</i> , <i>Chlorella vulgaris</i> , <i>Ankistrodesmus convolutus</i> y <i>Chlorococcum oviforme</i>	[87]
Eliminación de residuos de medicamentos	2012	Sistemas algales de alta tasa (tipo Bach)	<i>Chlorella vulgaris</i>	[88]
Cultivo y producción de biomasa algal	2010-2012	Cultivo de algas	<i>Botryococcus braunii</i> , <i>Spirulina platensis</i> , <i>Chlorella vulgaris</i> , otras especies	[71], [89–91]
Cultivo de algas con aguas residuales	2010-2012	Aprovechamiento de aguas residuales para el cultivo de algas en sistemas de alta tasa	<i>Scenedesmus</i> sp., <i>Micractinium</i> sp. y <i>Pediastrum</i> sp.	[11], [69], [74]
Modelación hidrodinámica	2012-2013	Modelación de sistemas algales de alta tasa	---	[17], [92]

Principales implementaciones de sistemas algales de alta tasa

Producción de biocombustibles

La producción en gran escala de biocombustibles a base de algas cultivadas en aguas residuales mediante la implementación de HRAP es una excelente alternativa [93], debido a que la alta biomasa de algas producida luego de ser cosechada puede ser aprovechada a través de diversas vías para la producción de biocombustibles, por ejemplo: digestión anaeróbica para el biogás, transesterificación de los lípidos para el biodiésel [14], [20], [94] y fermentación de hidratos de carbono para el bioetanol [20], [35].

Actualmente, se consideran las HRAP como un sistema de tratamiento de aguas residuales, que representan una alternativa de bajo costo y viable

para producir biomasa algal, con la cual se podrían obtener biocombustibles con un mínimo impacto ambiental; aunque la optimización del proceso de cosecha algal requiere una mejor comprensión de la influencia de parámetros como la adición de CO_2 , control de las especies de predadoras y parasíticas y la biofloculación natural, que son poco estudiados en las HRAP. Para futuras investigaciones, tanto a nivel laboratorio y piloto es fundamental la optimización del rendimiento en la cosecha algal, mejorar la viabilidad económica y la aplicación a gran escala, ya sea para producción de biocombustibles o tratamiento de aguas residuales [20].

Craggs *et al.* [11] construyeron un sistema a gran escala que consistía en cuatro HRAP de 1,25 hectáreas en total, ubicadas en el sitio donde existía una laguna convencional. Este sistema proporcionó un tratamiento similar en rendimiento y productividad de algas/bacterias al construido a escala piloto por Park *et al.* [20], [63], [69], [74], [78] sin la adición de CO_2 , con una media anual de tratamiento de las aguas de $\sim 50\%$ de eliminación de la DBO_5 , $\sim 87\%$ en la f- DBO_5 , $\sim 65\%$ de $\text{NH}_4^+\text{-N}$, $\sim 19\%$ en el PO_4^{3-} reactivo disuelto y ~ 2 log. de eliminación de *Escherichia coli*.

Estos resultados indican que se pueden aplicar esta clase de sistemas y lograr un uso eficiente en la energía y un tratamiento adecuado de las aguas residuales. Adicionalmente, se tiene la posibilidad de utilizar la biomasa algal para la conversión a biocombustibles y proporcionar una fuente de energía para comunidades locales. Sin embargo, se estima que una producción de 0,12 L de biodiésel/kg de biomasa algal sería un valor razonable como objetivo a corto plazo, teniendo en cuenta que se trata de aguas residuales [35].

No solamente la obtención de biocombustibles es una ventaja de sistemas abiertos de cultivo, sino también otros subproductos de estos organismos. Stepan *et al.* [29] obtuvieron cultivos de *Monoraphidium* y *Nannochloropsis* en la Universidad de Hawaii, con un alto contenido de lípidos, 26%, lo cual es normal para las algas, mientras las proteínas representaron el 41% de la masa total y los hidratos de carbono, el 33%, que bien se podrían utilizar para la elaboración de alimento animal por su alto contenido de proteína.

Tratamientos de aguas residuales

Las HRAP son implementadas para tratar efluentes que ya pasaron por un tratamiento previo. Esta estrategia presenta varias ventajas: 1) pueden asimilar cantidades significativas de nutrientes orgánicos e inorgánicos disueltos, por lo general con una preferencia por NH_4^+ [75], 2) altas eficiencias en eliminación de contaminantes [69], 3) alta productividad de biomasa [78] y 4) puede ser utilizada para tratar diferentes efluentes, ya sean de agua dulce o salada [27], [75], en esta última se utilizan generalmente macroalgas como *Ulva*, *Enteromorpha* y *Cladophora*.

Aguirre *et al.* [15] reportaron el uso de HRAP para tratar efluentes de criaderos de cerdos, donde se alcanzó una eliminación de la demanda química de oxígeno (DQO) mayor al 90%, manejando una carga orgánica $20 \text{ g O}_2 \text{ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ y una carga hidráulica de $10 \text{ L m}^{-2} \text{ d}^{-1}$. Sin embargo, las algas presentes en el sistema pueden mantener la capacidad de eliminación del nitrógeno cuando se tienen cargas menores a $2,5 \text{ gNH}_4^+ \text{ -N m}^{-2} \text{ d}^{-1}$; a cargas mayores, el nitrógeno se acumula y limita el desempeño de la laguna. Sin embargo, un adecuado sistema de cosecha algal podría ayudar a mitigar este impacto [12]. Hamouri *et al.* [95] utilizaron este sistema para tratar aguas residuales y encontraron eficiencias de eliminación de demanda biológica de oxígeno, nitrógeno (N-NH_4^+) y P-PO_4^{3-} de 88, 69 y 52%, respectivamente. También la eliminación de las coliformes fecales, *Salmonella* sp. y una completa eliminación de huevos de helmintos, en particular de *Ascaris* sp. y *Trichuris* sp.

La asimilación del nutriente no es el único mecanismo de eliminación-transformación que interviene en estos sistemas, también se presenta la volatilización del amonio generada por los aumentos grandes del pH del agua, originados por la intensa actividad fotosintética durante el día [18], [21], [40], [63], [93], que alcanza valores de 9,5 o 10 en algunas ocasiones [12], [35], [93]. Por su parte, el fósforo se precipita con algunos cationes polivalentes como el hierro, calcio y el magnesio [96]. La capacidad mediante absorción del fósforo se produce en mayor proporción bajo limitación de éste, el cual es necesario para su crecimiento. Xu *et al.* [97] reportan eliminaciones de fósforo de $66 \pm 9\%$, con un máximo de $83 \pm 1\%$, utilizando un biorreactor de membrana a base de algas, el cual presenta un crecimiento de alta tasa. Reportan que el 90% del fósforo fue depositado sobre la superficie de la célula de alga (extracelular) y tan sólo un máximo de 8% se encontró dentro de la célula (intracelular).

Tratamiento de lixiviados

Mustafa *et al.* [87] reportan el primer uso de este tipo de lagunas algales de alta tasa para el tratamiento de lixiviados de rellenos sanitarios, como un tratamiento secundario de lixiviados de un relleno sanitario situado en Selangor, Malasia. Reportan un éxito en el tratamiento de lixiviados con estos sistemas. Si bien recomiendan un tratamiento previo para concentraciones altas de lixiviados, debido que el medio puede hacerse tóxico o inhibir el crecimiento de la biomasa algal. Aun así, se puede conseguir una buena reducción de DQO, $\text{NH}_4^+\text{-N}$ y $\text{PO}_4^-\text{-P}$, con un máximo de 98,73% para el $\text{NH}_4^+\text{-N}$ con estos sistemas de biorremediación.

Por otro lado, la bioacumulación de metales en las células algales es alta, lo que hace inadecuado el uso de la biomasa para biofertilizantes, aunque es posible utilizarlos como materia prima para biocombustibles [74]. Sin embargo, recientes estudios han mostrado que la biomasa inactiva (muerta) es más eficiente en la captura de metales que la activa (viva) [98]. Este tipo de biomasa presenta ventajas, como el bajo costo, alta eficiencia, la mínima generación de residuos tanto químicos o biológicos, regenerabilidad y la posible recuperación de metales por desorción [99], [100]. Por tales motivos, sistemas HRAP se han convertido en una tecnología adecuada para utilizar en combinación con sistemas de tratamiento primario (métodos físico-químicos) para el tratamiento de lixiviados [87].

Mecanismos de eliminación de metales pesados

Las microalgas pueden producir péptidos capaces de unirse a los metales, formar complejos organometálicos, en particiones dentro de las vacuolas para facilitar el control adecuado de la concentración de iones de metales pesados en el citoplasma, y así prevenir o neutralizar los efectos tóxicos potenciales que éstos presentan [101]. En relación con el tratamiento de metales, el diseño de las HRAP son mejores [5]: emplean la biomasa suspendida que comúnmente son algas verdes (*Chlorella*, *Scenedesmus*, *Cladophora*, entre otras), cianobacterias (*Spirulina*, *Oscillatoria*, *Anabaena*) o consorcios de ambas [101]. Lastimosamente, en zonas tropicales hay déficit de información al respecto, pues la mayoría de estos estudios son realizados en zonas con estaciones diferenciadas.

CONCLUSIONES

La implementación de sistemas algales de alta tasa en el tratamiento de aguas residuales en países tropicales podría tener excelentes beneficios económicos, al tratar los afluentes contaminados y al mismo tiempo aprovechar la biomasa algal generada.

Se desconocen los mecanismos y dinámica ecológica que gobiernan estos sistemas, especialmente en climas tropicales, ya que la mayoría de las implementaciones se han realizado en zonas con estacionalidad diferenciada.

Estos sistemas algales se han empleado principalmente en el tratamiento de aguas residuales, sin embargo, se pretende aplicar a otra clase de afluentes contaminados, como las aguas residuales industriales y lixiviados, con el fin de darles tratamiento y lograr la producción de biomasa algal.

Se ha establecido que los géneros principales de algas presente en estos sistemas son *Scenedesmus* sp., *Microactinium* sp., *Pediastrum* sp., *Ankistrodesmus* sp., *Euglenas* sp. y *Chlamydomonas* sp. No obstante, existe un gran desconocimiento de las especies que sobreviven y se ambientan en estos sistemas.

Cuando se implementan sistemas abiertos, se deben tener en cuenta todas las variables ambientales (pH, T, OD, luz solar disponible), biológicas (simbiosis alga/bacteria, depredadores, ciclo de vida) y físicas (viento, hidrodinámica) que pueden interferir con su dinámica. Por ende, conocer y entender la dinámica del sistema es fundamental para obtener una buena producción de biomasa o biocombustibles y un tratamiento apropiado a un afluente contaminado.

PERSPECTIVAS

Se necesita conocer la dinámica diurna en relación con la fisiología de las diferentes comunidades de algas que subsisten en este sistema a cielo abierto, lo que permitiría establecer cuáles son las variables de control a priorizar y, de esta manera, mejorar el proceso deseado.

REFERENCIAS

- [1] A. Abeliovich, "Water Pollution and Bioremediation by Microalgae. Water Purification: Algae i wastewater Oxidation Ponds," in *Microalgal Cultere Biotechnology and Applied Phycology*, A. Richmond, Ed. Blackwell Science, 2004, p. 566.
- [2] P. M. Bradley, L. B. Barber, F. H. Chapelle, J. L. Gray, D. W. Kolpin, and P. B. McMahon, "Biodegradation of 17beta-estradiol, estrone and testosterone in stream sediments.," *Environmental science & technology*, vol. 43, no. 6, pp. 1902-10, Mar. 2009.
- [3] J. H. Writer, L. B. Barber, J. N. Ryan, and P. M. Bradley, "Biodegradation and attenuation of steroidal hormones and alkylphenols by stream biofilms and sediments.," *Environmental science & technology*, vol. 45, no. 10, pp. 4370-6, May 2011.
- [4] R. Ferrera-cerrato, N. G. Rojas-avelizapa, H. M. Poggi-varaldo, A. Alarcón, and R. O. Cañizares-villanueva, "Procesos de biorremediación de suelo y agua contaminados por hidrocarburos del petróleo y otros compuestos orgánicos," *Rev Latinoam Microbiol*, vol. 48, no. 2, pp. 179-187, 2006.
- [5] W. J. Oswald, "Microalgae and wastewater treatment," in *Microalgal Biotechnology*, A. Borowitzka and L. Borowitzka, Eds. New York: Cambridge University Press., 1988, pp. 305-328.
- [6] W. J. Oswald, F. B. Green, and T. J. Lundquist, "Performance of methane fermentation pits in advanced integrated wastewater pond systems," *Water Science & Technology*, vol. 30, no. 12, pp. 287-295, 1994.
- [7] J. . Oswald and H. B. Gotaas, "Photosynthesis in sewage treatment," *Trans. Am. Soc. Civ. Eng.*, vol. 122, pp. 73-105, 1957.
- [8] J. García, B. F. Green, T. Lundquist, R. Mujeriego, M. Hernández-Mariné, and W. J. Oswald, "Long term diurnal variations in contaminant removal in high rate ponds treating urban wastewater," *Bioresource Technology*, vol. 97, no. 14, pp. 1709-1715, Sep. 2006.
- [9] L. Christenson and R. Sims, "Production and harvesting of microalgae for wastewater treatment, biofuels, and bioproducts.," *Biotechnology advances*, vol. 29, no. 6, pp. 686-702, Jun. 2011. doi:10.1016/j.biotechadv.2011.05.015
- [10] J. R. Benemann and W. J. Oswald, "Systems and economic analysis of microalgae ponds for conversion of CO2 to biomass.," California, 1996.
- [11] Craggs, D. Sutherland, and H. Campbell, "Hectare-scale demonstration of high rate algal ponds for enhanced wastewater treatment and biofuel production," *Journal of Applied Phycology*, vol. 24, no. 3, pp. 329-337, Feb. 2012.

- [12] R. Craggs, "Advanced integrated wastewater ponds," in *Pond Treatment Technology*, A. Shilton, Ed. London, UK: IWA Scientific and Technical Report Series, IWA, 2005, pp. 282–310.
- [13] J. García, R. Mujeriego, and M. Hernández-Mariné, "High rate algal pond operating strategies for urban wastewater nitrogen removal," *Journal of Applied Phycology*, vol. 12, pp. 331–339, 2000.
- [14] J.M. Valigore, "Microbial (Microalgal-Bacterial) Biomass Grown on Municipal Wastewater for Sustainable Biofuel Production," University of Canterbury, 2011.
- [15] P. Aguirre, E. Álvarez, I. Ferrer, and J. García, "Treatment of piggery wastewater in experimental high rate algal ponds," *Rev Latinoam Biotechnol Amb Algal*, vol. 2, no. 2, pp. 57–66, 2011.
- [16] J. R. Benemann, "Biofixation of CO₂ and greenhouse gas abatement with microalgae - technology roadmap," 2003.
- [17] H. Hadiyanto, S. Elmore, T. Van Gerven, and A. Stankiewicz, "Hydrodynamic evaluations in high rate algae pond (HRAP) design," *Chemical Engineering Journal*, vol. 217, pp. 231–239, Feb. 2013.
- [18] W. J. Oswald, "Advanced integrated wastewater ponds systems," *Supplying Water and Saving the Environment*, pp. 73–81, 1990.
- [19] J. B. K. Park, R. J. Craggs, and A. N. Shilton, "Enhancing biomass energy yield from pilot-scale high rate algal ponds with recycling," *Water Research*, vol. 47, no. 13, pp. 4422–4432, Apr. 2013.
- [20] J. Park, R. J. Craggs, and a N. Shilton, "Wastewater treatment high rate algal ponds for biofuel production.," *Bioresource technology*, vol. 102, no. 1, pp. 35–42, Jan. 2011. doi:10.1016/j.biortech.2010.06.158
- [21] B. Picot, S. Moersidik, C. Casellas, and J. Bontoux, "Using Diurnal Variations in a High Rate Algal Pond for Management Pattern," *Water Science & Technology*, vol. 28, no. 10, pp. 169–175, 1994.
- [22] J. F. Cornet, C. G. Dussap, and J. B. Gross, "Kinetics and energetic of photosynthetic microorganism in photobioreactors: application to Spirulina growth," *Advances in Biochemical Engineering/Biotechnology*, vol. 59, pp. 155–224, 1998.
- [23] N. J. Cromar, H. J. Fallowfield, and N. J. Martin, "Influence of environmental parameters on biomass production and nutrient removal in a high rate algal pond operated by continuous culture," *Water science and technology*, vol. 34, no. 11, pp. 133–140, 1996.
- [24] G. Oron, G. Shelef, A. Levi, A. Meydan, and Y. Azov, "Algae / Bacteria Ratio in High-Rate Ponds Used for Waste Treatment," *Applied and environmental microbiology*, vol. 38, no. 4, pp. 570–576, 1979.

- [25] I. de Godosa, S. Blancoc, P. A. García-Encina, E. Becares, and R. Muñoz, "Influence of flue gas sparging on the performance of high rate algae ponds treating agro-industrial wastewaters," *Journal of Hazardous Materials*, vol. 179, pp. 1049–1054, 2010.
- [26] Y. Nurdogan and W. J. Oswald, "Enhanced nutrient removal in high-rate ponds," *Water science and technology*, vol. 31, no. 12, pp. 33–43, 1995.
- [27] P. Pagand, J. Blancheton, J. Lemoalle, and C. Casellas, "The use of high rate algal ponds for the treatment of marine effluent from a recirculating fish rearing system," *Aquaculture*, vol. 31, pp. 729–736, 2000.
- [28] R. Steeneveldt, B. Berger, and T. a. Torp, "CO₂ Capture and Storage," *Chemical Engineering Research and Design*, vol. 84, no. 9, pp. 739–763, Sep. 2006.
- [29] D. J. Stepan, R. E. Shockey, T. A. Moe, and R. Dorn, "Carbon dioxide sequestering using microalgal systems," Pittsburgh, 2002.
- [30] P. Falkowski and J. Raven, *Aquatic Photosynthesis*, Second edi. Pricenton University press, 2007, p. 465.
- [31] C. K. Mathews and K. E. Van Holde, *Bioquímica*, 2nd ed. McGraw-Hill Book Company, 1998, p. 1283.
- [32] M. G. Guerrero and J. L. Barea, *Prácticas de Bioquímica*. Sevilla: Universidad de Sevilla, 1974, p. 63.
- [33] FAO, "Algae-Based Biofuels: A Review of Challenges and Opportunities for Developing Countries," Roma, 2009.
- [34] M. José and G. Vicente, "Captura de CO₂ Mediante Algas Unicelulares," Escuela Técnica Superior de Ingenieros Agrónomos, 2010.
- [35] R. J. Craggs, S. Heubeck, T. J. Lundquist, and J. R. Benemann, "Algal biofuels from wastewater treatment high rate algal ponds.," *Water science and technology : a journal of the International Association on Water Pollution Research*, vol. 63, no. 4, pp. 660–5, Jan. 2011.
- [36] G. K. Rasineni, A. Guha, and A. R. Reddy, "Elevated atmospheric CO₂ mitigated photoinhibition in a tropical tree species, *Gmelina arborea*," *Journal of photochemistry and photobiology. B, Biology*, vol. 103, no. 2, pp. 159–65, May 2011.
- [37] R. Putt, M. Singh, S. Chinnasamy, and K. C. Das, "An efficient system for carbonation of high-rate algae pond water to enhance CO₂ mass transfer," *Bioresource technology*, vol. 102, pp. 3240–3245, 2011.
- [38] J. C. Weissman and D. . Tillett, "Aquatic Species Project Report; NREL/MP-232-4174," in *National Renewable Energy Laboratory: Golden, CO,, L. . Brown and S. Sprague, Eds. 1992*, pp. 41–58.
- [39] H. Dua, J. Lin, and C. Zuercher, "Higher efficiency of CO₂ injection into seawater by a venturi than a conventional diffuser system," *Bioresource Technology*, vol. 107, pp. 131–134, 2012.

- [40] W. J. Oswald and H. B. Gotaas, "Photosynthesis in sewage treatment," *American Society of civil engineers*, pp. 73–105, 1955.
- [41] C. D. Smolke, *The Metabolic Pathway Engineering Handbook Fundamentals*. London: CRC Press Taylor & Francis Group, 2010, p. 680.
- [42] R. E. Blankenship and M. Chen, "Spectral expansion and antenna reduction can enhance photosynthesis for energy production.," *Current opinion in chemical biology*, vol. 17, no. 3, pp. 457–61, Jun. 2013.
- [43] J. M. Anna, G. D. Scholes, and R. van Grondelle, "A Little Coherence in Photosynthetic Light Harvesting," *BioScience*, vol. 64, no. 1, pp. 14–25, Dec. 2013.
- [44] D. A. Walker, "Biofuels, facts, fantasy, and feasibility," *Journal of Applied Phycology*, vol. 21, no. 5, pp. 509–517, Jun. 2009. doi:10.1007/s10811-009-9446-5
- [45] M. K. Jiri Masojidek and G. Torzillo, "Photosynthesis in Microalgae," in *Handbook of Microalgal Cultures: Biotechnology and Applied Phycology*, A. Richmond, Ed. Blackwell Science, 2004, pp. 20–39.
- [46] B. Praveena and S. D. . Murthy, "Role of photosynthetic pigments in protection against oxidative damage," *International journal of plant, animal and environmental sciences*, vol. 4, no. 1, pp. 167–171, 2013.
- [47] Z. Dubinsky, P. G. Falkowski, and K. Wyman, "Light Harvesting and Utilization by Phytoplankton," *Plant Cell Physiol*, vol. 27, no. 7, pp. 1335–1349, 1986.
- [48] T. Fisher, T. Berner, D. Iluz, and Z. Dubinsky, "The kinetics of the photoacclimation response of *Nannochloropsis* sp.(Eustigmatophyceae): a study of changes in ultrastructure and PSU density.," *Journal of Phycology*, vol. 34, no. 5, pp. 818–824, 1998. Doi: 10.1046/j.1529-8817.1998.340818.x
- [49] F. García-Camacho, A. Sánchez-Mirón, E. Molina-Grima, F. Camacho-Rubio, and J. C. Merchuck, "A mechanistic model of photosynthesis in microalgae including photoacclimation dynamics.," *Journal of theoretical biology*, vol. 304, pp. 1–15, Jul. 2012.
- [50] P. G. Falkowski and T. G. Owens, "Light- Shade Adaptation Two Strategies in Marine Phytoplankton," *Plant Physiol.*, vol. 66, pp. 592–595, 1980. Doi: 10.1104/pp.66.4.592
- [51] P. Cardol, G. Forti, and G. Finazzi, "Regulation of electron transport in microalgae," *Biochimica et biophysica acta*, vol. 1807, no. 8, pp. 912–8, Aug. 2011.
- [52] P. Joliot and B. Kok, "Oxygen evolution in photosynthesis," in *Bioenergetics of Photosynthesis*, Govindjee, Ed. New York: Academic Press, 1975, pp. 384–413.
- [53] C. Bonaventura and J. Myers, "Fluorescence and oxygen evolution from *Chlorella pyrenoidosa*," *Biochimica et Biophysica Acta (BBA) - Bioenergetics*, vol. 189, no. 3, pp. 366–383, 1969.

- [54] P. Bennoun, "Evidence for a respiratory chain in the chloroplast," *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, vol. 79, no. 14, pp. 4352-6, Jul. 1982.
- [55] A. Richmond, "Principles for attaining maximal microalgal productivity in photobioreactors: an overview," *Hydrobiologia* 512:, vol. 512, pp. 33-37, 2004.
- [56] I. Rawat, R. R. Kumar, T. Mutanda, and F. Bux, "Dual role of microalgae : Phycoremediation of domestic wastewater and biomass production for sustainable biofuels production," *Applied Energy*, vol. 88, no. 10, pp. 3411-3424, 2011.
- [57] Y. Li, W. Zhou, B. Hu, M. Min, P. Chen, and R. R. Ruan, "Integration of algae cultivation as biodiesel production feedstock with municipal wastewater treatment: strains screening and significance evaluation of environmental factors.," *Bioresource technology*, vol. 102, no. 23, pp. 10861-7, Dec. 2011. doi: 10.1016/j.biortech.2011.09.064
- [58] O. Pulz, "Photobioreactors: production systems for phototrophic microorganisms," *Applied Microbiology and Biotechnology*, vol. 57, no. 3, pp. 287-293, Oct. 2001. doi:10.1007/s002530100702
- [59] J. P. Bitog, I.-B. Lee, C.-G. Lee, K.-S. Kim, H.-S. Hwang, S.-W. Hong, I.-H. Seo, K.-S. Kwon, and E. Mostafa, "Application of computational fluid dynamics for modeling and designing photobioreactors for microalgae production: A review," *Computers and Electronics in Agriculture*, vol. 76, pp. 131-147, 2011. Doi: 10.1016/j.compag.2011.01.015
- [60] T. . Mehlitz, "Temperature influence and heat management requirements of microalgae cultivation in photobioreactors," California Polytechnic State University, USA., 2009.
- [61] R. Bouterfas, M. Belkoura, and A. Dauta, "Light and temperature effects on the growth rate of three freshwater [2pt] algae isolated from a eutrophic lake," *Hydrobiologia*, vol. 489, pp. 207-217, 2002.
- [62] C. Paterson and T. Curtis, "Physical and chemical environments," in *Pond Treatment Technology*, A. Shilton, Ed. London, UK: IWA Scientific and Technical Report Series, IWA, 2005, pp. 49-66.
- [63] J. B. K. Park and R. J. Craggs, "Nutrient removal in wastewater treatment high rate algal ponds with carbon dioxide addition," *Water Science & Technology*, vol. 63, no. 8, pp. 1758-1764, 2011. doi:10.2166/wst.2011.114
- [64] J. M. García and Hernández-Maríné Rafael Mujeriego, "Influence of Phytoplankton Composition on Biomass Removal from High-Rate Oxidation Lagoons by Means of Sedimentation and Spontaneous Flocculation," *Water Environment Research*, vol. 72, no. 2, pp. 230-237, 2000.

- [65] R. N. Singh and S. Sharma, "Development of suitable photobioreactor for algae production - A review," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 16, no. 4, pp. 2347-2353, May 2012.
- [66] Q. Kong, L. Li, B. Martinez, P. Chen, and R. Ruan, "Culture of microalgae *Chlamydomonas reinhardtii* in wastewater for biomass feedstock production.," *Applied biochemistry and biotechnology*, vol. 160, no. 1, pp. 9-18, Jan. 2010.
- [67] J. . Weissman and R. Goebel, "Photobioreactor design: mixing, carbon, utilization and oxygen accumulation," *Biotechnology and Bioengineering*, vol. 31, pp. 226-344, 1988.
- [68] V. Ceron, "Estudio de la capacidad de biofijación de CO₂ de una laguna algal de alta tasa en condiciones del trópico," Universidad del Valle, 2014.
- [69] J. Park and R. Craggs, "Wastewater treatment and algal production in high rate algal ponds with carbon dioxide addition.," *Water science and technology : a journal of the International Association on Water Pollution Research*, vol. 61, no. 3, pp. 633-9, Jan. 2010.
- [70] L. Brennan and P. Owende, "Biofuels from microalgae - A review of technologies for production, processing, and extractions of biofuels and co-products," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 14, no. 2, pp. 557-577, Feb. 2010.
- [71] V. Ashokkumar and R. Rengasamy, "Mass culture of *Botryococcus braunii* Kutz. under open raceway pond for biofuel production.," *Bioresource technology*, vol. 104, pp. 394-9, Jan. 2012. doi:10.1016/j.biortech.2011.10.093
- [72] G. L. Martínez, "Biodigestión anaerobia de residuos sólidos urbanos. Alternativa energética y fuente de trabajo," *Tecnura*, vol. 13, pp. 31-43, 2003.
- [73] J. Mata-Alvarez, S. Macé, and P. Llabrés, "Anaerobic digestion of organic solid waste. An overview of research achievements and perspectives," *Bioresource Technology*, vol. 74, pp. 3-16, 2000.
- [74] J. Park and R. Craggs, "Algal production in wastewater treatment high rate algal ponds for potential biofuel use," *Water Science & Technology*, vol. 63, no. 10, p. 2403, Jun. 2011.
- [75] E. Metaxa, G. Deviller, P. Pagand, C. Alliaume, C. Casellas, and J. P. Blancheton, "High rate algal pond treatment for water reuse in a marine fish recirculation system: Water purification and fish health," *Aquaculture*, vol. 252, no. 1, pp. 92-101, Mar. 2006.
- [76] H. Pearson, "Microbiology of waste stabilization ponds," in *Pond Treatment Technology*, A. Shilton, Ed. London, UK: IWA Scientific and Technical Report Series, IWA, 2005, pp. 14-43.
- [77] P. P. Assemany, M. L. Calijuri, A. D. F. Santiago, E. D. A. do Couto, M. D. O. Leite, and J. J. B. Sierra, "Effect of solar radiation on the lipid characterization

- of biomass cultivated in high-rate algal ponds using domestic sewage.," *Environmental technology*, vol. 35, no. 17–20, pp. 2296–305, 2014.
- [78] J. B. K. Park, R. J. Craggs, and a N. Shilton, "Recycling algae to improve species control and harvest efficiency from a high rate algal pond.," *Water research*, vol. 45, no. 20, pp. 6637–49, Dec. 2011.
- [79] T. J. Wrigley and D. F. Toerien, "Limnological aspects of small sewage ponds," *Water Research*, vol. 24, no. 1, pp. 83–90, 1990. doi: 10.1016/0043-1354(90)90068-H
- [80] T. M. Mata, A. A. Martins, and N. S. Caetano, "Microalgae for biodiesel production and other applications : A review," *Energy*, vol. 14, pp. 217–232, 2010. doi: 10.1016/j.rser.2009.07.020
- [81] V. H. Smith, B. S. M. Sturm, F. J. Denoyelles, and S. a Billings, "The ecology of algal biodiesel production.," *Trends in ecology & evolution*, vol. 25, no. 5, pp. 301–9, May 2010.
- [82] V. B-Béres, I. Grigorszky, G. Vasas, G. Borics, G. Várbíró, S. a. Nagy, G. Borbély, and I. Bácsi, "The effects of *Microcystis aeruginosa* (cyanobacterium) on *Cryptomonas ovata* (Cryptophyta) in laboratory cultures: why these organisms do not coexist in steady-state assemblages?," *Hydrobiologia*, vol. 691, no. 1, pp. 97–107, Mar. 2012.
- [83] S. Dunker, T. Jakob, and C. Wilhelm, "Contrasting effects of the cyanobacterium *Microcystis aeruginosa* on the growth and physiology of two green algae, *Oocystis marsonii* and *Scenedesmus obliquus* , revealed by flow cytometry," *Freshwater Biology*, vol. 58, no. 8, pp. 1573–1587, Aug. 2013. Doi: 10.1111/fwb.12143
- [84] C. Zhai, S. Song, S. Zou, C. Liu, and Y. Xue, "The mechanism of competition between two bloom-forming *Microcystis* species," *Freshwater Biology*, vol. 58, no. 9, pp. 1831–1839, Sep. 2013.
- [85] M. D. Guiry, "How Many Species of Algae Are There?," *Journal of Phycology*, vol. 48, no. 5, pp. 1057–1063, Oct. 2012. Doi: 10.1111/j.1529-8817.2012.01222.x
- [86] B. Hamouri, J. Jellal, H. Outabiht, B. Nebri, K. Khallayoune, A. Benkerroum, A. Hajli, and R. Firadi, "The Performance of a High-Rate algal pond in the Moroccan Climate," *Water Science & Technology*, vol. 31, no. 12, pp. 67–74, 1995.
- [87] E.-M. Mustafa, S.-M. Phang, and W.-L. Chu, "Use of an algal consortium of five algae in the treatment of landfill leachate using the high-rate algal pond system," *Journal of Applied Phycology*, Sep. 2012. Doi: 10.1007/s10811-011-9716-x
- [88] I. de Godos, R. Muñoz, and B. Guieysse, "Tetracycline removal during wastewater treatment in high-rate algal ponds.," *Journal of hazardous materials*, vol. 229–230, pp. 446–9, Aug. 2012.

- [89] A. Ranga Rao, G. a Ravishankar, and R. Sarada, "Cultivation of green alga *Botryococcus braunii* in raceway, circular ponds under outdoor conditions and its growth, hydrocarbon production.," *Bioresource technology*, vol. 123, pp. 528–33, Nov. 2012.
- [90] D. D.-W. Tsai, R. Ramaraj, and P. H. Chen, "Growth condition study of algae function in ecosystem for CO₂ bio-fixation," *Journal of Photochemistry and Photobiology B: Biology*, vol. 107, pp. 27–34, 2012.
- [91] Y. Bao, M. Liu, X. Wu, W. Cong, and Z. Ning, "In situ carbon supplementation in large-scale cultivations of *Spirulina platensis* in open raceway pond," *Biotechnology and Bioprocess Engineering*, vol. 17, no. 1, pp. 93–99, Feb. 2012.
- [92] N. Broekhuizen, J. B. K. Park, G. B. McBride, and R. J. Craggs, "Modification, calibration and verification of the IWA River water quality model to simulate a pilot-scale high rate algal pond," *Water research*, vol. 46, pp. 2911–2926, 2012.
- [93] W. J. Oswald and C. G. Golueke, "Biological Transformation of Solar Energy," *Advances in Applied Microbiology*, vol. 2, pp. 223–262, 1960.
- [94] M. Tabatabaei, M. Tohidfar, G. Salehi, M. Safarnejad, and M. Pazouki, "Biodiesel production from genetically engineered microalgae: Future of bioenergy in Iran," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 15, no. 4, pp. 1918–1927, 2011.
- [95] B. El Hamouri, K. Khallayoune, K. Bouzoubaa, N. Rhallabi, and M. Chalabi, "High-Rate Algal pond Performances in Fecal Coliformes and Helminth Egg Removals," *Water Research*, vol. 28, no. 1, pp. 171–174, 1994.
- [96] J. García, M. Hernández-mariné, and R. Mujeriego, "Analysis of key variables controlling phosphorus removal in high rate oxidation ponds provided with clarifiers," *WaterSA*, vol. 28, no. 1, pp. 55–62, 2002.
- [97] M. Xu, M. Bernards, and Z. Hu, "Algae-facilitated chemical phosphorus removal during high-density *Chlorella emersonii* cultivation in a membrane bioreactor.," *Bioresource technology*, vol. 153, pp. 383–7, Feb. 2014.
- [98] J. He and J. Paul Chen, "A comprehensive review on biosorption of heavy metals by algal biomass: materials, performances, chemistry, and modelling simulation tools," *Bioresource Technology*, Feb. 2014.
- [99] S. W. Won, P. Kotte, W. Wei, A. Lim, and Y.-S. Yun, "Biosorbents for recovery of precious metals.," *Bioresource technology*, Feb. 2014.
- [100] K. Vijayaraghavan and Y.-S. Yun, "Bacterial biosorbents and biosorption.," *Biotechnology advances*, vol. 26, no. 3, pp. 266–91, 2008.
- [101] H. V. Perales-Vela, J. M. P.- Castro, and R. O. Cañizares-Villanueva, "Heavy metal detoxification in eukaryotic microalgae," *Chemosphere*, vol. 64, pp. 1–10, 2006.