

Research Article

Diversidad de las comunidades de algas asociadas a un sistema algal de alta tasa fotosintética para la biorremediación de lixiviados de rellenos sanitarios

Antonella Sardi-Saavedra¹, Enrique J. Peña-Salamanca¹
Carlos A. Madera-Parra² & Víctor A. Cerón-Hernández³

¹Departamento de Biología, Universidad del Valle, Cali, Colombia

²Escuela EIDENAR-Facultad de Ingeniería, Universidad del Valle, Cali, AA 25360, Colombia

³Instituto Cinara, Universidad del Valle Cali, AA 25157, Colombia

Corresponding author: Víctor A. Cerón (victor.a.ceron@correounivalle.edu.co)

RESUMEN. Los sistemas algales de alta tasa fotosintética se caracterizan por la mejora en el crecimiento de la biomasa y capacidad de tratamiento de lixiviados. Las microalgas involucradas en estos sistemas son utilizadas para la biorremediación de contaminantes, y también pueden indicar cambios en el sistema acuático al presentar variaciones en la estructura y crecimiento de las comunidades. Este estudio tuvo como objetivo evaluar la diversidad de la comunidad de algas asociadas a un sistema algal de alta tasa fotosintética empleado en la biorremediación del lixiviado del relleno de San Pedro, Valle del Cauca, Colombia. Para ello se tomaron muestras biológicas y medición de parámetros físicos y químicos durante tres fases del tratamiento entre noviembre 2012 y julio 2013. Se utilizaron los índices de Shannon y Simpson para evaluar la diversidad del sistema. En total se registraron 28 especies, siendo *Chilomonas insignis* y *Euglena* sp. 1 las más abundantes. El estudio reveló variaciones tanto en abundancia como en composición de especies durante todas las fases de desarrollo del sistema. En la primera fase dominaron individuos del phylum Cryptophyta y en la segunda y tercera, individuos del phylum Euglenophyta. La dominancia de los individuos estuvo asociada a la concentración de compuestos orgánicos y nutrientes en el agua. Los índices mostraron una baja diversidad (entre 0 y 2), siendo la segunda fase el momento de mayor diversidad ($H' = 1,77$). Finalmente, el conocimiento de la estructura y dinámica del fitoplancton es clave para el mantenimiento y desempeño de este sistema.

Palabras clave: fitoplancton, composición, diversidad, eutroficación, biorremediación.

Diversity of algal communities associated with a photosynthetic high rate algal system for bioremediation landfill leachate

ABSTRACT. The photosynthetic high rate algal systems are characterized by improved growth in biomass and leachate treatment capacity. Microalgae involved in these systems are used for bioremediation of pollutants and can also indicate changes in the aquatic system by displaying variations in the structure, function and growth of communities. This study aimed to appraise the structure and dynamics of the community of microalgae associated with a high rate algal system used in bioremediation landfill leachate of San Pedro, Valle del Cauca, Colombia. Biological sample and measuring physical and chemical parameters were taken during three phases of treatment between November 2012 and July 2013. Shannon and Simpson indices were used to assess the diversity of the system. A total of 28 species were recorded, with *Chilomonas insignis* and *Euglena* sp. 1 as the most abundant. The study revealed variations in abundance and species composition during all phases of the system development. The first phase was dominated by Cryptophyta and the second and third phases were dominated by Euglenophyta. The dominance of organisms was associated with organics and nutrients concentration in the water. The indices showed a low diversity (between 0 and 2) due to high levels of eutrophication, the second phase was the moment of greatest diversity ($H' = 1.77$). Finally, knowledge of the structure and dynamics of phytoplankton is the key to maintenance and performance of this system.

Keywords: phytoplankton, composition, diversity, eutrophication, bioremediation.

INTRODUCCIÓN

Los lixiviados de relleno sanitario son un agua residual compleja generados debido a la percolación de las aguas de lluvias a través de los desechos y a las diversas reacciones bioquímicas que pueden ocurrir en el interior del relleno entre el contenido sólido y acuoso, y pueden comprender materia orgánica, nutrientes, metales pesados, compuestos recalcitrantes y xenobióticos (Renou *et al.*, 2008). Los metales pesados, a diferencia de los contaminantes orgánicos, son persistentes en la naturaleza y dada su disposición en el suelo se podría llegar a predecir su presencia en un horizonte de más de 100 años (Obersteiner *et al.*, 2007; De Feo & Malvano, 2009). Se ha propuesto el uso de la biorremediación como la tecnología más conveniente que utiliza individuos para la desintoxicación o eliminación de contaminantes del medio ambiente. En los últimos años, el uso de microalgas en la biorremediación ha sido de gran interés, debido a su papel central en la fijación de dióxido de carbono y al tratamiento de contaminantes, de manera simultánea (Chekroun *et al.*, 2014; Raja *et al.*, 2014).

Por su parte, se denominan sistemas algales de alta tasa fotosintética por la mejora en el rendimiento o productividad en la biomasa y en la capacidad de tratamiento de aguas residuales, en comparación con otros sistemas como las lagunas facultativas (García *et al.*, 2000; Valigore, 2011), ya que el tiempo de retención celular es mucho mayor que el tiempo de retención hidráulico. Las lagunas algales de alta tasa fotosintética, facilitan el tratamiento de aguas residuales, debido a la alta producción de biomasa algal y oxígeno, mediante una tasa fotosintética elevada, proporcionando un ambiente favorable para que las bacterias realicen la degradación de la materia orgánica (Pagand *et al.*, 2000; Park & Craggs, 2010). Este tipo de sistemas se considera como un ecosistema estresado por las altas concentraciones de contaminantes y materia orgánica. Además del tratamiento biológico, la biomasa producida de algas tiene un uso potencial como alimento, biofertilizantes y biocombustible (bioetanol) y al mismo tiempo, contribuye en la captura de dióxido de carbono presente en el medio ambiente (Park & Craggs, 2011).

Los individuos algales que se encuentran con frecuencia son: *Desmodesmus* sp., *Micractinium* sp., *Actinastrum* sp., *Pediastrum* sp., *Dictyosphaerium* sp. y *Coelastrum* sp. Estos suelen formar grandes colonias que sedimentan (diámetro: 50-200 μm), que permite una cosecha rentable y sencilla de la biomasa, por gravedad (García *et al.*, 2000; Craggs *et al.*, 2011; Park *et al.*, 2011). Park & Craggs (2010) reportan que los individuos dominantes en la laguna de alta tasa

fotosintética durante 5 meses fueron colonias de *Scenedesmus* sp., *Microactinium* sp. y *Pediastrum* sp., y pocas células observadas de *Ankistrodesmus* sp. las que formaron bioflocos de gran tamaño (diámetro >500 mm).

El objetivo de este estudio fue evaluar la diversidad de la comunidad de algas de un sistema algal de alta tasa fotosintética empleado en la biorremediación de lixiviados del relleno sanitario de San Pedro, Valle del Cauca, Colombia.

MATERIALES Y MÉTODOS

Área de estudio

Se instaló una laguna algal de alta tasa fotosintética en el relleno sanitario regional Presidente, localizado en el municipio de San Pedro, Valle del Cauca, Colombia (3°56'01,54"N, 76°26'26,05"W). La zona tiene una temperatura promedio de 24,3°C, precipitación de 2,3 mm día⁻¹ y humedad exterior de 74,8% (Tabla 1). El sistema algal de alta tasa fotosintética (LALAT) (Tabla 2) recibió el efluente de un acople tecnológico compuesto por un Bioreactor Laguna Anaerobia de Alta Tasa (BLAAT®) y un Humedal subsuperficial de flujo horizontal, a escala piloto que trataban lixiviado (2 m³día⁻¹) del relleno de Presidente. En este relleno se disponen ~490 ton día⁻¹ de residuos sólidos, donde cerca del 77% es material orgánico y se genera entre 2 y 5 L s⁻¹ de lixiviado (Bugaseo S.A., 2009).

La laguna algal operó en tres fases diferenciadas, las cuales dependieron del proceso y operación del sistema. La primera fase del sistema consistió en dejar en batch (sin afluente y efluente) el sistema entre noviembre de 2012 e inicio de febrero de 2013 (110 días en total). La segunda fase consistió en la entrada del efluente del sistema previo (humedal de flujo subsuperficial) al sistema algal a final de febrero (10 días), donde se permitió la entrada de un caudal aproximado de 0,24 m³ día⁻¹. La tercera y última fase se definió como la ambientación que presentaron las poblaciones algales a las nuevas condiciones de la laguna

Tabla 1. Especificaciones de diseño y operación de la laguna algal de alta tasa fotosintética.

Forma	Configuración (Ovalo)
Caudal	0,24 m ³ día ⁻¹
Tiempo de retención hidráulico	2 días
Carga orgánica superficial	6,5 g m ⁻² día ⁻¹
Volumen	0,3 m ³
Ancho	0,6 m
Largo	2,4 m
Altura	0,2 m

Tabla 2. Datos promedio meteorológicos de la zona de estudio de febrero a julio de 2013.

Meses	Temperatura exterior	Humedad exterior	Velocidad del viento	Precipitación	Radiación solar	Evapo-transpiración
	°C	%	m s ⁻¹			
Febrero	24,6	78,3	0,4	2,4	-	-
Marzo	23,9	79,2	0,5	1,1	-	-
Abril	24,1	78,2	0,5	3,2	184,9	0,05
Mayo	24,6	78,3	0,5	5,9	177,6	0,09
Junio	24,3	75,3	0,7	0,5	191,9	0,04
Julio	23,9	59,6	0,4	0,5	177,1	0,034

hasta el final del experimento (marzo-julio 2013; 153 días en total).

La toma de muestras y datos en el LALAT se realizaron en la superficie a 0,05 m de profundidad aproximadamente. A estas muestras se les determinaron los siguientes parámetros físicos y químicos: PO₄³⁻ (fosfatos), SSV (sólidos suspendidos volátiles), SST (sólidos suspendidos totales, COD (carbono orgánico disuelto), DQO total y filtrada (demanda química de oxígeno), NTK (nitrógeno total Kjeldahl), NH₄⁺ (nitrógeno amoniacal) y NO₃⁻ (nitratos), según lo sugieren el IDEAM (2009) y APHA *et al.* (2012). Asimismo, se tomaron datos *in situ* de temperatura, pH, conductividad y oxígeno disuelto (OD) con un medidor multiparamétrico WTW Modelo 340i. La clorofila-*a* se determinó empleando un fluorómetro AquaFluor TMTuner.

Toma e identificación de muestras biológicas

Las muestras de algas se colectaron entre noviembre de 2012 y julio de 2013, para un total de once muestras. Se tomaron ~500 mL en recipientes de plástico en el punto de muestreo medio (al interior del sistema), se fijaron con 10 mL formol al 4% como agente de preservación según las recomendaciones de Zaixso (2002). La identificación de los individuos se realizó con apoyo de claves y descripciones taxonómicas de Wehr & Scheath (2003) y Bicudo & Menezes (2006), hasta el nivel más alto posible.

Para la cuantificación del fitoplancton, se utilizó una cámara Sedgwick-Rafter y se hizo el conteo por campos en un microscopio invertido (Nikon Eclipse T5100), siguiendo los métodos de Villafañe & Reid (1995) y Wetzel & Likens (2000). Se empleó la fórmula propuesta por Wetzel & Likens (2000) para el conteo de fitoplancton:

$$N (\text{ind mL}^{-1}) = C * [A / a * S * V]$$

donde: N: número de individuos mL⁻¹, C: número de individuos, A: área de la cámara de conteo (mm²), a: área del campo o banda (mm²), S: número de campos o

bandas contadas, V: volumen de la cámara de conteo (mL).

Se calculó la diversidad de microalgas mediante el índice de diversidad de Shannon (H') y el índice de dominancia de Simpson (1-D) utilizando el programa Past 2.12.

RESULTADOS

Calidad del agua

La Tabla 3 muestra que el pH siempre fue alcalino manteniéndose por encima de 8,0. La laguna presentó un comportamiento de reactor aerobio, alcanzando niveles de concentración de oxígeno disuelto de 9,1 mg L⁻¹ en promedio. El monitoreo de la clorofila-*a* durante el tiempo de experimentación mostró una estabilidad del sistema, alcanzando concentraciones de hasta 3659 µg L⁻¹. Los nutrientes mostraron niveles altos, PO₄³⁻ hasta 5,28 mg L⁻¹, NH₄⁺ hasta 131 mg L⁻¹ y NO₃⁻ hasta 15 mg L⁻¹.

Se observó una clara diferencia de los parámetros físicos y químicos en las tres fases. La fase I se caracterizó por tener los valores más bajos en PO₄³⁻, DQO, DQO fil, NH₄⁺, conductividad eléctrica y Chl-*a*, así como los valores más altos de SST y NO₃⁻. Mientras que en la fase II se presentaron los valores más altos de PO₄³⁻, DQO, NTK, NH₄⁺, NH₄org, conductividad eléctrica y temperatura y los valores más bajos de SST, SSV, NO₃⁻, OD y pH. El COD, DQO fil, y Clor-*a* aumentaron a lo largo del tiempo, siendo la fase III donde se obtuvieron los valores mayores (Tabla 3).

Composición de fitoplancton

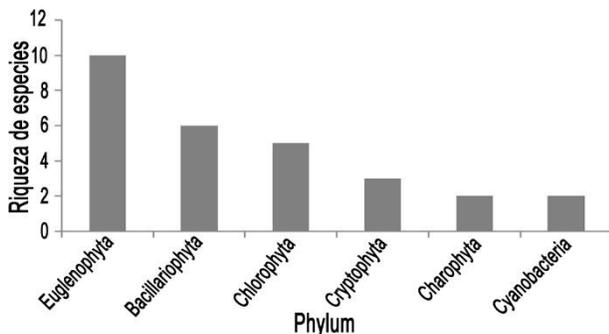
En total se registraron 28 especies distribuidas en seis phylum, ocho clases y 21 familias (Tabla 4). Los individuos encontrados se agruparon en los siguientes phyla: Euglenophyta (10), Bacillariophyta (6), Chlorophyta (5), Cryptophyta (3), Cyanobacteria (2) y Charophyta (2) (Fig. 1). La comunidad de microalgas estuvo compuesta por un bajo número de especies abun-

Tabla 3. Variables físicas y químicas en el sistema algal de alta tasa fotosintética durante el periodo estudiado.

Fases	COD	PO ₄ ³⁻	DQO	DQO fil	SST	SSV	NTK	NH ₄ org	NH ₄ ⁺	NO ₃ ⁻	OD	Clor-a	T	CE	pH
	mg L ⁻¹											°C	Ms cm ⁻¹		
Fase I	109,7	0,41	286	217,8	133	91	133,0	43	89,6	8,73	7,17	518	30	2,14	8,4
Fase II	132,0	3,11	747	257,6	87	75	182,0	65	117,0	2,50	5,50	898	31	3,58	8,1
Fase III	137,5	2,70	598	290,3	132	127	129,3	23	106,0	4,33	10,66	2131	26	3,36	8,5

Tabla 4. Listado de especies y sus densidades en el sistema algal de alta tasa fotosintética, durante el periodo de estudio.

Phylum	Clase	Familia	Especie	Individuos mL ⁻¹
Charophyta	Conjugatophyceae	Closteriaceae	<i>Closterium</i> sp.	3,53E+02
	Conjugatophyceae	Desmidiaceae	<i>Cosmarium</i> sp.	5,88E+01
Chlorophyta	Chlorophyceae	Chlamydomonadaceae	<i>Chlamydomonas</i> sp.	3,45E+04
	Trebouxiophyceae	Chlorellaceae	<i>Chlorella vulgaris</i> Beyerinck (Beijerinck)	8,24E+02
	Chlorophyceae	Scenedesmaceae	<i>Scenedesmus</i> sp.	1,22E+04
	Chlorophyceae	Selenastraceae	<i>Selenastrum</i> sp.	4,12E+02
	Ulvophyceae	Ulotrichaceae	<i>Ulothrix</i> sp.	8,88E+03
Cryptophyta	Cryptophyceae	Campylomonadaceae	<i>Chilomonas insignis</i> (Skuja) Javornicky	9,12E+05
	Cryptophyceae	Chroomonadaceae	<i>Chroomonas coerulea</i> (Geitler) Skuja	9,71E+04
	Cryptophyceae	Cryptomonadaceae	<i>Cryptomonas</i> sp.	1,76E+03
Cyanobacteria	Cyanophyceae	Chroococaceae	<i>Chroococcus</i> sp.	4,53E+03
	Cyanophyceae	Phormidiaceae	<i>Phormidium</i> sp.	4,71E+02
Euglenophyta	Euglenophyceae	Euglenaceae	<i>Euglena</i> sp. 1	4,08E+05
	Euglenophyceae	Euglenaceae	<i>Euglena</i> sp. 2	3,53E+02
	Euglenophyceae	Euglenaceae	<i>Euglena</i> sp. 3	7,06E+02
	Euglenophyceae	Euglenaceae	<i>Euglena</i> sp. 4	1,79E+04
	Euglenophyceae	Euglenaceae	<i>Euglena</i> sp. 5	1,85E+05
	Euglenophyceae	Euglenaceae	<i>Euglena</i> sp. 6	1,76E+02
	Euglenophyceae	Euglenaceae	<i>Euglena</i> sp. 7	4,66E+04
	Euglenophyceae	Euglenaceae	<i>Cryptoglena</i> sp.	2,12E+04
	Euglenophyceae	Phacaceae	<i>Lepocinclis</i> sp.	2,16E+04
	Euglenophyceae	Phacaceae	<i>Phacus</i> sp.	1,06E+03
Bacillariophyta	Bacillariophyceae	Cymbellaceae	<i>Encyonopsis</i> sp.	6,47E+02
	Bacillariophyceae	Gomphonemataceae	<i>Gomphonema</i> sp.	7,06E+02
	Bacillariophyceae	Naviculaceae	<i>Navicula</i> sp.	3,53E+02
	Bacillariophyceae	Bacillariaceae	<i>Nitzschia</i> sp.	1,41E+03
	Bacillariophyceae	Pinnulariaceae	<i>Pinnularia</i> sp.	5,88E+01
	Bacillariophyceae	Indeterminada	Indeterminada	1,18E+02

**Figura 1.** Riqueza total por phylum en el sistema algal de alta tasa fotosintética, durante el periodo de estudio.

dantes (4 spp.) y un gran número de especies raras (22 spp.). Las especies más abundantes fueron *Chilomonas insignis* (Skuja) Javornicky y *Euglena* sp. 1. Los phyla Euglenophyta y Cryptophyta fueron los mejor representados en abundancia (Fig. 2), mientras que en riqueza de especies fueron Euglenophyta, Chlorophyta y Bacillariophyta.

En la primera fase, se encontraron pocos individuos de Chlorophyta ($1,26E+04$ ind mL⁻¹) y Cyanophyta ($5,88E+01$ ind mL⁻¹), representados por los géneros *Scenedesmus*, *Chlorella* y *Chroococcus*. Además, presentó un primer máximo de alta densidad ($3,32E+05$ ind mL⁻¹), dominado por especies del phylum Crypto-

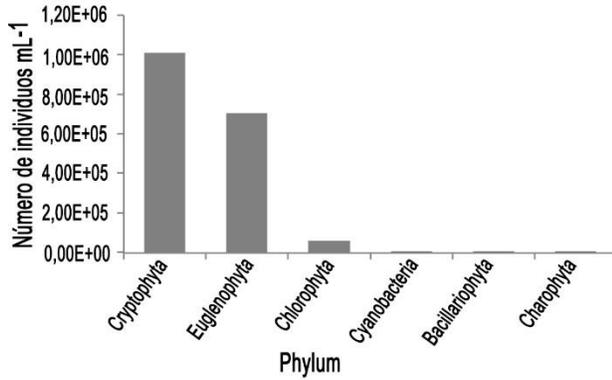


Figura 2. Abundancia total por Phylum en el sistema algal de alta tasa fotosintética, durante el periodo de estudio.

phyta, cuyas especies más abundantes fueron *C. insignis* y *Chroomonas coerulea* (Geitler) Skuja. En la segunda fase, el inicio del funcionamiento del sistema de tratamiento tuvo como consecuencia el descenso en la cantidad de fitoplancton y el incremento de la riqueza, con 15 especies, correspondientes a 5 de los 6 phylum reportados en este trabajo. Por último, en la tercera etapa, se presentó el segundo máximo de alta densidad. A medida que aumentaban las cargas de materia orgánica, la comunidad algal fue reemplazada por microalgas del phylum Euglenophyta, siendo *Euglena* sp. 1 y *Euglena* sp. 7 las especies más abundantes (Figs. 3-4).

Diversidad algal

A lo largo del periodo de estudio los valores de la riqueza variaron, se registraron 11 especies en la primera fase, 15 en la segunda y 9 en la tercera, con un promedio de 11,6 especies por fase. La segunda fase se destacó por tener la mayor diversidad ($H' = 1,766$) y la menor dominancia (Índice de Simpson 1-D = 0,765), seguida por la tercera fase ($H' = 0,969$; 1-D = 0,431) y por último la primera fase ($H' = 0,436$; 1-D = 0,2067) que fue la de menor diversidad.

DISCUSIÓN

Calidad del agua

Las condiciones de la laguna variaron en las diferentes fases. En la primera fase se registraron las menores concentraciones de nutrientes. El inicio del funcionamiento del sistema, por el contrario, ocasionó el incremento en la concentración de nutrientes y conductividad eléctrica, mientras que en la estabilización de la laguna aumentó la concentración de materia orgánica y clorofila-*a* (Clor-*a*). La laguna fue alcalina durante todo el periodo evaluado, lo cual indica que hubo una mayor

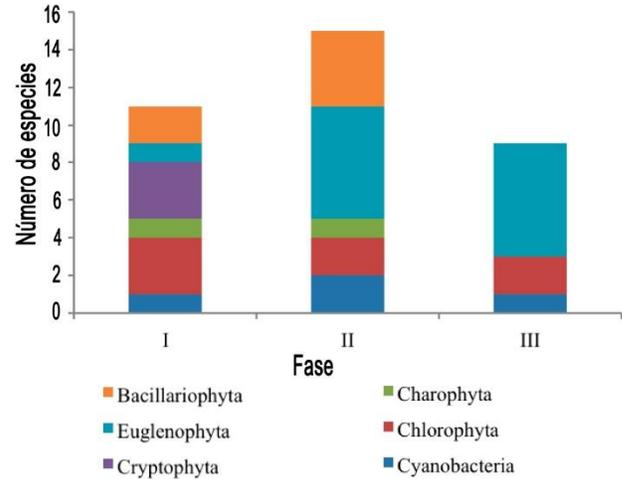


Figura 3. Variaciones de la riqueza de especies de fitoplancton en el sistema algal de alta tasa fotosintética, durante las fases de estudio.

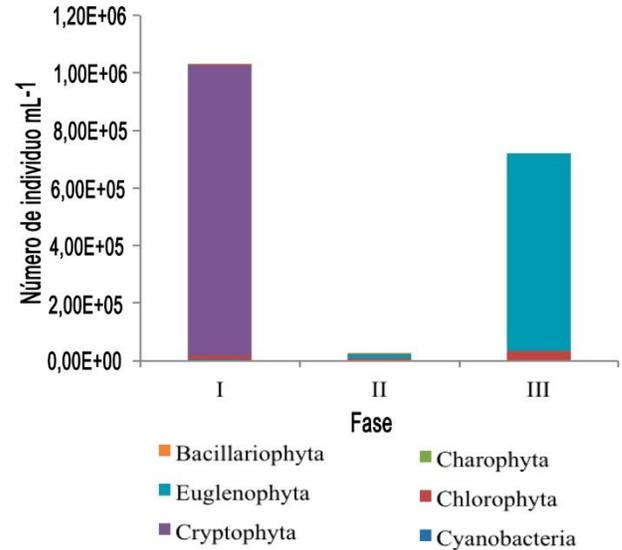


Figura 4. Variaciones de la abundancia de fitoplancton en el sistema algal de alta tasa fotosintética, entre durante las fases de estudio.

actividad fotosintética y como consecuencia altas concentraciones de OD, que permitieron el crecimiento continuo de bacterias heterótrofas, importantes en la degradación de materia orgánica (Park & Craggs, 2011).

Cabe resaltar que los altos niveles de fosfato y nitrógeno de este estudio reflejan el enriquecimiento de nutrientes de la laguna y por tanto su eutrofización. Esto trae como resultado el crecimiento de la producción primaria y como consecuencia, cambios en la composición y estructura de la comunidad algal de la laguna.

Composición de fitoplancton

De acuerdo con los resultados obtenidos, la comunidad algal tuvo variaciones tanto en abundancia como en composición de especies. En la primera fase, en que se obtuvieron las menores concentraciones de nutrientes y materia orgánica (Tabla 3), coincidió con el mayor número de phyla registrados en el estudio (6) y el mayor número de individuos ($1,03E+06$ ind mL⁻¹). En la primera fase, la comunidad presentó una baja densidad de individuos ($1,27E+04$ ind mL⁻¹) de los géneros *Scenedesmus* y *Chroococcus*, y una dominancia de especies del phylum Cryptophyta, las más abundantes en el estudio, indicadoras de altas concentraciones de materia orgánica en descomposición (Bicudo & Menezes, 2006). El inicio del sistema, en la segunda fase, presentó la mayor concentración de nutrientes, que favoreció la mayor riqueza de especies (15 especies) durante todo el estudio. En contraste, la tercera fase presentó los mayores valores de materia orgánica que correspondió a la dominancia de Euglenophyta. En esta fase, la riqueza nuevamente disminuyó y como resultado en cada muestreo dominaron entre dos o tres especies de los phyla Euglenophyta y Chlorophyta. La dominancia de unas pocas especies puede ser más ventajosa en este tipo de sistemas que una gran riqueza de especies, pues el objetivo es tener una alta cantidad de biomasa de fitoplancton que pueda eliminar los nutrientes del agua en el tratamiento de lixiviados (Assemany *et al.*, 2015).

Es importante resaltar que la composición a nivel de phylum concuerda con la obtenida por Khattabi *et al.* (2006) en las lagunas de tratamiento de lixiviados, donde los phyla más importantes fueron Euglenophyta, Bacillariophyta y Chlorophyta. No obstante, al comparar con la composición obtenida por los autores Amengual-Morro *et al.* (2012), Pham *et al.* (2014) y Calero *et al.* (2015) para las lagunas de tratamiento de aguas residuales se encontraron mayores similitudes, ya que ellos reportan cinco de los seis phyla mencionados en este estudio, Euglenophyta, Bacillariophyta Chlorophyta, Cyanophyta y Cryptophyta. Esta mayor aproximación a la composición con las lagunas de tratamiento de aguas residuales que con el tratamiento de lixiviados se debería por una parte a que hay muy pocos estudios de tratamiento de lixiviados con que comparar y por otra parte, a la calidad del agua de la laguna en el estudio de Khattabi *et al.* (2006), la cual es de menor potencial contaminador que el lixiviado tratado en el presente estudio.

Los géneros registrados en esta investigación corresponden a los encontrados en estudios de tratamiento de aguas residuales y lixiviados (Tabla 5), donde los géneros dominantes son *Chlamydomonas* y/o

Euglena (Khattabi *et al.*, 2006; Shanthala *et al.*, 2009; Amengual-Morro *et al.*, 2012; Pham *et al.*, 2014). Sin embargo, los autores Shanthala *et al.* (2009), Amengual-Morro *et al.* (2012) y Assemany *et al.* (2015) reportaron otros géneros como *Chlorella* y *Scenedesmus* que si bien corresponden a los reportados en este estudio, no son los más representativos. Asimismo, Park *et al.* (2011), plantearon resultados contrastantes, reportando los géneros *Pediastrum*, *Demodesmus*, *Micractinium* y *Dictyosphaerium* como los más abundantes, pero estos no se reportaron en este estudio. Por el contrario, al comparar con los géneros registrados por Pham *et al.* (2014), se encuentra una gran similitud tanto en la composición como en la dominancia de los géneros *Chlamydomonas*, *Chroomonas*, *Euglena* y *Lepocinclis* y en la presencia aunque con pocos individuos de *Chlorella*, *Scenedesmus*, *Navicula* y *Nitzschia*. Además de que los dos estudios tienen condiciones de contaminación semejantes, esta alta similitud se explicaría por las condiciones climáticas, ya que los dos países son tropicales, con condiciones más estables de temperatura a lo largo del año, lo cual puede proporcionar ambientes óptimos para que un mayor número de especies se establezcan.

Diversidad algal

La riqueza total de especies (28) corresponde a las reportada por Pham *et al.* (2014) y Assemany *et al.* (2015) en condiciones similares. Sin embargo, esta riqueza varía a lo largo del tiempo, teniendo en promedio 11,6 especies por fase, la cual es muy baja. Los valores del índice de diversidad de Shannon mostraron valores bajos (entre 1 y 2) para la segunda fase y muy bajos (entre 0 y 1) para la primera y tercera fase. Esto indica que a lo largo del periodo de estudio la diversidad fue muy baja, según Margalef (1983) cuando en los sistemas lacustres continentales el fitoplancton presenta una diversidad <1, sugiere que el ambiente es muy eutrófico. La eutrofización causa un incremento en el crecimiento del fitoplancton, que ocasiona el descenso en la transparencia del agua y como consecuencia, la disminución de individuos de otras especies que no están adaptadas a sobrevivir en estas condiciones.

En la primera fase donde la calidad del agua era menos contaminada (se trabajó con efluente de una planta de ósmosis inversa cuya concentración de DQO promedio fue de 286 mg L⁻¹) y en esa fase de batch, se obtuvo la menor diversidad ($H' = 0,436$) y la mayor dominancia ($1-D = 0,2067$). En esta fase se obtuvieron los menores valores de COD, PO₄³⁻, NTK y NH₄⁺, condiciones que favorecieron la dominancia de especies como *C. insignis* y *Chroomonas* sp. y el esta-

Tabla 5. Géneros dominantes en lagunas de tratamiento de lixiviados y aguas residuales. ATF: alta tasa fotosintética.

Lugar geográfico	Géneros dominantes	Sistema	Referencias
Etuffont, Belfort (Francia)	<i>Chlamydomonas</i> , <i>Phacus</i> , <i>Coelastrum</i> y <i>Euglena</i>	Lagunas de tratamiento de lixiviados	Khattabi <i>et al.</i> (2006)
Shimoga, Karnataka (India)	<i>Chlorella</i> , <i>Scenedemus</i> , <i>Ankistrodesmus</i> y <i>Euglena</i>	Laguna de estabilización de aguas residuales	Shantala <i>et al.</i> (2009)
Centro de Investigación Ruakura, Hamilton (Nueva Zelanda)	<i>Pediastrum</i> , <i>Demodesmus</i> , <i>Micractinium</i> y <i>Dictyosphaerium</i>	Laguna algal de ATF	Park <i>et al.</i> (2011)
Islas Baleares (España)	<i>Chlorella</i> , <i>Scenedemus</i> , <i>Chlamydomonas</i> , <i>Micractinium</i> , <i>Euglena</i> , <i>Ankistrodesmus</i> , <i>Oscillatoria</i> y <i>Microcystis</i>	Laguna de estabilización de aguas residuales	Amengual <i>et al.</i> (2012)
Parque Ucubamba, La Cuenca (Ecuador)	<i>Chlamydomonas</i> , <i>Planktosphaeria</i> , <i>Schroederia</i> , <i>Cyclotella</i> , <i>Cryptomonas</i> , <i>Euglena</i> , <i>Lepocinclis</i> , <i>Phacus</i> , <i>Strombomonas</i> y <i>Trachelomonas</i>	Lagunas de estabilización de aguas residuales, facultativa y madura	Pham <i>et al.</i> (2014)
Viçosa-MG (Brasil)	<i>Chlorella</i> y <i>Desmodesmus</i>	Laguna de ATF	Assemany <i>et al.</i> (2015)
San Pedro, Valle del Cauca (Colombia)	<i>Euglena</i> , <i>Chilomonas</i> , <i>Chroomonas</i> , <i>Chlamydomonas</i> , <i>Lepocinclis</i> , <i>Cryptoglana</i>	Laguna algal de ATF	Este estudio

blecimiento de especies como *Scenedemus* sp. y *Chroococcus* sp. A medida que se comenzó a emplear afluente al sistema con lixiviados (segunda fase), la calidad del agua en términos de DQO pasó de 286 a 787 mg L⁻¹, lo cual es un indicador de un aumento de tres veces la concentración de materia orgánica en el agua, condición que incide en la obtención de la mayor diversidad $H' = 1,766$ y en que especies como *C. insignis*, *Scenedemus* sp. y *Chroomonas* sp. desaparecen y aparecen especies de los géneros *Euglena*, *Phacus*, *Gomphonema*, *Chlamydomonas* y *Ulothrix*. En la tercera fase, en que la laguna recibió un afluente prolongado de lixiviados, la calidad del agua presentó una concentración de DQO promedio de 598 mg L⁻¹, que incide en que especies de géneros como *Ulothrix* y *Gomphonema* desaparezcan y especies de los géneros *Euglena*, *Phacus* y *Chlamydomonas* se mantengan y toleren estas nuevas condiciones. Estos últimos géneros son muy conocidos por su resistencia a altas concentraciones de materia orgánica e incluso son considerados indicadores de altos niveles de contaminación (Peña *et al.*, 2005).

CONCLUSIONES

De acuerdo a los resultados obtenidos, se concluye que hubo cambios significativos en la calidad de agua y en la comunidad algal de la laguna de alta tasa fotosintética a lo largo del periodo de estudio. En la primera fase se obtuvieron las menores concentraciones de compuestos orgánicos y nutrientes que coincidió con

el aumento considerable en la densidad de phylum Cryptophyta. La segunda fase se caracterizó por tener las concentraciones más altas de nutrientes asociadas a la mayor diversidad de microalgas del estudio. Finalmente, la tercera fase presentó los mayores valores de concentración de materia orgánica, que coincidieron con la dominancia de phylum Euglenophyta. Por tanto las especies que dominaron en la laguna algal de alta tasa fotosintética estuvieron determinadas tanto por la presencia de nutrientes y compuestos orgánicos como por los cambios en sus concentraciones. Por último, se puede señalar que estos estudios son importantes ya que el conocimiento de la composición y diversidad de las comunidades algales permite la toma de decisiones en el mantenimiento y buen desempeño de estos sistemas.

AGRADECIMIENTOS

A Colciencias y a la Universidad del Valle por su apoyo económico a través del programa “Jóvenes Investigadores e Innovadores”.

REFERENCIAS

- Amengual-Morro, C., G. Moyà-Niell & A. Martínez-Taberner. 2012. Phytoplankton as bioindicator for waste stabilization ponds. *J. Environ. Manage.*, 95: 71-76.
- American Public Health Association (APHA). 2012. Standard methods for the examination of water and wastewater. APHA-AWWA-WPCF, Washington, 1496 pp.

- Assemany, P.P., M.L. Calijuri, E. de Aguiar do Couto, M.H. Batalha de Souza, N.C. Silva, A. da Fonseca & J. de Siqueira-Castro. 2015. Algae/bacteria consortium in high rate ponds: influence of solar radiation on the phytoplankton community. *Ecol. Eng.*, 77: 154-162.
- Bicudo, C.E. & N. Menezes. 2006. Géneros de algas de aguas continentales do Brasil. Chave para identificação e descrições. RIMA, São Paulo, 490 pp.
- Bugaseo S.A. 2009. Informe del sistema de tratamiento de lixiviado. Relleno Sanitario Regional Presidente, Buga, 15 pp.
- Calero, S., M. Segura, C. Rojo & M.A. Rodrigo. 2015. Shifts in plankton assemblages promoted by free water surface constructed wetlands and their implications in eutrophication remediation. *Ecol. Eng.*, 74: 385-393.
- Chekroun, K.B., E. Sánchez & M. Baghour. 2014. The role of algae in bioremediation of organic pollutants. *Int. Res. J. Public Environ. Health*, 1(2): 19-32.
- Craggs, R.J., S. Heubeck, T.J. Lundquist & J.R. Benemann. 2011. Algal biofuels from wastewater treatment high rate algal ponds. *Water Sci. Technol.*, 63(4): 660-665.
- De Feo, M. & C. Malvano. 2009. The use of LCA in selecting the best MSW management system. *Waste Manage.*, 29: 1901-1915.
- García, J., M. Hernández-Mariné & R. Mujeriego. 2000. Influence of phytoplankton composition on biomass removal from high-rate oxidation lagoons by means of sedimentation and spontaneous flocculation. *Water Air Soil Poll.*, 72(2): 230-237.
- Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales. 2009. Procedimiento para el muestreo de aguas y sedimentos para determinación de metales, República de Colombia. Subdirección de Estudios Ambientales, IDEAM, 11 pp.
- Khattabi, H., L. Aleya & J. Mania. 2006. Spatio-temporal distribution and characterization of phytoplankton populations coupled with abiotic and biotic changes in landfill leachate treatment basins (Etuffont, Belfort, France). *Water Air Soil Pollut.*, 174: 107-125.
- Margalef, R. 1983. *Limnología*. Ediciones Omega S.A., Barcelona, 1024 pp.
- Obersteiner, G., E. Binner, P. Mostbauer & S. Salhofer. 2007. Landfill modeling in LCA-A contribution based on empirical data. *Waste Manage.*, 27: 58-74.
- Pagand, P., J.P. Blancheton, J. Lemoalle & C. Casellas. 2000. The use of high rate algal ponds for the treatment of marine effluent from a recirculating fish rearing system. *Aquaculture*, 31: 729-736.
- Park, J. & R. Craggs. 2010. Wastewater treatment and algal production in high rate algal ponds with carbon dioxide addition. *Water Sci. Technol.*, 61(3): 633-639.
- Park, J. & R. Craggs. 2011. Algal production in wastewater treatment high rate algal ponds for potential biofuel use. *Water Sci. Technol.*, 63(10): 1758-1764.
- Park, J., R.J. Craggs & N. Shilton. 2011. Wastewater treatment high rate algal ponds for biofuel production. *Bioresour. Technol.*, 102(1): 35-42.
- Peña, E., M.L. Palacios & N. Ospina. 2005. Algas como indicadores de contaminación. Programa Editorial Universidad del Valle, Cali, 164 pp.
- Pham, D.T., G. Everaert, N. Janssens, A. Alvarado, I. Nopens & P.L.M. Goethals. 2014. Algal community analysis in a waste stabilization pond. *Ecol. Eng.*, 73: 302-306.
- Raja, S., K.P.B. Dinesh & K. Kesavan. 2014. Bioremediation by using of microbes and algae with special reference to coastline environment. *Int. J. Biosci. Nanosci.*, 1(6): 130-140.
- Renou, S., J.G. Givaudan, S. Poulain, F. Dirassouyan & P. Moulin. 2008. Landfill leachate treatment: review and opportunity. *J. Hazard Mater.*, 150: 468-493.
- Shantala, M., S.P. Hosmani & B.B. Hosetti. 2009. Diversity of phytoplankton in a waste stabilization pond at Shimoga Town, Karnataka State, India. *Environ. Monit. Assess.*, 151: 437-443.
- Valigore, J.M. 2011. Microbial (Microalgae-Bacteria) biomass grown on municipal wastewater for sustainable biofuel production. University of Canterbury, Christchurch, 164 pp.
- Villafañe, V.E. & F.M. Reid. 1995. Métodos de microscopía para la cuantificación del fitoplancton. In: K. Alveal, M. Ferrario, E. de Oliveira & E. Sar (eds.). *Manual de métodos ficológicos*. Universidad de Concepción, Concepción, pp. 169-185.
- Wehr, J.D. & R.G. Scheath. 2003. *Freshwater algae of North America. Ecology and classification*. Academic Press, Elsevier Sciences, San Diego, 917 pp.
- Wetzel, R. & G. Likens. 2000. *Limnological analyses*. Springer, United States of America, 429 pp.
- Zaixso, H. 2002. *Manual de campo para el muestreo de columna de agua*, San Juan Bosco, Comodoro Rivadavia, 191 pp.