

## Artículo científico

**Análisis del crecimiento de algas generadas en agua residual del efluente de un filtro percolador**

Mario Zea Cano  
Ingeniero civil MSc. en ingeniería sanitaria  
ERIS USAC GUATEMALA  
Félix Alan Douglas Aguilar Carrera  
MSc. ingeniero civil, profesor Escuela Regional de Ingeniería Sanitaria ERIS USAC  
Dirección para recibir correspondencia aguilarfelix2013@gmail.com  
Recibido: 03.03.2016      Aceptado: 08.04.2016

**Resumen**

Para el análisis del crecimiento de algas provenientes de los filtros percoladores de las Plantas de tratamiento Arturo Pazos Sosa y USAC en ambientes naturales, se estableció una metodología de muestreo en base a la investigación de Moreno, Medina y Albarracín, la cual permitió determinar los aspectos metodológicos de muestreo, identificación y cuantificación de algas, esta última realizada según el método de conteo de Plankton estándar con grilla tipo Sedgwick-Rafter. Para la determinación del número de muestras a analizar se empleó la metodología establecida en el Standard Methods, método 1060 B, de los métodos normalizados para el análisis de aguas residuales, el cual, arrojó un resultado de 20 muestras las cuales fueron tomadas de los filtros percoladores en recipientes inoculados de vidrio de 600ml de capacidad. El trabajo realizado logró resultados favorables en la identificación de algas clorofitas desarrolladas de forma natural (en condiciones naturales de iluminación y temperatura ambiente), obteniéndose un promedio de producción de algas clorofitas que oscila entre 481 y 13,718 células por mililitro. Durante el desarrollo del artículo, fue posible identificar dos especies de algas clorofitas, la *scenedesmus* sp, y la *chlorella* sp, las cuales en estudios realizados por Mahapatra, Chanakya y Ramahandra, lograron eficiencias aceptables en la remoción de nutrientes. Adicional a las especies que se buscaban encontrar en el efluente de filtros percoladores ya en una etapa más avanzada de eutrofización del sistema, se encontraron especies de algas diatomeas, cianofitas, zooplancton y cianobacterias. El rango en que oscilo el número total de microorganismos fue de 992 hasta 119,332 células por mililitro, por lo tanto, se infiere que el porcentaje de biomasa algal que corresponde a las algas clorofitas oscila entre el 33 y 38%. Este estudio abre la posibilidad de desarrollar tecnologías apropiadas para los países centroamericanos que puedan aprovechar los procesos biológicos de producción de algas clorofitas en agua residual como tratamiento terciario para la remoción de nutrientes en el mismo medio y cerrar el círculo de consumo y producción en sistemas de eutrofización acelerada mediante el uso de los organismos más básicos de la cadena trófica en la remoción de nutrientes.

**Palabras clave:** Algas clorofitas, remoción de nutrientes, eutrofización, tratamiento terciario.

**Abstract**

*Nutrient removal in wastewater has become in recent years a topic of wide discussion in the scientific community, due to the impacts posed to water resources in contact with high levels of nutrients. A lot of water resources are exposed to accelerated eutrophication processes, one of the main causes for it are the discharges of wastewater. This situation has prompted several researchers to develop technologies for nutrient removal, one of these is the use of chlorophyte algae. Several studies, have had favorable results in the laboratory by inoculating different species of chlorophyte algae, therefore it is important to establish whether is possible or not that residual water from trickling filters can promptly develop chlorophyte algae naturally (without inoculation) and determine the biomass that can be generated in this type of application. The study achieved favorable results in identifying chlorophytes algae developed naturally (in natural conditions of lighting and temperature), obtaining an average production of chlorophytes algae ranging between 481 and 13,718 cells per milliliter. During the study, it was possible to identify two species of algae *Scenedesmus* sp., and *Chlorella* sp., which in studies conducted by (Mahapatra, Chanakya, & Ramahandra, 2013) , have reached acceptable efficiencies in nutrient removal. This study opens the possibility to develop appropriate technologies for Central American countries, for using biological process with chlorophytes algae in wastewater for nutrient removal in a third degree stage.*

**Keywords:** Chlorophytes algae, nutrient removal, eutrophication, third degree stage.

## Introducción

El agua es considerada la base de la vida del planeta tierra. La calidad de vida de los seres humanos depende directamente de la calidad del agua, debido a que esta sustenta la salud de los ecosistemas y el bienestar de las personas. Como ejemplo de esto las Naciones Unidas, estiman que la mala calidad del agua, genera al año la muerte a más de 1.5 millones de niños (UNICEF, 2014). Esta situación ha motivado a realizarse investigaciones que permitan reducir el nivel de polución del agua disponible en el planeta, habiéndose desarrollado diversas tecnologías de tratamiento que utilizan procesos de tipo físico, químico y biológico.

Uno de los procesos de tipo biológico que se ha estado investigando en diversos países, es la "fitorremediación" considerada como una de las vertientes de la biorremediación (Krämer, 2005, pág. 133). En esta se usan plantas (Melcer y Post, 2004; Vassilev et al., 2004) y algas (Kirk y Cain, 1996) que almacenan y eliminan sustancias tóxicas, como metales, mediante procesos metabólicos (Le Duc y Terry, 2005) citado por (Batista García & Sánchez Reyes, 2009, pág. 2).

Uno de los pioneros en la utilización de algas en el tratamiento de agua residual es el Dr. William J. Oswald, quien realizó varios trabajos de investigación asociados a la producción de algas en aguas residuales tratadas a través de sistemas de lagunas. En el año 1955, el Dr. W.J. Oswald, realiza una descripción detallada del proceso de fotosíntesis que se lleva a cabo en las aguas residuales (Oswald & Gotaas, *Photosynthesis in sewage treatment*, 1955), estudio que desembocó en una serie de publicaciones que lo llevó a analizar el problema de la eutrofización de algunos lagos como el lago Washington, lago Zoar (Connecticut), asociando este problema al crecimiento de algas y la presencia de nutrientes en estos cuerpos de agua generados estos por el crecimiento poblacional, lo cual se resume muy acertadamente en su expresión "cuando hay una gran cuenca, y esta está muy poblada, la eutrofización es inevitable" (Oswald, *Eutrophication trends in the United States - a problem?*, 1966).

Algunas de las especies de microalgas que se han experimentado en el tratamiento de aguas residuales son la *Chlorella* sp, *Chlorella sorokiniana* y la *Chlorella vulgaris*, *Scenedesmus* sp., las cuales se han producido en cultivos individuales, mixtos e inmovilizados (Sriram & Seenivasan, 2012, pág. 10).

En el presente artículo se analiza el comportamiento del crecimiento de algas generadas de forma natural en el efluente de un tratamiento secundario de agua

residual, realizado a través de filtros percoladores. El objetivo del estudio, es determinar el volumen de crecimiento de algas y su respectiva caracterización.

## Metodología

Para determinar el tipo y cantidad de algas presentes en el estudio fue necesario realizar una serie de observaciones con la finalidad de determinar si existe crecimiento de algas y el tiempo en que este se lleva a cabo. Para esto, la muestra fue observada por un período de 14 días, período en la cual se analizó el color aparente y se observaron los cambios físicos producidos en ese período para identificar el crecimiento máximo de algas. La muestra de agua residual utilizada provino del efluente del sistema de filtros percoladores de la planta de tratamiento de agua residual de la Universidad de San Carlos de Guatemala (USAC) y de la planta piloto de la Escuela Regional de Ingeniería Sanitaria a partir de la premisa que en el séptimo día se presenta el máximo crecimiento de biomasa algal (Moreno Marín, 2008, pág. 148 y 149).

Se utilizó un método cualitativo con microscopía óptica con el apoyo de una iconografía para facilitar su identificación (Llimona, 1985; Streble, 1987; Toja 2005). Se aplicó lugol a la muestra recolectada con el objetivo de determinar la presencia de clorofila intraplástica y de esta forma identificar más fácilmente las algas clorofitas presentes en la muestra de agua residual analizada.

Para determinar la cantidad de algas presentes, se utilizó un método cuantitativo, definiendo un área fija de la cámara de conteo. El método utilizado fue el de Neubauer (Moreno Marín, 2008). La muestra utilizada fue la misma que se utilizó en la identificación de especies de microalgas.

Al finalizar el proceso de muestreo, se realizó el análisis estadístico, con el objetivo de establecer la especie de alga y la cantidad de estas, presentes en el agua residual proveniente de plantas del efluente de filtros percoladores.

Para preservar muestras con solución de Lugol se agregaron 0.3 mL de solución de Lugol a 100 mL de agua de la muestra y se preservaron en la oscuridad. Para la investigación se utilizó una Grilla tipo Sedgwick-Rafter (S-R), esta grilla es el artefacto usualmente utilizado para el conteo de organismos grandes, debido a que es fácil de manipular, necesita un bajo poder de magnificación (hasta 200X), provee información cuantificable y razonablemente acertada; básicamente está compuesta de una capacidad de volumen de muestra específica y una grilla Whipple,

la cual es una cuadrícula graduada que se introduce en un microscopio convencional.

Las grandes desventajas que posee la S-R es precisamente asociada al hecho de que no se pueden utilizar lentes con mayor poder magnificante, por lo tanto, este tipo de grilla no es recomendado para el análisis de nanoplankton. Afortunadamente para el presente estudio, no se evalúan especies que se encuentren fuera del rango de observación de la grilla S-R. La grilla S-R tiene 50mm de largo por 20mm de ancho y 1mm de alto, el área total del fondo es aproximadamente 1000mm<sup>2</sup>, y el volumen total es aproximadamente 1 mL.

Para el conteo en la grilla S-R, se utilizó la expresión siguiente:

Ecuación (1)

$$\frac{\text{No de Celulas}}{\text{mL}} = \frac{C \cdot 1000 \text{mm}^3}{L \cdot W \cdot D \cdot S}$$

Dónde:

- C: Numero de organismos contados
- L: Longitud de cada fila (Largo de la cámara S-R 50mm)
- D: Profundidad o altura de la fila, (Alto de la cámara S-R 1mm)
- W: Ancho de la fila (Longitud normal de la cuadrícula tipo Wipple)

Para determinar el número de especímenes se utilizó la expresión:

Ecuación (2)

$$\text{Numero de celulas por mL} = \left( \frac{R1 + R2}{2} \right) * \frac{1000}{150}$$

Dónde:

- R1= x1 + x2 + x3 (conteo preliminar)
- R2: y1 + y2 + y3 (segunda observación preliminar)

## Resultados

### a) Identificación de algas en el efluente de filtros percoladores

Las algas identificadas en las muestras tomadas del efluente de los filtros percoladores de la planta de tratamiento de la Universidad de San Carlos y de la planta piloto de la Escuela Regional de Ingeniería Sanitaria (ERIS) "Ingeniero Arturo Pazos" luego de tenerlas en observación durante 7 días fueron:

- Cianofitas
- Diatomeas
- Clorofitas

- Zooplancton
- Cianobacterias

Figura 1 "Diatomea Navicula Sp. Identificada en agua residual de filtros percoladores"

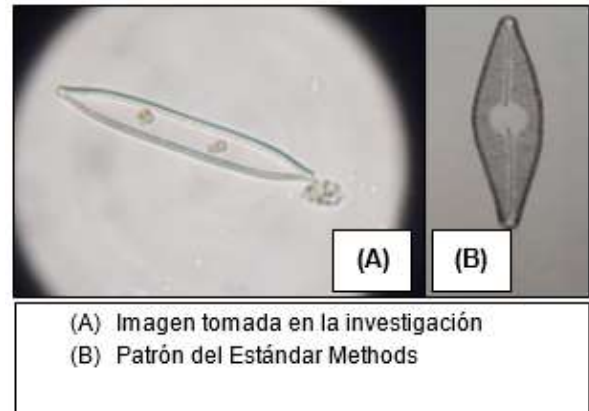


Figura 2 "Clorofita Chlorella Sp. Identificada en agua residual de filtros percoladores"

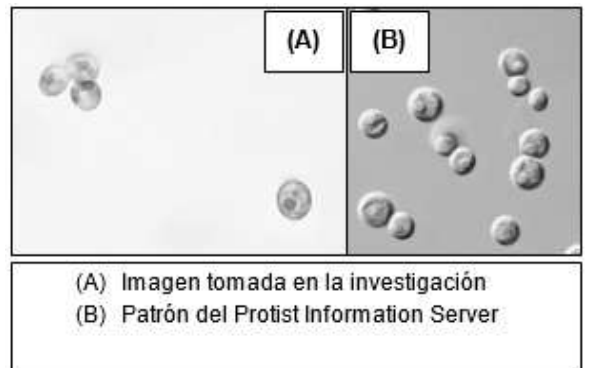


Figura 3 "Clorofita *Actinotaenium Curtum*. Identificada en agua residual de filtros percoladores"



La desviación estándar global de los datos para nutrientes se tiene un nivel de incerteza del 10 al 25 % y un rango de  $\pm 20\%$   $s = 0,02$  (2%),

Incerteza del método de medición de nitrógeno y fósforo  $0,001 \leq U \leq 0,05$  se evalúa  $U = 0,015$  y  $U = 0,02$

Con dicho resultado se procede a interpolar un nivel de confianza del 95% y se establece que el número de muestras por tomar debe estar entre 7 y 11 debido a que los diferentes especímenes de alga tienen variabilidad en su ocurrencia; se tomó un valor crítico de observación que cubra la confianza esperada, el cual fue de 10 muestras, las cuales se evaluaron inmediatamente después de la toma de muestra y según la metodología, exactamente siete días después, a partir de la premisa que en el séptimo día se presenta el máximo crecimiento de biomasa algal (Moreno Marín, 2008, pág. 148 y 149).

Se llevó a cabo el proceso de cuantificación de algas como se observa en las tablas 1 y 2, se realizaron las distribuciones porcentuales de algas por familia como se muestra en las figuras 1 y 2 y finalmente el análisis estadístico de las diferentes especies tanto en la planta de USAC como en la de ERIS, análisis representado en las tablas 3 y 4.

De la familia de las cianofitas se destacan las algas *Microsistis Sp.*

De la familia de las diatomeas se destacan las algas *Navicula Sp.*, *Fragilaria Sp.*, y *Aulacoseira Sp.*

De la familia de clorofitas se destacan las algas *Chlorella Sp.* y *Scenedesmus Sp.*

**b) Conteo de algas presentes en el agua residual efluente de filtros percoladores**

Mediante la aplicación del método 1060 B, de los métodos normalizados para el análisis de aguas residuales y agua potable, se determinaron los niveles de confianza conforme al siguiente modelo:

$$N \geq \left(\frac{ts}{U}\right)^2$$

Dónde:

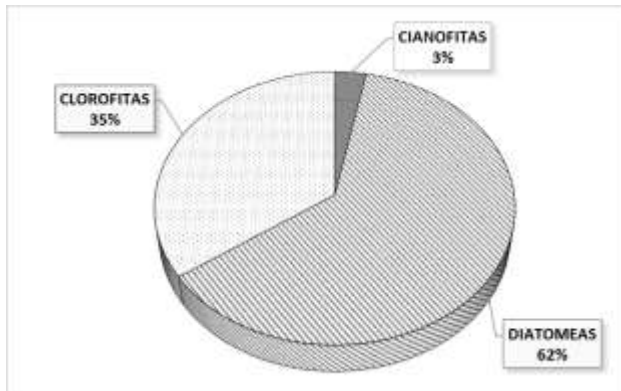
- N = número de muestras
- t = para un nivel de confianza determinado
- s = desviación estándar global
- U = es el nivel de incerteza, nivel aceptable de incertidumbre

Tabla 1 "Cuantificación de algas en la salida de filtros percoladores de la planta de tratamiento de la Universidad de San Carlos de Guatemala"

| MUESTRA | CIANO-FITAS | DIATO-MEAS | CLORO-FITAS | ZOO-PLANCTON | CIANO-BACTERIAS | TOTAL ALGAS |
|---------|-------------|------------|-------------|--------------|-----------------|-------------|
| 1       | 33          | 599        | 52          | -            | -               | 684         |
| 2       | 126         | 1,614      | 193         | -            | -               | 1,933       |
| 3       | 20          | 2,126      | 246         | -            | -               | 2,392       |
| 4       | 59          | 219        | 2,066       | -            | -               | 2,344       |
| 5       | 40          | 138        | 666         | -            | -               | 844         |
| 6       | 26          | 466        | 500         | -            | -               | 992         |
| 7       | 12          | 666        | 26          | -            | -               | 704         |
| 8       | 19          | 673        | 1,000       | -            | -               | 1,692       |
| 9       | 60          | 1,206      | 13          | 13           | -               | 1,292       |
| 10      | 33.00       | 913.00     | 46.00       | 0            | -               | 992.00      |

Medido en Celulas/mililitro

Figura 4 “Distribución del tipo de algas en el efluente del filtro percolador de la planta de tratamiento de la Universidad de San Carlos de Guatemala”



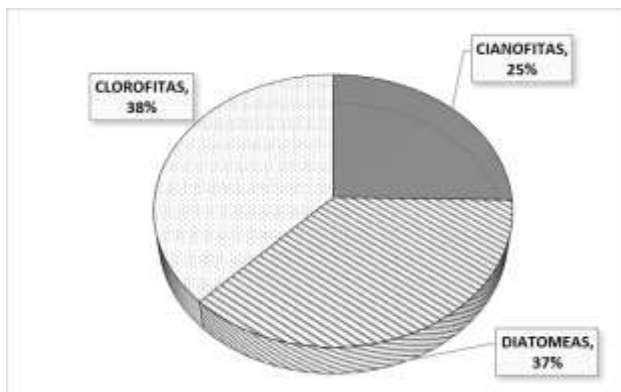
Fuente: elaboración propia

Tabla 2 “Cuantificación de algas en la salida de filtros percoladores de la planta de tratamiento piloto de la Escuela Regional de Ingeniería Sanitaria”

| MUESTRA | CIANO-FITAS | DIATO-MEAS | CLORO-FITAS | ZOO-PLANCTON | CIANO-BACTERIAS | TOTAL ALGAS |
|---------|-------------|------------|-------------|--------------|-----------------|-------------|
| 1       | -           | -          | 9,950       | -            | -               | 9,950       |
| 2       | 11,950      | -          | 150         | -            | 800             | 12,100      |
| 3       | 5,300       | 1,000      | 4,150       | -            | 150             | 10,450      |
| 4       | 8,800       | 8,300      | 20,650      | -            | -               | 37,750      |
| 5       | 500         | 150        | 3,950       | -            | -               | 4,600       |
| 6       | 19,999      | 1,000      | 15,000      | -            | -               | 35,999      |
| 7       | 15,499      | 34,166     | 17,666      | -            | -               | 67,331      |
| 8       | 17,166      | 10,666     | 21,499      | -            | -               | 49,331      |
| 9       | 12,666      | 70,666     | 36,000      | -            | -               | 119,332     |
| 10      | -           | 8,166.00   | 8,166.00    | 0            | -               | 16,332.00   |

Medido en Celulas/mililitro

Figura 5 “Distribución del tipo de algas en el efluente del filtro percolador de la planta de tratamiento piloto de la Escuela Regional de Ingeniería Sanitaria”



Fuente: elaboración propia

Tabla 3 “Condiciones estadísticas de la muestra correspondiente al agua residual del efluente del filtro percolador de la planta de tratamiento de la Universidad de San Carlos de Guatemala”

| USAC                      | CIANOFITAS | DIATOMEAS | CLOROFITAS |
|---------------------------|------------|-----------|------------|
| Media                     | 43         | 862       | 481        |
| Mediana                   | 33         | 670       | 220        |
| Moda                      | 33         |           |            |
| Desviación estándar       | 33         | 626       | 646        |
| Coefficiente de variación | 78         | 73        | 134        |
| Curtosis                  | 4          | 0         | 4          |

Fuente: elaboración propia

Tabla 4 “Condiciones estadísticas de la muestra correspondiente al agua residual del efluente del filtro percolador de la planta de tratamiento de la Escuela Regional de Ingeniería Sanitaria”

| ERIS                      | CIANOFITAS | DIATOMEAS | CLOROFITAS |
|---------------------------|------------|-----------|------------|
| Media                     | 9,188      | 13,411    | 13,718     |
| Mediana                   | 10,375     | 4,583     | 12,475     |
| Moda                      |            |           |            |
| Desviación estándar       | 7,451      | 22,641    | 10,741     |
| Coefficiente de variación | 81         | 169       | 78         |
| Curtosis                  | -          | 2         | 5          |

Fuente: elaboración propia

Este estudio mantiene consistencia con trabajos realizados recientemente, en los cuales se ha encontrado crecimiento de algas de la especie *Chlorella* (familia de las clorofitas) en aguas residuales crudas (Wang, 2010, citado por (Krishna, Dev, & Thankamani, 2012, pág. 50)) y (Ruiz Martínez, 2011, pág. 84), quien encontró mayoritaria presencia de algas *Scenedesmus* (familia de las clorofitas) como se observa en la tabla 5 en un sistema semicontinuo con agua residual proveniente de una planta de tratamiento de tipo anaerobia.

Tabla 5 “Especies de alga que se desarrollan en agua residual”

| Tipo de agua residual   | Especie de alga             | Productividad de biomasa (mg L <sup>-1</sup> día <sup>-1</sup> ) | Referencia             |
|-------------------------|-----------------------------|--|------------------------|
| Agua residual Municipal | <i>Scenedesmus obliquus</i> | 23   | Martínez et al.,2000   |
|                         | <i>Botryococcus braunii</i> | 345.60   | Orpez et al., 2009     |
| Industrial              | <i>B. braunii</i>           | 34   | Chinnasamy et al.,2010 |

Fuente: (Krishna, Dev, & Thankamani, 2012, pág. 50)

Finalmente García (2000) y Martínez (1993) citados por (Moreno Marín, 2008, pág. 51) expresaron que "las especies *Chlorella* sp., y *Scenedesmus* sp., dominan naturalmente la mayoría de los sistemas de tratamiento continuos basados en microalgas", aspecto que se confirma con los resultados obtenidos de la cuantificación de algas realizada al afluente de los sistemas de tratamiento objeto de este estudio.

## Análisis y discusión de resultados

Del estudio realizado, se puede apreciar la presencia de algas clorofitas en todas las muestras tomadas tanto del agua residual proveniente de filtros percoladores de la planta de tratamiento de la Universidad de San Carlos de Guatemala como de la planta de tratamiento de la Escuela Regional de Ingeniería Sanitaria, presentando valores entre el 35% y 38% del total de algas identificadas (ver Figura 4 y Figura 5).

Un aspecto importante observado, es la dispersión encontrada entre las muestras, habiéndose obtenido valores desde 72% a 168% en relación al valor medio de las colonias obtenidas (ver Tabla 3 y Tabla 4), con lo cual puede inferirse la existencia de condiciones variables en cuanto al comportamiento operativo de ambos sistemas de tratamiento, así como características distintas de calidad de agua que pueden estar afectando la variación marcada entre ambas muestras analizadas.

Basado en los resultados de la muestra proveniente de la planta de tratamiento de la Universidad de San Carlos de Guatemala, y considerando el porcentaje de algas clorofitas presentes en dichas muestras, se podría decir que estas se ubican en las etapas iniciales de la eutrofización (Nestor Mazzeo), mientras la presencia de las familias diatomeas y cianofitas que representan el 62% y 3% respectivamente representan el inicio de la etapa intermedia de eutrofización mejor conocida como mesotrofia.

El avance de estado oligotrófico a eutrófico del cuerpo de agua se evidencia no solamente en el comportamiento del parámetro de color observado inicialmente, sino también en el cambio de especies con respecto al paso del tiempo de cultivo, la baja presencia de algas cianobacterias significa que el agua aún no alcanza el estado eutrófico o hipertrófico, y que dentro de los 7 días se alcanza un estado mesotrófico temprano.

Se puede observar que el tipo de alga que crece, depende de las características del agua residual, aún así sea agua residual de tipo doméstica, aspecto que se observa al tenerse en el agua residual proveniente de la planta de tratamiento de la Universidad de San

Carlos de Guatemala, un 35% de clorofitas, 62% de diatomeas y 3% de cianofitas; mientras que en el agua residual de la planta de tratamiento de la Escuela Regional de Ingeniería Sanitaria se obtiene un 38% de clorofitas, 25% de cianofitas y 37% de diatomeas.

## Conclusiones

El agua residual proveniente de filtros percoladores, presenta características que permiten el desarrollo de algas cianofitas, diatomeas y clorofitas.

De la familia clorofitas, se identificaron las algas *Chlorella* sp., y *Scenedesmus* sp., las cuales se encuentran en estudio para realizar remoción de nutrientes en agua residual, según recientes estudios realizados por (Sriram & Seenivasan, 2012), (Mahapatra, Chanakya, & Ramahandra, 2013) y (Cho, Luong, Lee, Oh, & Lee, 2011) entre otros.

Las algas clorofitas ocupan entre el 33% y 38% del volumen total de biomasa algal producido de forma natural en agua residual proveniente de filtros percoladores.

La producción promedio de algas clorofitas en el agua proveniente del filtro percolador de la planta de tratamiento de agua residual de la Universidad de San Carlos es de 481 células por mililitro, con una desviación estándar de 645 células por mililitro.

La producción promedio de algas clorofitas en el agua proveniente del filtro percolador de la planta de tratamiento de agua residual de la Escuela Regional de Ingeniería Sanitaria es de 13,718 células por mililitro, con una desviación estándar de 10,741 células por mililitro.

La producción natural de algas clorofitas en agua residual proveniente de filtros percoladores muestra una alta variación (134% en la planta de tratamiento de la Universidad de San Carlos de Guatemala y 78% en la planta de tratamiento de la Escuela Regional de Ingeniería Sanitaria) en relación a la biomasa generada, lo cual puede deberse a la calidad del agua residual y las condiciones operativas de cada sistema de tratamiento (períodos de retención, dilución de agua residual).

## Reconocimientos

Nuestro más sincero agradecimiento a los Ingenieros Adán Pocasangre, Joram Gil y Jose Sandoval por su orientación en la elaboración de este artículo y al ingeniero Zenón Much por su apoyo en el análisis de laboratorio realizado, así mismo al cuerpo docente de ERIS por la asesoría dada para el desarrollo del presente documento.

## Referencias

- APHA-AWWA-WPC. (1960). Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater, Eleventh. EUA: APHA.
- Bermeo Castillo, L. E. (2011). Estudio del cosechado de cultivos de microalgas en agua residual mediante técnicas de centrifugado. España: Universidad Técnica Particular de la Loja.
- Bitton, G. (2005). Wastewater microbiology. United States of America: John Wiley & Sons, Inc. .
- Cho, S., Luong, T. T., Lee, D., Oh, Y.-K., & Lee, T. (2011). Reuse of effluent water from a municipal wastewater treatment plant in microalgae cultivation for biofuel production. Korea: Elsevier Ltd.
- Hernández Muñoz, A. (1998). Depuración de aguas residuales. España: Colegio de Ingeieros de Caminos, Canales y Puertos.
- Hernández Reyes, B., Rodríguez Palacio, M., Lozano Ramírez, C., & Castilla Hernández, P. (2012). Remoción de nutrientes por tres cultivos de microalgas libres e inmovilizados. Revista Latinoamericana Biotecnología Ambiental Algal, 80-94.
- Krishna, A. R., Dev, L., & Thankamani, V. (2012). An integrated process for industrial effluent treatment and Biodiesel production using Microalgae. India: Research in Biotechnology.
- Lara Borrero, J. (2002). Eliminación de nutrientes mediante procesos de membrana. Madrid, España: Universidad Politécnica de Madrid.
- Mahapatra, D. M., Chanakya, H. N., & Ramahandra, T. V. (2013). Treatment efficacy of algae-based sewage treatment plants. India: Springer.
- Metcalf & Eddy, Inc. (1996). Ingeniería de Aguas Residuales, Tratamiento, Vertido y Reutilización (Tercera ed.). Mexico: McGraw Hill Interamericana Editores S.A de C.V.
- Moreno Marín, A. (2008). Fotobiorreactor cerrado como método de depuración de aguas residuales urbanas. Sevilla: Escuela Universitaria de Ingenieros Técnicos Agrícolas de la Universidad de Sevilla.
- Moreno, J. R., Medina, C. D., & Albarracín, V. H. (2012). Aspectos ecológicos y metodológicos del muestreo, identificación y cuantificación de cianobacterias y microalgas eucariotas. Reduca (Biología). Serie Microbiología.
- Moreno, M., Naranjo, B., & Koch, A. (2010). Evaluación de dos métodos para la reducción de nitrógeno, fósforo y DQO de aguas residuales, mediante un cultivo axénico de cianobacterias y un consorcio microbiano, inmovilizados y en suspensión. Revista CIENCIA, 13(1), 55-61.
- Ruiz Martínez, A. (Abril de 2011). Puesta en marcha de un cultivo de microalgas para la eliminación de nutrientes de un agua residual urbana previamente tratada anaeróbicamente. Valencia, España: Universidad Politécnica de Valencia.
- Salazar Gonzalez, M. (2009). Sistemas integrales de tratamiento de aguas residuales, mediante el uso combinado de digestión anaerobia y microalgas. Contactos 73, 16-22.
- Standard Methods for the examination of water and wastewater, método 1060B año 2002 p. 1-21 Modificado.
- Sriram, S., & Seenivasan, R. (2012). Microalgae cultivation in wastewater for nutrient removal. Journal of algal biomass utilization, 9-13.
- U.S. EPA. (2000). Wastewater Technology Fast Sheet Trickling Filters. Washington: EPA.
- William J. Oswald, C.G. Golueke "EUTROPHICATION TRENDS IN THE UNITED STATES – A PROBLEM?"

## Autores

Ingeniero civil Mario Zea Cano, graduado en la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, gestor de medio ambiente y producción en proyectos hidroeléctricos para CINTREX S.A.

Maestro en ciencias en ingeniería sanitaria e ingeniero civil Félix Alan Douglas Aguilar Carrera, graduado de la Universidad de San Carlos de Guatemala. Profesor titular de la Escuela Regional de Ingeniería Sanitaria, con más de 18 años de experiencia docente y profesional.