

Eficiencia del uso de Microalgas (*Chlorella sp*) del Río Torococha en la Remoción de Nitratos y Fosfatos para el Tratamiento Terciario de Aguas Residuales en un Fotobiorreactor a Escala Laboratorio, Juliaca 2017

Efficiency in the use of Microalgas (*Chlorella sp*) in the Removal of Nitrates and Phosphates in Torococha River for the Tertiary Treatment of Wastewater on a Photobiorreactor, on a Laboratory Scale, Juliaca 2017

Edwin Huayhua Huamani
ehuayhua@unaj.edu.pe - Universidad Nacional de Juliaca
Ricardo Chambi Apaza
ricardochambiapaza@gmail.com - Universidad Nacional de Juliaca
Fiorela Esmeralda Quispe Flores
fiorelaesmeralda121@gmail.com - Universidad Nacional de Juliaca
Edwin Mamani Coyla
edwin.123.4@hotmail.com - Universidad Nacional de Juliaca
Reyna Gaby Quispe Acra
gali_angell1@hotmail.com - Universidad Nacional de Juliaca
Winsthon Fredy Ramos Rojas
wins666_@gmail.com - Universidad Nacional de Juliaca

Resumen

El objetivo del estudio fue determinar el efecto del uso de microalgas en el tratamiento de aguas residuales para la reducción de NO_3 y PO_4 , con un fotobiorreactor a escala laboratorio. Las muestras en estudio fueron extraídas de las aguas del río Torococha y de la laguna de oxidación de la ciudad de Juliaca. Se aisló e inoculó *Chlorella Sp.*, cultivándose en seis reactores, iluminados durante 18 hora/día, con seis lámparas leds en cada fotobiorreactor. El experimento, para la evaluación de muestras in situ de OD con el método winckler, duró un periodo de 12 días. Se usó PCD650 en caso del *pH* y temperatura; posteriormente a la marcha experimental se determinó NO_3 y PO_4 , que fueron analizados por métodos HACH 8048 y HACH 8039 respectivamente, la DQO se hizo por el método APHA-AWWA-WEF 5220 y 2510-B para la conductividad. De los resultados obtenidos se estimó que muchos de los parámetros evaluados in situ mejoran su calidad; a partir de los cinco días, los nitratos y fosfatos empiezan a disminuir notablemente, ya que a los 12 días la población de microalgas empieza a disminuir por falta de nutrientes. La eficiencia de las microalgas en la remoción de nitratos fue de 93% en promedio en los seis fotobiorreactores; pero en el caso de los fosfatos esto no ocurre así, en el FBRT1 se logra reducir en un 85%, en los demás fotobiorreactores la remoción fue menor a 30%. Por lo tanto, la disminución de NO_3 y PO_4 en los fotobiorreactores a escala laboratorio resultaron ser eficientes con respecto a los nitratos, en comparación con los fosfatos.

Palabras claves: Aguas residuales, Fosfatos, Fotobiorreactores, Microalgas, Nitratos.

Abstract

The objective of the study was to determine the effect of the use of microalgae in the treatment of wastewater for the reduction of NO₃ and PO₄, with a photobioreactor on laboratory scale. The samples under research were extracted from the waters of the Torococha River and from Juliaca city Oxidation Lagoon. Microalgae were isolated and *Clorella*SP inoculated, cultivated in six reactors; each photoreactor illuminated with 6 led lamps for 18 hours a day. The insitu OD sample evaluation experiment lasted 12 days. The Winkler method was used. For the PH and temperature, the PCD650 was used, later, the NO₃ and PO₄ were determined, analyzed both by the HACH 8048 and HACH 8039 methods respectively. The DQO was performed by the APHA – AWWA – WEF 5220 method and the 2510-B for conductivity. From the results obtained it was estimated that many of the parameters evaluated in situ improve its quality; after five days, nitrates and phosphates begin to decrease markedly, since after 12 days the microalgae population begins to decrease due to lack of nutrients. The efficiency of microalgae in the removal of nitrates was 93% on average in the six photobioreactors; but in the case of phosphates, this does not happen, in the FBRT1 it is possible to reduce by 85%, in the other photobioreactors the removal was less than 30%. Therefore, the decrease of NO₃ and PO₄ in photobioreactors on laboratory scale was found to be efficient with respect to nitrates, compared to phosphates.

Keywords: Wastewater, Phosphates, Photobioreactors, Microalgae, Nitrates.

Introducción

Las microalgas presentan características únicas y deseables, ya que son una fuente para la producción de biocombustibles, incluyendo un crecimiento rápido y una capacidad de adaptación en diferentes tipos de aguas residuales (Delgadillo, Lopes, Taidi, & Pareau, 2016; Gonçalves, Pires, & Simões, 2017a), de hecho las microalgas tienen mayores ventajas comparadas con otras plantas más grandes: a) se estima que la producción de microalgas es 10 veces más que otras plantas más grandes; b) el crecimiento de microalgas es independiente al cultivo que es sometido (Hernández & Labbé, 2014; Hernández, Riaño, Coca, & García, 2013); c) las microalgas son ricas en lípidos, proteínas y almidón, el cual podría convertirse en energía usando procesos de esterificación, procesos termoquímicos y procesos biológicos para la producción de biodiesel (Abdel-Raouf, Al-Homaidan, & Ibraheem, 2012a; Elizabeth, Castillo, Antonio, & Vargas Machuca, 2011; Hom-Diaz et al., 2017; Rosales Loaiza & Morales, 2007; von Sperling, 2008).

Las microalgas representan una alternativa para el tratamiento de aguas residuales por su capacidad de remoción de nutrientes y alto valor comercial de la biomasa producida (Abdel-Raouf, Al-Homaidan, & Ibraheem, 2012b; Lv et al., 2018; Peltroche, 2015), son un grupo de microorganismos fotosintéticos, obtienen la energía de la luz proveniente del sol y se desarrollan a partir de materia inorgánica, en general son organismos fotoautótrofos que permiten el rápido crecimiento celular por lo tanto una mayor producción de biomasa (Benavente, Montanez, Aguilar, & Zavala, 2012; Gómez, 2007; Orlando et al., 2016); estos microorganismos tienen la capacidad de remover cantidades significativas de nitratos, fosfatos y materia orgánica (Hu, Hao, van Loosdrecht, & Chen, 2017; Martin, 2010; Ozkan & Berberoglu, 2013; Pérez, Campos, & Salgado, 2013); los cuales se encuentran entre los contaminantes peligrosos, ya que constituyen una preocupación para el bienestar de los ecosistemas acuáticos; el Fosfato (PO₄) y Nitrito (NO₂) son elementos muy comunes en las aguas residuales, son movilizados al medio ambiente a través de una combinación de procesos que incluyen procesos naturales (actividad biológica, emisiones volcánicas) y procesos antropogénicos como la

actividad industrial; uso de fertilizantes, pesticidas, herbicidas, desecantes (Gonçalves, Pires & Simões, 2017b; Mohd Udaiyappan, Abu Hasan, Takriff & Sheikh Abdullah, 2017; Pires, Alvim-Ferraz, & Martins, 2017; Pulz, 2001; Rehman & Shakoori, 2004; Saeid & Chojnacka, 2015).

Recientemente la aplicación de microalgas para el tratamiento de aguas residuales han estado investigados por su capacidad de remoción nutrientes y ateria orgánica en simbiosis con bacterias heterótrofas (Aurelio, López, Meas Vong, Ortega, & Oliguín, 2004; García, 2011; Montaña, 2015; Orduz, 2016); el crecimiento de microalgas requiere usar luz como principal fuente de energía, ya que con la luz se desarrollara el proceso de fotosíntesis, quien liberara oxígeno disuelto en el medio acuático, así como la fijación de dióxido de carbono, liberada por los microorganismos presentes, es así que esta simbiosis reduce los nutrientes inorgánicos como NO₃, PO₄, metales y otros concentraciones micro contaminantes en aguas residuales (Camacho, 2015; Contreras et al., 2003; Delgadillo, González, Prieto, & Villagómez, 2011; Fernando et al., 2015; Sacristán, Luna, Cadena & Alva, 2014).

La generación de aguas residuales acentuándose el problema al ser evacuados al río Coata por la topografía discurren en el Lago Titicaca siguiendo un curso de contaminación, deteriorando los ecosistemas acuáticos y de las riberas del río, la contaminación y la falta de tratamiento a las aguas residuales (Sunass, 2008), es un problema palpable en la actualidad en nuestra ciudad de Juliaca, los trabajos investigados de remoción de nutrientes en aguas residuales usando microalgas fueron publicado por (Alexandra et al., 2014; Florez, 2014; Hodges, Fica, Wanlass, Van Darlin, & Sims, 2017; Martin, 2010); ameritando realizar un estudio de las características de las microalgas y la eficiencia que estos pudieran ofrecer en condiciones controladas en la remoción de contaminantes propios de las aguas residuales, debido a todo esto se derivan las siguientes preguntas: ¿Cuál es el efecto del uso de microalgas en la remoción de nitratos y fosfatos dentro del Fotobiorreactor? ¿Bajo qué parámetros dentro del Fotobiorreactores las microalgas son eficientes para reducir la carga de nitratos y fosfatos de aguas del río Torococha?

Dado que las microalgas presentarían alto consumo de nutrientes, es probable que la capacidad de remoción de nitrato y fosfato en aguas del río Torococha sea eficiente; el objetivo de nuestra presente investigación fue determinar la eficiencia de remoción de nitratos y fosfatos en aguas del río Torococha mediante microalgas, en particular utilizando *Chlorella sp.*; los rendimientos de los Fotobiorreactores fueron evaluados en términos de remoción de NO_3 y PO_4 .

Materiales y métodos

Fotobiorreactores y condiciones de cultivo inoculación de *Chlorella sp.*

Chlorella sp. fue obtenida por muestreo en la zona del puente Santa Mónica, ubicada en el riachuelo Torococha, la inoculación de la microalga fue preparada de acuerdo (González, Buitrago & Frontado, 1999; Schmidt, 2007), la temperatura promedio fue de 21°C ; antes de la inoculación las microalgas son centrifugadas (400 RPM) por 15 minutos y seguidamente resuspendido en agua destilada, el lodo aeróbico fue obtenido por muestreo de la misma zona del río Torococha.

Composición de las aguas residuales

Fueron recolectados dos tipos de agua: (a) aguas del río Torococha; (b) aguas de las lagunas de oxidación de la ciudad de Juliaca, para el cual se empleó los principios de muestreo en aguas residuales establecidos por la Autoridad Nacional del Agua (ANA), posteriormente las muestras fueron homogenizadas y almacenadas a 4°C para su futuro uso en los fotobiorreactores.

Tabla 1.
Características de las muestras de aguas residuales del río Torococha y la laguna de oxidación – Juliaca.

Parámetros	Torococha	Laguna de oxidación
DQO (mg/l)	294.00	326.00
DBO ₅ (mg/l)	50.60	65.30
OD (mg/l)	2.86	3.60
PH (mg/l)	8.63	5.30
NO_3 (mg/l)	3.98	4.68
PO_4 (mg/l)	5.40	6.40
Conductividad (uS/m)	1486.00	1432.00

Montaje experimental

Fue desarrollado en laboratorios de la Universidad Nacional de Juliaca (UNAJ). Consistió en la construcción de seis fotobiorreactores de sistema abierto, de libre interacción con la atmósfera, para ambos tratamientos de aguas residuales. Los fotobiorreactores fueron clasificados de acuerdo a su capacidad de volumen (10.8 y 6 litros) (Aguilar *et al.*, 2011); cada fotobiorreactor fue iluminado usando 6 lámparas leds (Philips 9 watts) por 18 horas/día. El volumen del agua fue observado diariamente; el agua perdida por evaporación fue compensado adicionando agua destilada. El oxígeno disuelto, el pH y la

temperatura fueron monitoreados in situ, utilizando el water proof cyber Scan PCD650-multiparamétrico.

Los fotobiorreactores fueron repartidos en dos secciones, el primero para aguas residuales obtenidas de las lagunas de oxidación con inoculación de *Chlorella sp.*, el cual fue aislado de aguas del río Torococha, luego la otra parte de Fotobiorreactores son mantenidas con aguas del río Torococha, para todo el tratamiento la retención hidráulica fue de 12 días.

Resultados y discusión

Evaluación de crecimiento de *Chlorella sp.* en diferentes fotobiorreactores

Una vez aislada la *Chlorella sp.*, se inoculó en seis fotobiorreactores FBRT1, FBRT2, FBRT3, FBRL1, FBRL2, FBRL3; los fotobiorreactores presentan medidas diferentes en su altura, así también lo sugieren otros investigadores (Saeid & Chojnacka, 2015; Sukačová, Trtílek & Rataj, 2015; Tuantet *et al.*, 2014; Unc, Monfet, Potter, Camargo & Smith, 2017; Velásquez & Brenes, 2015), quienes mencionan que para la producción óptima de microalgas es determinante la altura del fotobiorreactor, esto debido a la distancia de luz, ya que recibe menos cantidad de iluminación a la superficie, lo cual induce a una baja fotosíntesis. Se observó que a los tres días el crecimiento de microalgas ya era notorio; para cada fotobiorreactor se usó iluminación de focos de 9 watts, con una duración de 36 horas, con su respectiva suspensión de 12 horas en todo el ensayo; para verificar el crecimiento se usó microscopio de 10 a 40X.

El crecimiento de *Chlorella sp.* en cada fotobiorreactor fue distinto, esto debido a las características de las muestras de agua utilizadas del río Torococha y la laguna de oxidación; otros factores que influyeron, fueron la iluminación, la altura de cada fotobiorreactor y la temperatura. Esto coincide con lo mencionado por otros investigadores (Labbé, Ramos-Suárez, Hernández-Pérez, Baeza & Hansen, 2017; S.E.Manaham, 2007; Yang, Cheng, Yang, Zhou & Cen, 2016) quienes dicen que el crecimiento de microalgas depende de las condiciones que se propician para su óptimo crecimiento en los fotobiorreactores.

Variaciones cotidianas

Los resultados obtenidos indican que las variables influenciadas por la fotosíntesis (*OD* y *pH*) han tenido variaciones significativas durante el día, ya que la iluminación del sol influye sobre la iluminación artificial, así como la temperatura interna de cada fotobiorreactor es influenciada por la temperatura externa o ambiente. La influencia del sol tanto en la iluminación y temperatura han sido previamente reportados en otros estudios (Alcántara, Posadas, Guieysse, & Muñoz, 2015; Alexandra *et al.*, 2014; Almeida *et al.*, 2017; Delgadillo *et al.*, 2016; JBARI, 2012; Lizarazo & Gutiérrez, 2013). Durante la noche, la ausencia de la actividad fotosintética en conjunción con la continua respiración de las microalgas y otros microorganismos, provocaron que los valores del

oxígeno disuelto y el pH sean más bajos. La actividad fotosintética de las microalgas comienza a la salida del sol, produciendo el incremento de pH y oxígeno disuelto; algunos investigadores (Aurelio *et al.*, 2004; Bertule *et al.*, 2014; Burkart & Stoner, 2007; Fernando *et al.*, 2015) sugieren que los fotobiorreactores deben estar aislados de la iluminación solar.

Evaluación de remoción de NO₃ y PO₄ en los fotobiorreactores

La eficiencia de remoción de nutrientes como el NO₃ y el PO₄, presentes en las aguas de la laguna de oxidación y del río Torococha, no ha sido similar en todos los casos analizados. Así, los nitratos presentan mayor remoción en todos los fotobiorreactores, a diferencia del PO₄ que solo se observa con mayor eficiencia en el FBRT1; esto debido a que en este reactor hubo condiciones favorables para la formación de biopelículas que ayudaron a una mayor remoción de fosfatos, esto también lo firman otros

investigadores (Aznar, 2000; Coila, 2017; Fernando *et al.*, 2015; Hodges *et al.*, 2017) quienes mencionan que la generación de biopelículas en zonas con microalgas presentan mayor ventaja a la microalgas que no lo hacen, y una de esas ventajas es la mayor eficiencia en remoción de nutrientes, es también claro que para ello se debe considerar otras condiciones propuestas por Sukačová *et al.* (2015) quien propone las condiciones para que las biopelículas generadas por la microalgas sea mucho más eficientes en la reducción de nitratos y fosfatos de aguas residuales. En el experimento, específicamente en el FBRT1, se observa efectivamente la generación de dichas películas por *Chlorella sp.*; el cual indica que el tipo de agua residual, la temperatura y la iluminación, son factores claves para el desarrollo de biopelículas. Debido a ello, en el referido fotobiorreactor, la remoción de NO₃ y PO₄ han sido más efectiva, más detalle se presenta la tabla 2.

Tabla 2.
Porcentaje de remoción de nitratos y fosfatos

	FBRT1	FBRT2	FBRT3	FBRL1	FBRL2	FBRL3
NO ₃ mg/l (CI)	3.98	3.98	3.90	4.68	4.68	4.68
NO ₃ mg/l (CF)	0.30	0.30	0.30	0.30	0.30	0.30
PO ₄ mg/l (CI)	5.70	5.70	5.70	23.50	23.50	23.50
PO ₄ mg/l (CF)	0.82	4.83	5.44	16.75	16.63	22.05
Remoción NO ₃ %	93	93	93	94	94	94
Remoción PO ₄ %	85	28	26	25	25	21

Nota. CI: Condiciones iniciales; CF: Condiciones finales después del tratamiento.

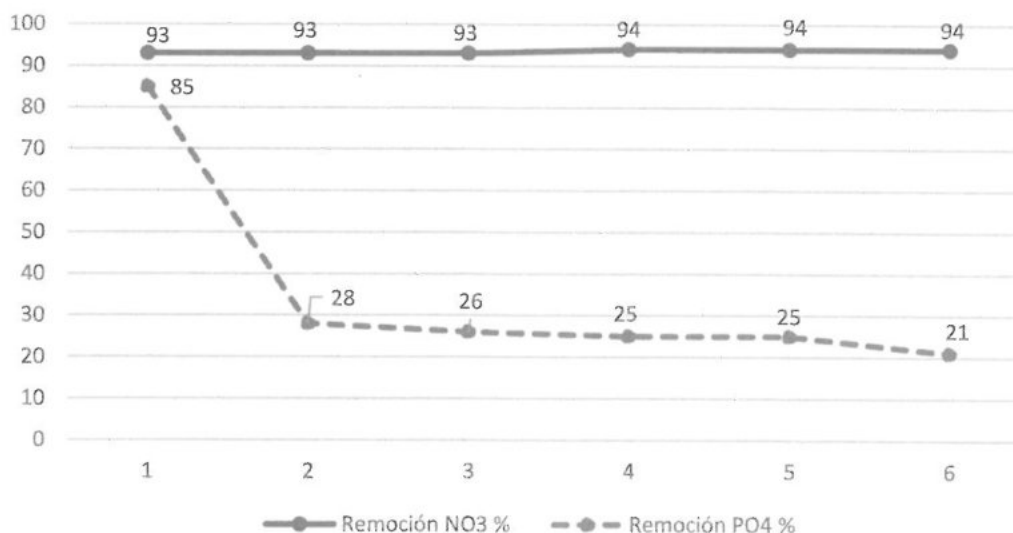


Figura 1. Remoción de nitratos y fosfatos en los Fotobiorreactores.

Conclusiones

Se logró diseñar un sistema de reactores y construir el sistema de iluminación a escala laboratorio, con el fin de poder mantener el cultivo de microalgas durante 12 días, en donde se observó factores de diseño, como la profundidad, el volumen usado las microalgas (*Chlorella sp.*) dentro de un sistema de fotobiorreactores a escala de laboratorio logran la

remoción de NO₃ y PO₄ los cuales resultan ser eficientes con respecto a los nitratos ya que la remoción en todos los fotobiorreactores es un 93%, mientras que los fosfatos están alrededor más bajo en < 30% de remoción; excepto en el FBRT1, una de las razones es por la formación de biopelículas en la etapa experimental, también debido a las condiciones opimas como la temperatura, pH y la iluminación.

De acuerdo al estudio realizado nosotros sugerimos que se haga un estudio más detallado del por qué el elemento inorgánico de fosfato no se logra reducir eficientemente, también los métodos de extracción de la masa residual de microalgas, cuando estas ya finalizan su periodo de consumo de nutrientes (NO_3 y PO_4) de las aguas residuales.

Referencias bibliográficas

- Abdel-Raouf, N., Al-Homaidan, A. A. & Ibraheem, I. B. M. (2012a). Microalgae and wastewater treatment. *Saudi Journal of Biological Sciences*. <https://doi.org/10.1016/j.sjbs.2012.04.005>
- Abdel-Raouf, N., Al-Homaidan, A. A. & Ibraheem, I. B. M. (2012b). Microalgae and wastewater treatment. *Saudi Journal of Biological Sciences*, 19(3), 257–275. <https://doi.org/10.1016/j.sjbs.2012.04.005>
- Aguilar, C. S., Chang, I. A., Tenorio, L. G., Ynga, G. H., Oscanoa, A. H., Flores, L. R., ... García, Flores Ramos, I. (2011). Compendio metodológico para la extracción de lípidos totales a partir de biomasa microalgal proyecto imarpe-fincyt "determinación de la biomasa microalgal potencialmente acumuladora de lípidos para la obtención de combustible." Lima, Peru. Disponible en: <http://www.imarpe.pe>
- Alcántara, C., Posadas, E., Guieysse, B., & Muñoz, R. (2015). Microalgae-based Wastewater Treatment. In *Handbook of Marine Microalgae: Biotechnology Advances*. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-800776-1.00029-7>
- Alexandra, M., Cabrera, C., Fernanda, M., Tenemaza, P., Andrés, I., & Alvarado Martínez, O. (2014). Línea base para el aprovechamiento de microalgas de sistemas de tratamiento de agua residual. Universidad de Cuenca.
- Almeida, A., Carvalho, F., Imaginário, M. J., Castanheira, I., Prazeres, A. R., & Ribeiro, C. (2017). Nitrate removal in vertical flow constructed wetland planted with *Vetiveria zizanioides*: Effect of hydraulic load. *Ecological Engineering*, 99, 535–542. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2016.11.069>
- Aurelio, R., López, N., Meas Vong, Y., Ortega Borges, R., & Olguin, E. J. (2004). Fitorremediación: fundamentos y aplicaciones. *Fitorremediación*, 4, 15.
- Aznar, J. A. (2000). Determinación de los parámetros físico-químicos de calidad de las aguas. Madrid.
- Benavente, R., Montanez, J. C., Aguilar, C. N. & Zavala, A. M. (2012). Tecnología de cultivo de microalgas en fotobiorreactores. *Revista Científica de La Universidad Autónoma de Coahuila*, 4, 13. Disponible en: <https://www.researchgate.net/publication/262560081>
- Bertule, M., Lloyd, J., Korsgaard, L., Dalton, J., Welling, R., Barchiesi, S., & Smith, M. (2014). Nations Environment Programme Publication: Green Infrastructure Guide for Water Management: Ecosystem-based management approaches for water-related infrastructure projects.
- Burkart, M. R., & Stoner, J. D. (2007). Nitrate in aquifers beneath agricultural systems. In *Water Science and Technology*. <https://doi.org/10.2166/wst.2007.436>
- Camacho, J. C. (2015). "Cosechado de microalgas cultivadas en lagunas de alta carga para el tratamiento de aguas residuales: efecto del almidón sobre la floculación y la producción de biogás." UPC.
- Coila, J. C. (2017). Evaluación de la concentración de metales pesados en las aguas superficiales del río Coata. Universidad Nacional del Altiplano.
- Contreras, Coral, Peña, J., Flores, Bernardo, L., ... Olivia. (2003). Avances en el diseño conceptual de fotobiorreactores para el cultivo de microalgas. *Interciencia*, 28(8), 8.
- Delgadillo, E., González, C. A., Prieto, F., & Villagómez, J. R. (2011). Fitorremediación: una alternativa para eliminar la contaminación. *Tropical and Subtropical Agroecosystems*, 14, 597–612.
- Delgadillo, L., Lopes, F., Taidi, B. & Pareau, D. (2016). Nitrogen and phosphate removal from wastewater with a mixed microalgae and bacteria culture. *Biotechnology Reports*, 11, 18–26. <https://doi.org/10.1016/j.btre.2016.04.003>
- Elizabeth, L., Castillo, B., Antonio, J., & Vargas Machuca, P. (2011). Estudio del cosechado de cultivos de microalgas en agua residual mediante técnicas de centrifugado.
- Fernando, J., González, C., Larios-Meño, Taranco, Yennyfer, & Morales, O. (2015). Las aguas residuales y sus consecuencias en el Perú. *Saber y Hacer Revista de La Facultad de Ingeniería de La USIL*, 2, 18.
- Florez Franco, R. O. (2014). Analisis del problema del agua potable y saneamiento: ciudad de puno Situación Actual y Realidad. *Rev. Investig. Altoandin* (Vol. 16). Disponible en: <http://www.unap.edu.pe/oui/ria/>
- Gómez Luna, L. M. (2007). Microalgas: aspectos ecológicos y biotecnológicos (vol. xix).
- Gonçalves, A. L., Pires, J. C. M. & Simões, M. (2017a). A review on the use of microalgal consortia for wastewater treatment. *Algal Research*. <https://doi.org/10.1016/j.algal.2016.11.008>
- Gonçalves, A. L., Pires, J. C. M. & Simões, M. (2017b). A review on the use of microalgal consortia for wastewater treatment. *Algal Research*, 24, 403–415. <https://doi.org/10.1016/j.algal.2016.11.008>
- González, B., Buitrago, E., & Frontado, K. (1999). Evaluación de medios nutritivos para el crecimiento de tres microalgas marinas de uso común en acuicultura (número 151). Venezuela.
- Hernández-Pérez, A. & Labbé, J. I. (2014). Microalgas, cultivo y beneficios. *Revista de Biología Marina y Oceanografía*. <https://doi.org/10.4067/S0718-19572014000200001>
- Hernández, D., Riaño, B., Coca, M. & García-González, M. C. (2013). Treatment of agro-industrial wastewater using microalgae-bacteria consortium combined with anaerobic digestion of the produced biomass. *Bioresource Technology*. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2012.09.029>
- Hodges, A., Fica, Z., Wanlass, J., VanDarlin, J., & Sims, R. (2017). Nutrient and suspended solids

- removal from petrochemical wastewater via microalgal biofilm cultivation. *Chemosphere*. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2017.01.107>
- Hom-Díaz, A., Jaén-Gil, A., Bello-Laserna, I., Rodríguez-Mozaz, S., Vicent, T., Barceló, D., & Blázquez, P. (2017). Performance of a microalgal photobioreactor treating toilet wastewater: Pharmaceutically active compound removal and biomass harvesting. *Science of the Total Environment*. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.02.224>
- Hu, Y., Hao, X., van Loosdrecht, M., & Chen, H. (2017). Enrichment of highly settleable microalgal consortia in mixed cultures for effluent polishing and low-cost biomass production. *Water Research*. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2017.08.034>
- JBARI, N. (2012). Utilización secuencial de microalgas icroalgas en depuración y adsorción de Cr(VI). Universidad de Granada.
- Julio Cèsar, B. R. (2014). Desarrollo de un proceso de remoción de nutrientes de efluentes eutróficos por un consorcio de microalgas nativas de nuevo león, méxico cultivadas en un nuevo fotobiorreactor. Universidad Autónoma de Nuevo León.
- Labbé, J. I., Ramos-Suárez, J. L., Hernández-Pérez, A., Baeza, A. & Hansen, F. (2017). Microalgae growth in polluted effluents from the dairy industry for biomass production and phytoremediation. *Journal of Environmental Chemical Engineering*. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2016.12.040>
- Lizarazo, M., & Gutiérrez, M. I. O. (2013). Sistemas de plantas de tratamiento de aguas residuales. Universidad Nacional de Colombia Facultad.
- Lv, J., Liu, Y., Feng, J., Liu, Q., Nan, F., & Xie, S. (2018). Nutrients removal from undiluted cattle farm wastewater by the two-stage process of microalgae-based wastewater treatment. *Bioresource Technology*. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2018.05.085>
- Martin, F. P. H. (2010). Optimization of photobioreactor for astaxanthin production in chlorella zofingiensis. national university of singapore. Disponible en: <http://scholarbank.nus.sg/bitstream/10635/23745/1/MartinFPH.pdf>
- Mercedes García González. (2011). Producción de biomasa de microalgas rica en carbohidratos acoplada a la eliminación fotosintética de CO₂. Universidad de Sevilla.
- Mohd Udaiyappan, A. F., Abu Hasan, H., Takriff, M. S., & Sheikh Abdullah, S. R. (2017). A review of the potentials, challenges and current status of microalgae biomass applications in industrial wastewater treatment. *Journal of Water Process Engineering*, 20(September), 8–21. <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2017.09.006>
- Montaño, S. A. (2015). Microalgas: aplicaciones e innovaciones en el tratamiento de aguas contaminadas y la producción de biocombustibles. universidad de los andes.
- Orduz, R. D. C. (2016). Las microalgas y el tratamiento de aguas residuales: conceptos y aplicaciones. Una revisión bibliográfica Rubén. Universidad Nacional Abierta y a Distancia.
- Orlando, M., Alfaro, G., Roger, I., Proenza, A., li, R. M., Ajani, I., & li, R. (2016). Dynamic model of a thin layer photobioreactor, used for the cultivation of the microalga *Chlorella* sp. and bacteria in wastewater of high organic load (Vol. XXXVII).
- Orlando, M., Alfaro, G., Roger, I., Proenza-Yero, A., li, R. M.-D., Ajani, I. & li, R.-J. (2017). Modelo dinámico de un fotobiorreactor de capa fina, utilizado para el cultivo de la microalga *Chlorella* sp. y bacterias en aguas residuales de alta carga orgánica Dynamic model of a thin layer photobioreactor, used for the cultivation of the microalga *Chl. cuba*.
- Ozkan, A., & Berberoglu, H. (2013). Physico-chemical surface properties of microalgae. *Colloids and Surfaces B: Biointerfaces*. <https://doi.org/10.1016/j.colsurfb.2013.08.001>
- Peltroche, J. G. J. A. (2015). Evaluación de la remoción de nitratos y fosfatos a nivel laboratorio por microalgas libres e inmovilizadas para el Tratamiento Terciario de Aguas Residuales Municipales. Universidad Ricardo Palma.
- Pérez Rodríguez, C., María, J., Campos, C., & Salgado Silva, V. (2013). Tratamiento de aguas residuales con tecnologías alternativas en una pequeña unidad doméstica-productiva. *UNICIENCIA*, 27(1), 2013. Disponible en: www.revistas.una.ac.cr/uniciencia
- Pires, J. C. M., Alvim-Ferraz, M. C. M., & Martins, F. G. (2017). Photobioreactor design for microalgae production through computational fluid dynamics: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.05.064>
- Pulz, O. (2001). Photobioreactors: Production systems for phototrophic microorganisms. *Applied Microbiology and Biotechnology*. <https://doi.org/10.1007/s002530100702>
- Rehman, A., & Shakoori, A. R. (2004). Tolerance and Uptake of Cadmium and Nickle by *Chlorella* sp., Isolated from Tannery Effluents. *Pakistan J. Zool* (Vol. 36).
- Rosales Loaiza, N., & Morales, E. D. (2007). Microalgas presentes em uma laguna para pulimento de efluentes de uma planta de tratamento de águas residuales urbanas Development of technologies for sustainable use of microalgae View project. Disponible en: <https://www.researchgate.net/publication/28247030>
- S. E. Manaham. (2007). Hidden page. (Reverte, Ed.) (primera ed). Mexico.
- Sacristán, M., Luna, V. M., Cadena, E. & Alva, F. (2014). Producción de biodiésel a partir de microalgas y una cianobacteria cultivadas en diferentes calidades de agua. *Agrociencia*.
- Saeid, A., & Chojnacka, K. (2015). Toward production of microalgae in photobioreactors under temperate climate. *Chemical Engineering Research and Design*. <https://doi.org/10.1016/j.cherd.2014.06.008>
- Schmidt, C. J. B. (2007). Aislamiento, purificación y mantenimiento de cepas de microalgas. in d. (Eds. . Voltolina (Ed.), Métodos y herramientas analíticas en la evaluación de la biomasa microalgal (p. 75). México.
- Sukačová, K., Trtílek, M., & Rataj, T. (2015). Phosphorus removal using a microalgal biofilm

- in a new biofilm photobioreactor for tertiary wastewater treatment. *Water Research*. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2014.12.049>
- SUNASS. (2008). Diagnóstico situacional de los sistemas de tratamiento de aguas residuales en las eps del Perú y propuestas de solución. Lima, Peru.
- Tuantet, K., Temmink, H., Zeeman, G., Janssen, M., Wijffels, R. H., & Buisman, C. J. N. (2014). Nutrient removal and microalgal biomass production on urine in a short light-path photobioreactor. *Water Research*. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2014.02.027>
- Unc, A., Monfet, E., Potter, A., Camargo-Valero, M. A., & Smith, S. R. (2017). Note to Editor: Microalgae cultivation for wastewater treatment and biofuel production: a bibliographic overview of past and current trends. *Algal Research*. <https://doi.org/10.1016/j.algal.2017.05.005>
- Velásquez Vásquez, S., & Brenes, A. U. (2015). Diseño, construcción y puesta en marcha de un fotobiorreactor tubular para producir la microalga *Chlorella* sp. *Ciencia y Tecnología*, 30(1), 28–49.
- von Sperling, M. (2008). Basic principles of wastewater treatment. In I. Publishing (Ed.), *Choice Reviews Online* (p. 208). Brazil: London SW1H 0QS. <https://doi.org/10.5860/CHOICE.45-2632>
- Yang, Z., Cheng, J., Yang, W., Zhou, J., & Cen, K. (2016). Developing a water-circulating column photobioreactor for microalgal growth with low energy consumption. *Bioresource Technology*. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2016.09.071>