

Artículo de Investigación

Evaluación de la remoción de nitrógeno y materia orgánica a través de humedales artificiales de flujo subsuperficial, acoplados a reactores de lecho fijo con microalgas en la Institución Universitaria Colegio Mayor de Antioquia

Evaluation of the removal of nitrogen and organic matter through a system of artificial wetlands with subsurface flow coupled to fixed-bed reactors with microalgae at the Institution Universitario Colegio Mayor de Antioquia

Kelly Leani Quintero García

<https://orcid.org/0000-0002-6928-8247>

Magister en Desarrollo Sostenible, Institución Universitaria Colegio Mayor de Antioquia,

Email: Kelly.quintero@colmayor.edu.co

*(Autor para correspondencia)

Diana Patricia Rodríguez Zúñiga

<https://orcid.org/0000-0003-4634-3378>

Biotecnóloga, Institución Universitaria Colegio Mayor de Antioquia,

Email: d-zuniga@uadec.edu.mx

María Elena González Duque

<https://orcid.org/0000-0002-3375-5026>

Especialista en Gestión Ambiental, Docente, Institución Universitaria Colegio Mayor de Antioquia,

Email: Marial.gonzalez@colmayor.edu.co

Joan Amir Arroyave Rojas

<https://orcid.org/0000-0002-3827-5312>

Magister en Desarrollo Sostenible, Docente, Institución Universitaria Colegio Mayor de Antioquia,

Email: Joan.arroyave@colmayor.edu.co

Fecha de recibido:08/02/2021

Fecha de revisión:16/04/2021

Fecha de aprobación:25/05/2021

DOI: 10.25054/22161325.2921

Resumen

Las importantes cargas de materia orgánica y nitrógeno en las aguas residuales de instituciones educativas han llevado a la búsqueda de sistemas de depuración eficientes, económicos, fáciles de operar y que permitan considerar el agua residual como un recurso que se pueda evaluar y tratar para que su descarga a fuentes hídricas naturales no tenga un alto impacto y genere alteraciones a los ecosistemas acuáticos. El objetivo del presente trabajo fue evaluar la remoción de nitrógeno y materia orgánica a través de humedales artificiales de flujo subsuperficial acoplados a reactores de lecho fijo con microalgas. Como microalgas se utilizó *Chlorella* sp. como vegetación *Heliconia psittacorum*, el sistema fue alimentado con agua residual doméstica de la Institución Universitaria Colegio Mayor de Antioquia, se midió nitrógeno total Kjeldahl, DQO, bacterias nitrificantes y desnitrificantes en la rizosfera y el sustrato del humedal, mediante la técnica de número más probable (NMP), se encontró una eficiencia en la remoción de materia orgánica entre el 30-40%, transformación de nitrógeno del 73,4%, una reducción de coliformes totales y fecales del 87% y 88%. El sistema diseñado fue pertinente, mejorando sustancialmente la calidad del agua residual doméstica tratada.

Palabras clave: Agua residual; Materia Orgánica; Nitrógeno; Humedales Artificiales; Reactores; Microalgas; tratamiento biológico.

Abstract

The significant loads of organic matter and nitrogen in the wastewater of educational institutions have led to the search for efficient, economical, easy-to-operate purification systems that allow wastewater to be considered as a resource that can be evaluated and treated so that its discharge to the natural environment does not have a high impact on water sources and generates alterations to aquatic ecosystems. This project will present the results of the evaluation of the removal of nitrogen and organic matter through a system of artificial wetlands with horizontal subsurface flow, planted with *Heliconia psittacorum* and coupled to fixed-bed reactors with algae, inoculated with *Chlorella vulgaris*, where it is expected to find a high efficiency in the degradation of nitrogen in a percentage of 73,4%, organic matter between 30-40%, total coliforms of 87% and fecal coliforms (*E. coli*) of 88%. The designed system was relevant, substantially improving the quality of the treated domestic wastewater.

Keywords: Wastewater; Organic Matter; Nitrogen; Artificial Wetlands; Reactors; Algae; biological treatment.

1. Introducción

En el mundo entre el 80 y 90% de las aguas residuales son vertidas al medio ambiente sin previo tratamiento (UNESCO, 2020). El 57,8 % de las aguas residuales generadas en Colombia no son tratadas, una de las mayores dificultades para el país han sido el bajo monitoreo de vertimientos y el uso de tecnología ineficientes para el tratamiento de las aguas residuales (Departamento Nacional de Colombia, 2018) Aunque el departamento de Antioquia cuenta con alto cubrimiento del servicio de alcantarillado (82%), no se ha logrado la implementación de sistemas de tratamiento de aguas residuales en los 124 municipios, además las plantas existentes presentan ineficiencia de remoción de contaminantes, deficiencias financieras y técnicas que no permiten afrontar de forma eficiente el tratamiento de las aguas residuales (Gobernación de Antioquia, 2020).

Las aguas residuales generadas en las diferentes actividades humanas son vertidas directamente en los ríos, convirtiéndose en la principal fuente de contaminación de aguas superficiales deteriorando los ecosistemas acuáticos y generando impacto negativo tanto en la salud humana como en el medio ambiente atentando contra la sostenibilidad de la sociedad (Banco Mundial, 2020), es por ello que a nivel mundial se ha venido en la búsqueda de nuevas tecnologías de tratamiento de aguas residuales domésticas que permitan la depuración de estas a bajos costos y eficientemente, reduciendo la carga de contaminantes presentes en las aguas residuales antes de ser vertidas a cuerpos de aguas superficiales (Nuamah *et al.*, 2020; Wu *et al.*, 2020).

El tratamiento de las aguas residuales se ha centrado tradicionalmente en la remoción de materia orgánica, microorganismos patógenos y sólidos, en los últimos años se ha puesto gran interés en metodologías que incluyen la remoción de nutrientes como el nitrógeno, ya que este aumenta la acidez y promueve la eutrofización de los ecosistemas acuáticos (Li *et al.*, 2020). En este sentido se plantea un sistema de tratamiento de bajo costo y facilidad de operación como lo son los humedales artificiales de flujo subsuperficial, acoplados a reactores de lecho fijo con microalgas para el tratamiento del agua residual doméstica generada en la Institución Universitaria Colegio Mayor de Antioquia, la cual cuenta con una población de 4.520 estudiantes y 250 empleados administrativos (IUCMA, 2020), es de resaltar que la institución universitaria no cuenta con sistemas de tratamiento previo a su descarga al sistema de alcantarillado. (Quintero, 2020).

La implementación de dichos sistemas son opciones viables, para mitigar la problemática de disposición y además tienen un costo bajo en la construcción, operación y mantenimiento, comparado con los procesos mecánicos de tratamiento (EPA, 2000) De acuerdo a la cuarta guía de construcción sostenible elaborada por el área metropolitana del Valle de Aburrá, los sistemas de los humedales constituyen ecotecnologías de bajo costo de inversión y operación que permiten el tratamiento de aguas residuales en comparación con otros sistemas de tratamiento, es por ello que el

sistema es coherente con las premisas institucionales del sistema de gestión ambiental, políticas y certificaciones de contribuir al buen desempeño ambiental (Área Metropolitana del Valle de Aburra & Universidad Pontificia Bolivariana, 2015).

2. Metodología

La implementación del sistema humedales de flujo subsuperficial horizontal acoplados a reactores de lecho fijo con microalgas, se ubicó en la Institución Universitaria Colegio Mayor de Antioquia en el Municipio de Medellín.

2.1 Construcción del sistema de humedales artificiales y reactores de lecho fijo

Para la construcción del sistema humedales se utilizaron dos tanques escalonados de 14 litros para el almacenamiento, distribución y pretratamiento del agua residual, la construcción de las celdas donde se ubicó el sistema de humedales fue realizada con cubículos de plástico transparentes de 37,4 cm de largo, 26,7 cm de ancho y 13,8 cm de alto con una capacidad de 10,3 L y profundidad de 25 cm, tal como se muestra en la Figura 1. Se utilizó como vegetación *Heliconia psittacorum*; las cuales fueron plantadas en los cubículos con una densidad de 10 plantas por cada cubículo, cada plántula tenía entre 20 y 25 cm de alto. Al final de los humedales artificiales se adaptaron los reactores de flujo ascendente, el cual fue generado por una bomba tipo acuario y piedra difusora, con un volumen final de 250 mL como lecho fijo se utilizó suncho, material plástico utilizado para embalaje, se esterilizó en luz U, posteriormente fueron inoculados con cepas de *Chlorella vulgaris* provenientes del Centro de Biotecnología de la Institución Universitaria Colegio Mayor de Antioquia.

Una vez instalado el sistema humedal-reactor se procedió a realizar alimentación escalonada con el agua residual y solución nutritiva para plantas en las siguientes proporciones: 70:30, 50-50, 30-70 (Quintero, 2020). Para estimular la adhesión de las microalgas al suncho, se utilizó como medio de cultivo BG-11 con un inóculo de *Chlorella vulgaris* del 15% los primeros cinco días, en ambiente natural sin suministro de agua residual, una vez se observó la adhesión de la microalga al suncho se procedió a alimentar los reactores por goteo constante con agua residual domestica pretratada (Quintero, 2020).

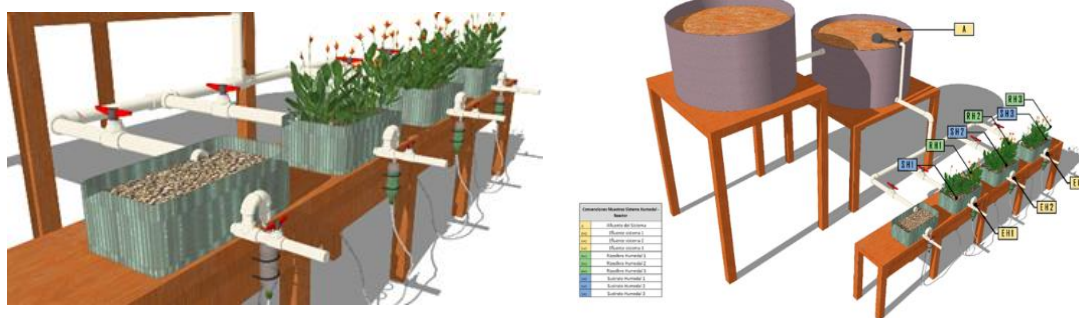


Figura 1. Esquema experimental del montaje humedal – reactor. Fuente: Elaboración propia

2.3 Seguimiento del sistema humedal reactor

La medición de parámetros físico-químicos como demanda química de oxígeno (DQO), se hace a través del método SM 5220 D, nitrógeno total Kjeldahl SM-4500-Norg, la evaluación de los parámetros microbiológicos (coliformes totales, coliformes fecales (*E. coli*)), se realizó mediante el método de filtración por membrana en agar chromocult, incubados 24 h a 37°C, identificando las unidades formadoras de colonia por mililitro (UFC/ml) (Water environment Federation, 1999).

Para la cuantificación de bacterias nitrificantes y desnitrificantes, se realizaron muestreos de forma aleatoria en la rizosfera de las plantas y en el lecho filtrante; la técnica utilizada para la identificación y cuantificación de bacterias nitrificantes y desnitrificantes fue número más probable (NMP) tomada de Belser (1977) y modificada por estudiantes de especialización en Microbiología Ambiental de la I.U Colegio Mayor de Antioquia en el 2016.

La identificación en sustrato se realizó tomando 1 g de grava, adicionando está a un tubo de ensayo con 9 ml de solución salina estéril al 0.85%, agitando durante un minuto a 3000 rpm. Para rizósfera se pesa 1 gramo de raíz, macerada en una cápsula de porcelana estéril y se diluye en un tubo con 9 ml de solución salina estéril al 0.85%, agitando durante un minuto a 3000 rpm. Se realizó un banco de diluciones seriadas desde 10⁻¹ hasta 10⁻³, sembrando 3 diluciones seriadas con cinco réplicas en caldo amonio para bacterias nitrificantes compuesto por sulfato de amonio 0,53 g, carbonato de calcio 1,052, potasio dihidrofosfato 1,052, sulfato heptahidratado 0,316 g y caldo nitrato para bacterias desnitrificantes preparado con KNO₃ 0,5 g, CaCO₃ 5 g, Glucosa 10 g, solución salina 50 ml. Se afora hasta un litro con agua destilada y enriquecido con 0,5 g/L sulfuro de sodio y rezarsurina 0,01%. Tomado de Belser (1977) y modificado por trabajo de investigación de estudiantes de Especialización en Microbiología Ambiental de la I.U. Colegio Mayor de Antioquia; las muestras fueron incubadas a temperatura ambiente en el laboratorio de Biotecnología de la Institución Universitaria Colegio Mayor de Antioquia durante dos semanas Belser (1977).

3. Resultados y discusión

3.1 Construcción del sistema de humedales artificiales y reactores de lecho fijo

En la Tabla 1 se presentan los datos obtenidos para el diseño de los cubículos donde se ubicaron los humedales artificiales.

Tabla 1. Datos para el diseño del humedal

Modelo para eliminación DBO, flujo pistón, ley de Darcy: cálculo del humedal utilizando el modelo de diseño de Reed y Ras, (2017) y Romero 2004				
Parámetro de diseño	Valor	Unidad	Símbolo	Observación
Caudal	0,005	l/min		
DBO ₅ entrada	303,55	mg/l		Porcentaje de 65%
Constante de primer orden	1,104	d ⁻¹	K ₂₀	1,839
Temperatura promedio favorable en el tratamiento del agua residual.	22,3	°C	T	
Profundidad promedio del agua	0,55	M	H	
Altura total del humedal	0,138	M	Hl	
Porosidad promedio lecho	0,37	adimensional	N	2 mm
Pendiente del humedal	0,01	m/m	m	
Conductividad hidráulica	1000	m/d	Ks	
Concentración de DBO ₅ en el efluente HSSF	81,3	mg/LO ₂	C	Supuesta eficiencia del humedal
Constante de primer orden dependiente de la temperatura	1,26	d ⁻¹	KT	
Área superficial	0,1	m ²	As	
Carga orgánica por m ²	48,9	gDBO/(m ² *d)		Kg DBO/ha*d <122 según romero
Carga hidráulica	0,049	m ³ /(m ² *d)		m ³ /(ha*d) <1870 según romero
Área transversal (m ²)	5,0	cm ²		
Ancho humedal (m)	0,3	M		
Largo del humedal (m)	0,4	M		
L/A	1,4			
Tiempo de retención hidráulico	1,04	Día		

Fuente: Elaboración propia

La construcción se hizo teniendo en cuenta un bajo tiempo de retención hidráulica, asociado al volumen de los tanques y al caudal; para dar pretratamiento al agua residual se implementaron dos tanques reciclados uno de ellos con un tamiz para retener sólidos de mayor tamaño. Autores como Mefcalt y Eddy (1995) proponen que todo sistema de tratamiento natural debe llevar a cabo un pretratamiento para la retención de sólidos gruesos; dando paso por medio de tubería en PVC de media pulgada y controlada con una válvula de flotador, para garantizar un nivel de la lámina de agua constante al tanque de distribución, tal como se observa en la Figura 2.

La construcción se hizo teniendo en cuenta un bajo tiempo de retención hidráulica, asociado al volumen de los tanques y al caudal; para dar pretratamiento al agua residual se implementaron dos tanques reciclados uno de ellos con un tamiz para retener sólidos de mayor tamaño. Autores como Mefcalt y Eddy (1995) proponen que todo sistema de tratamiento natural debe llevar a cabo un pretratamiento para la retención de sólidos gruesos; dando paso por medio de tubería en PVC de media pulgada y controlada con una válvula de flotador, para garantizar un nivel de la lámina de agua constante al tanque de distribución, tal como se observa en la Figura 2.



Figura 2. Montaje de tanques y sistema de humedales. Fuente: Elaboración propia

En la implementación de los reactores se utilizaron botellas PET (Polietileno Tereftalato) de 500 ml, recicladas en la cafetería de la Institución, con perforaciones en la parte superior para el ingreso del agua residual, en la tapa para la aireación y alrededor como se muestra en la Figura 3; el material de soporte se definió luego de experimentar en laboratorio mediante montaje en Erlenmeyer de 500 ml con medio BG-11 inoculado con cepas *Chlorella vulgaris*.



Figura 3. Registro Fotográfico reactores con microalgas. Fuente: Elaboración propia

3.2 Eficiencia en Remoción de Materia Orgánica y Nitrógeno

Los porcentajes de remoción de DQO oscilaron entre el 30 y 40% (Figura 4) estos valores se asocian a los procesos físicos sedimentación y filtración, además de químicos que se dan en el humedal (García, Morato, Bayona, 2004) en este caso se relaciona con la retención en el lecho filtrante del humedal más que a procesos de degradación biológicos, en razón de la turbiedad medida al inicio y al final del tren de tratamiento, si bien la turbiedad no es una variable directamente atribuible a materia orgánica, si es directamente proporcional a la cantidad de sólidos en suspensión, y estos a su vez representan una gran porción de la materia orgánica en un agua residual doméstica, al comparar con la turbiedad final fue menor que al inicio, donde se puede inferir que dichos sólidos en suspensión se eliminaron en procesos físicos como sedimentación y filtración, por tener un tiempo de retención de un día y autores como (García *et al*, 2004) reportan tiempos de retención hidráulico de 3 y 4 días para mejorar las degradación de materia orgánica Mefcalt y Eddy (1995).

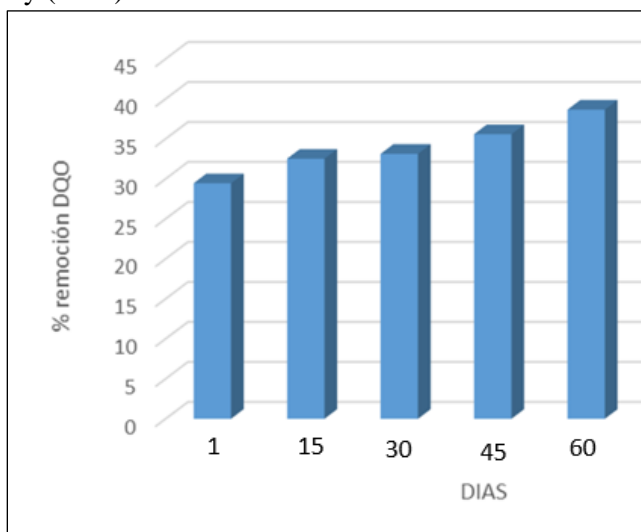


Figura 4. Porcentajes de remoción en DQO. Fuente: Elaboración propia

El afluente del sistema tuvo una concentración de 20 mg/l (Tabla 2) de nitrógeno determinado por colorimetría con Kit de nitrógeno, Mefcalt y Eddy (1995) se refieren a los procesos de desnitrificación a la eliminación del 70 al 90 % del nitrógeno total y a la nitrificación del 5 al 20%. El sistema humedal - reactor por la presencia de bacterias nitrificantes y desnitrificantes muestran eficiencia en la remoción del nitrógeno total, comprendido por nitrógeno orgánico, amonio, nitrito y nitrato, dados los mecanismos de asimilación y nitrificación – desnitrificación en la degradación. (Salgado *et al.*, 2010). La eliminación de nitrógeno orgánico es asociado a los sólidos suspendidos removidos en este tipo de sistemas por sedimentación y filtración, en la entrada y medio poroso, tal como se relaciona en los datos de cuantificación de bacterias nitrificantes (Figura 10) se infiere que el nitrógeno amoniacal es absorbido por este proceso y posteriormente en forma de nitrato, y el cual es transportado por el agua percolada se degrada por las plantas y la desnitrificación bacteriana, en este caso las cantidades provenientes del humedal posteriormente son captadas por las microalgas para su proceso de crecimiento (Mefcalt y Eddy, 1995).

Tabla 2. Datos de la medición de nitrógeno

NTK (mg/L)	
Afluente	20
Efluente	5,31
% De remoción	73.4%

Fuente: Elaboración propia.

3.2.1 Remoción de turbiedad

Se obtuvo una remoción de turbiedad superior al 90% resultados que concuerdan con Marin, Solis, Lopez, Bautista, Romellon (2016) los cuales obtuvieron porcentajes de remoción entre el 95 y 98% de turbidez. Estos resultados evidencian la capacidad del humedal como filtro para retención de solidos tal como se presenta en las Figuras 5 y 6.

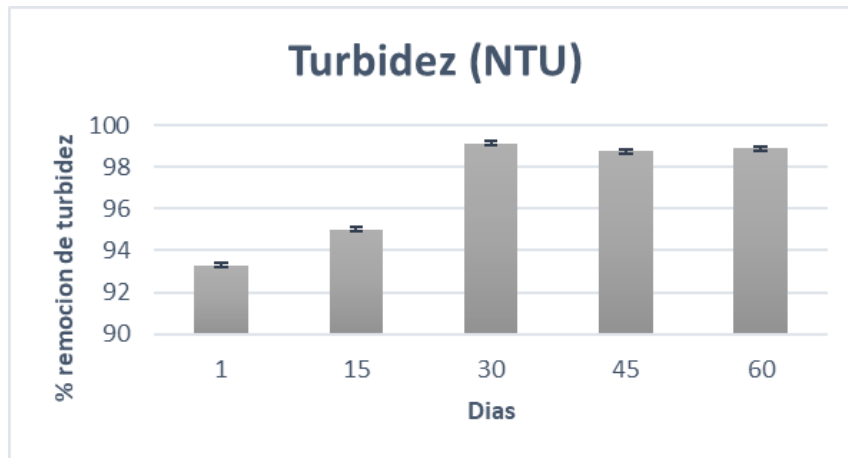


Figura 5. Eficiencia de remoción de turbiedad por el sistema humedal reactor. Fuente: Elaboración propia

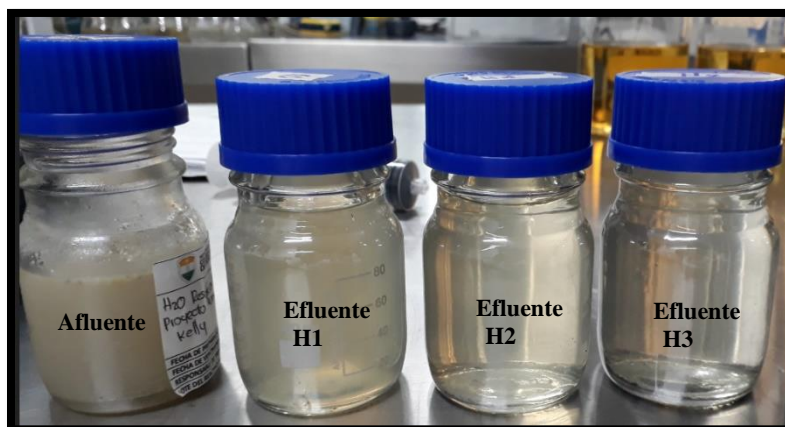


Figura 6. Evidencia de la capacidad del humedal artificial como filtro para la retención de sólidos. Fuente: Elaboración propia

3.2.2 Evaluación microbiológica

Se obtuvieron porcentajes de remoción para coliformes totales de 87% y 88% para coliformes fecales (*E.coli*), y remociones del 88% y 99%, en cuanto a la remoción de coliformes fecales (*E.coli*) concuerda con lo obtenido por algunos autores como Bat, J. Botero G, Kadlec R.H. and Wallace S., Díaz F., *et al*, Ávila, C., *et al*. (Rabat, J., 2016, Botero G., 2005, Kadlec R. and Wallace S., 2009, Díaz F., *et al.*, 2010, Ávila, C., *et al.* 2012) quienes reportan para estos bioindicadores remoción en coliformes entre el 90% al 99% y enfatizan que en los casos en que se registraron las tasas más bajas, debido a tiempos de retención menores. Autores como Gonzales F, 2017. reporta remoción de coliformes totales de 77,65% a 99% lo cual es coherente con los resultados obtenidos en los muestreos encontrándose en este rango porcentual. Según lo descrito en el manual de depuración de aguas residuales urbanas de alianza por el agua la remoción de patógenos en los sistemas de humedales se encuentra entre 1 a 2 unidades logarítmicas, lo cual concuerda con los resultados obtenidos y representados en la Figura 7 (Alianza por el agua, 2008), se observó mayor

eliminación de coliformes fecales (*E. coli*) comparados con los coliformes totales, lo cual se atribuye a la presencia de protozoos ya que son un grupo que cumplen esa función, dada la competencia para la consecución de materia orgánica con predilección de bacterias patógenas. Winkler, (2005).

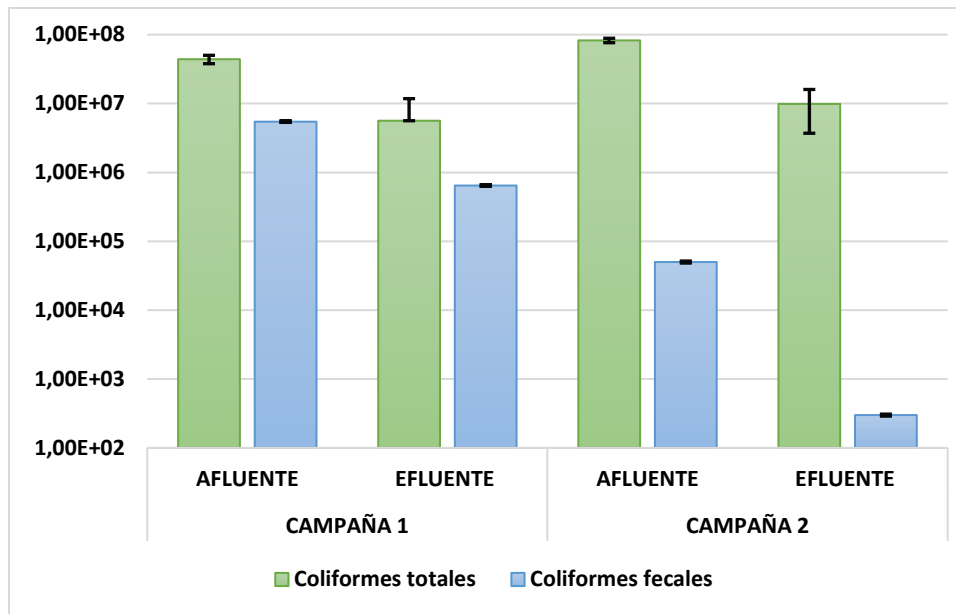


Figura 7. Diagrama resultados microbiológicos. Fuente: Elaboración propia

La remoción de microorganismos patógenos como los coliformes fecales (*E.coli*) se presenta mediante procesos de sedimentación, filtración, radiación solar o depredación por parte de protozoarios En el sistema humedal – reactor se evidenció el crecimiento de protozoos, rotíferos, ciliados de vida libre y flagelados, además de microalgas, tal como se observan en las Figura 8, que autores como Rabat (2016). y Jasper. *et al.* (2013) reportan la eliminación de patógenos debido a la depredación por parte de protozoos, además se ha observado como la eliminación de patógenos es dependiente del tiempo de retención. Además, estos microorganismos contribuyen a la eliminación de materia orgánica y son bioindicadores del funcionamiento del sistema de tratamiento.

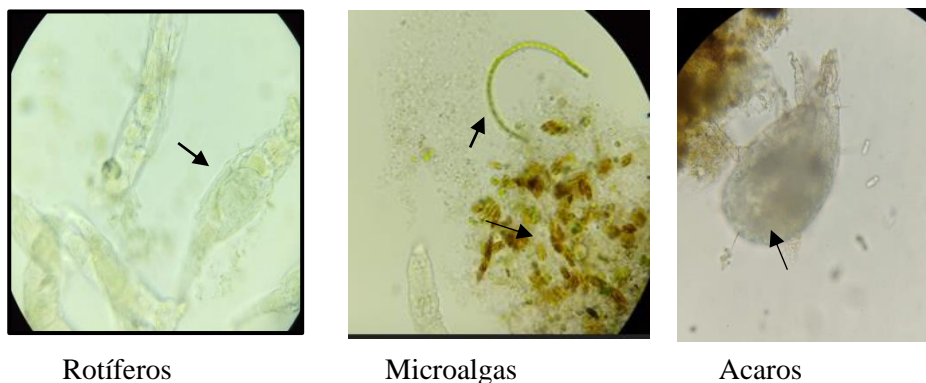


Figura 8. Protozoos identificados en los humedales artificiales. Fuente: Elaboración propia

El efluente del sistema humedal – reactor presentó una concentración de microorganismos alrededor de 5 a 6 unidades logarítmicas, lo cual aplica para la realización de un tratamiento terciario de desinfección que permita disminuir estos patógenos, con la posible finalidad de reutilizar este tipo de agua para riego o algún otro tipo de uso.

En los reactores se realizó seguimiento mediante microscopía óptica y contraste de fase, encontrando microorganismos bioindicadores como rotíferos, protozoos de vida libre como navícula, Zapata y González. (s.f). reportan afinidad en aguas orgánicamente contaminadas, ricas en nutrientes y pobres en oxígeno, que los hace ser tolerantes a medios contaminados. En la Figura 9 se aprecian los microorganismos encontrados, además de la microalga en estudio, lo cual permitió observar cómo *Chlorella vulgaris* se adaptó a las condiciones del sistema y al cambio de sustrato de BG-11 a el agua residual proveniente del humedal, mediante la técnica de peso seco se determinó aumento de la biomasa tal como se presenta en la tabla 3 Autores como Kumar *et al.*, (2018) en estudios con microalgas para tratamiento de aguas residuales reportan una ganancia de biomasa por peso seco de 12.4% y 17.4%.

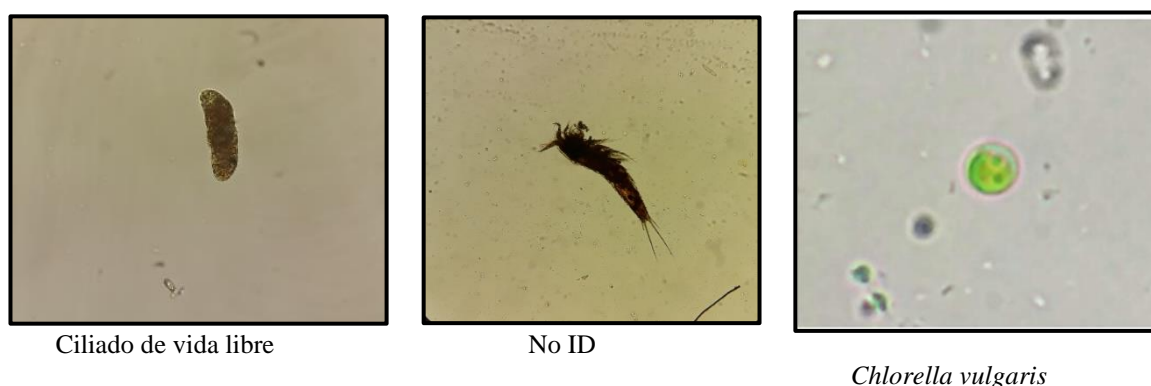


Figura 9. Organismos identificados en los reactores de lecho fijo. Fuente: Elaboración propia

Tabla 3. Valores del peso en los reactores

Sistema de Reactores	Valores
Peso inicial del zuncho(g)	4,5
desviación	± 0
Peso con biomasa (g)	5,15
desviación	± 0,12
Peso seco (g)	0,65
desviación	± 0,12
% de peso ganado	14,4

Fuente: Elaboración propia

3.2.2.3 Cuantificación de bacterias nitrificantes y desnitrificantes en el soporte y raíces de plantas

Las muestras fueron analizadas microbiológicamente mediante la técnica de NMP (número más probable), para estimar la cantidad de bacterias Nitrificantes y Desnitrificantes asociadas al material de soporte y la rizosfera, una vez realizado el recuento se detecta la presencia de los dos grupos, en un mayor número nitrificantes para el primer muestreo donde autores como Rodríguez y Toro, (2006) indican su óptimo rango de pH entre de 6.6 y 7.8 en la Figura 10 se presentan los resultados encontrados en el recuento, y se evidencia el equilibrio con la presencia de bacterias desnitrificantes en el segundo muestreo.

Considerando la eliminación total del Nitrógeno para aguas residuales de origen doméstico, este compuesto se presenta en forma de amoníaco donde las bacterias nitrificantes consumen cantidad de este en su proceso de crecimiento, transformando en una forma diferente de nitritos a nitratos, los cuales finalmente se reducen en el proceso de desnitrificación (Winkler, 2005); el sistema entonces y de acuerdo a autores como Manga, Molinares y Arrieta, (2007) presenta eliminación biológica del nitrógeno contenido en el agua residual.

En la figura 10 se observa el comportamiento de los muestreos. Una vez hechos los recuentos se encontraron en la dilución 10^1 a 10^3 los grupos de bacterias, tanto para rizosfera y material de soporte; lo cual puede sugerir la formación de biopelículas, proceso que ocurre de 8 a 10 días indicando una maduración del sistema. Además, el análisis microbiológico no tiene en cuenta la cantidad de Nitrógeno sino la población microbiana y su actividad que permite la oxidación del nitrógeno a formas utilizadas por las plantas o devueltas a la atmosfera en forma de N_2 (Rodríguez y Toro, 2006).

El muestreo uno se realizó al día 30 de la puesta en marcha y el muestreo dos al día 90, teniendo en cuenta que autores como Rodríguez y Toro, (2006) en estudios obtenidos reportan el crecimiento óptimo de los dos grupos de bacterias al día 15 por ser el tiempo que requieren para desarrollar su maquinaria enzimática y reproducirse. Se encontró mayor número de nitrificantes comparadas con las de desnitrificantes en el primer muestreo de rizosfera.

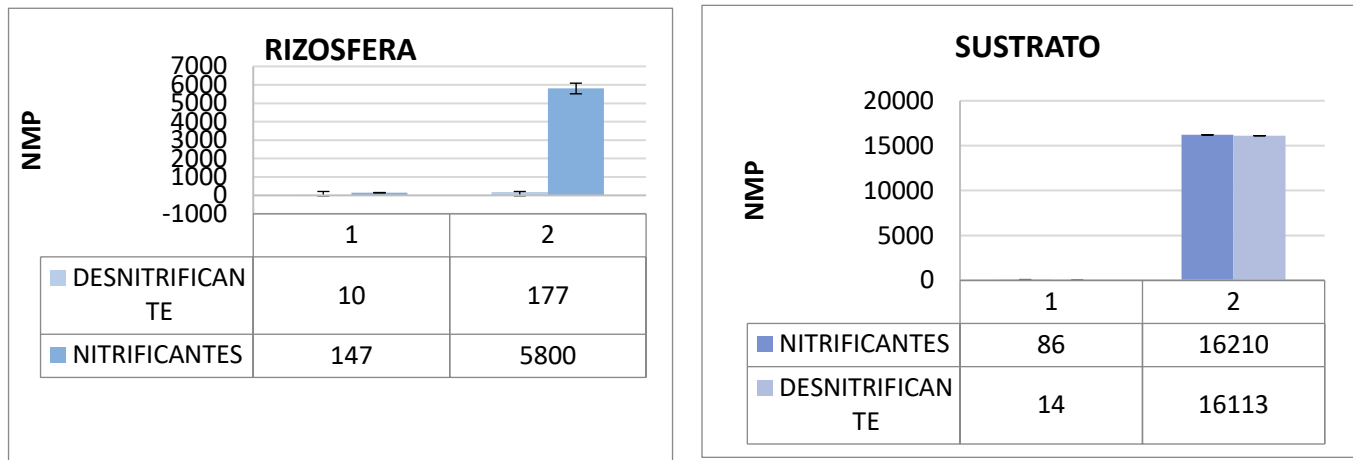


Figura 10. Presencia de bacterias Nitrificantes y Desnitrificantes. Fuente: Elaboración propia.

Para el muestreo dos se encontraron valores similares en los dos tipos de bacterias en el sustrato, autores como Pérez, Peña y Sanabria (2011) reportaron datos similares para bacterias nitrificantes en humedales con *Heliconia psittacorum*, al relacionar los resultados fisicoquímicos y microbiológicos se encontró un equilibrio en la ecología del sistema siendo similares los datos bacterias desnitrificantes y nitrificantes, al respecto Souza y de Aguiar (2020) establecen que las primeras realizan su proceso en valores de pH entre 6.5 y 7.5 tal como se observó en los datos obtenidos y Mefcalt y Eddy (1995) refieren una condición óptima de crecimiento a pH de 7 resultados que concuerdan con lo obtenido en este trabajo.

4. Conclusión

El diseño y puesta en marcha del sistema humedal – reactor dio respuesta a la condiciones hidráulicas y ambientales de funcionamiento según lo demostrado en los resultados, sin generación de olores, ni presencia de vectores, además de la adherencia del alga en estudio.

En el sistema humedal – reactor se encontró una baja remoción de DQO posiblemente ligado a los compuestos que aportan a este parámetro se encontraban más en dilución que en suspensión, por lo cual no fueron retenidos o

controlados por la estructura física y química del sistema. Sin embargo, para el Nitrógeno se evidencian remociones aceptables de acuerdo a lo planteado en la teoría para las remociones del compuesto.

Según los resultados se puede considerar un adecuado funcionamiento en el sistema humedal reactor para el tratamiento de aguas residuales domésticas, dada la eliminación de bioindicadores de contaminación fecal y la presencia de bacterias nitrificantes y desnitrificantes responsables de los procesos de nitrificación y desnitrificación para la eliminación de nitrógeno.

5. Agradecimientos

Se agradece a los autores del artículo y a la Institución Universitaria Colegio Mayor de Antioquia por el préstamo de las instalaciones, equipos y personal del laboratorio.

6. Referencias Bibliográficas

Alianza por el agua. (2008). Manual de depuración de aguas residuales urbanas. Secretariado de Alianza por el agua, Ecología y Desarrollo. 1–264. Recuperado de <https://doi.org/Z-2802/08>. <https://doi.org/10.3989/estgeogr.201509>

Área Metropolitana del Valle de Aburra, & Universidad Pontificia Bolivariana. (2015). Guía 4. Guía para el diseño de edificaciones sostenibles. In Política De Construcción Sostenible Del Área Metropolitana Del Valle De Aburrá. <https://doi.org/10.32468/be.907>

Ávila, C., Salas, J., Martín, I., Aragón, C., García, J., (2012). Integrated treatment of combined sewer wastewater and stormwater in a hybrid constructed wetland system in southern Spain and its further reuse. *Ecol. Eng.* 50,13–20. Recuperado de:

https://www.researchgate.net/publication/231647537_Integrated_treatment_of_combined_sewer_wastewater_and_stormwater_in_a_hybrid_constructed_wetland_system_in_southern_Spain_and_its_further_reuse/citation/download. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2012.08.009>

Banco Mundial. (2020). El agua residual puede generar beneficios para la gente, el medioambiente y las economías, según el Banco Mundial. <https://www.bancomundial.org/es/news/press-release/2020/03/19/wastewater-a-resource-that-can-pay-dividends-for-people-the-environment-and-economies-says-world-bank>. <https://doi.org/10.35305/revistamici.v0i24.32>

Belser, L., (1977) Nitrate reduction to nitrite, a possible source of nitrite for growth of nitrite-oxidizing bacteria. *Applied and Environmental Microbiology*. <https://doi.org/10.1128/aem.34.4.403-410.1977>

Botero, G. (2005). Diseño, construcción y evaluación preliminar de un humedal de flujo subsuperficial. (Tesis de pregrado). Bogotá. Colombia.

Departamento Nacional de Colombia. (2018). Plan Nacional de Desarrollo 2018-2022.

Díaz, F., O'Green, A. & Dahlgren, R. (2010). Efficacy of constructed wetlands for removal of bacterial contamination from agricultural return flows. *Elsevier*, 97 (11). 11207-11214. Recuperado de: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0378377410002209>. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2010.06.015>

EPA. (2000). Folleto informativo de tecnología de aguas residuales Humedales de flujo subsuperficial. In United States Environmental Protection Agency, (Us Epa).

García, J., Morató, J., y Bayona, J. (2004). NUEVOS CRITERIOS PARA EL DISEÑO Y OPERACIÓN DE HUMEDALES CONSTRUIDOS. Una alternativa de bajo coste para el tratamiento de aguas residuales. Centro de Publicaciones de Campus Nord. Barcelona. <https://doi.org/10.6035/14107.2017.14895>

Gobernacion de Antioquia. (2020). Plan de desarrollo Antioquia: UNIDOS POR LA VIDA 2020-2023. In Gobernación de Antioquia. <https://doi.org/10.2307/j.ctv1n35f54.21>

IUCMA. (2020). Informe de rendición de cuentas-2020. Institución universitaria Colegio Mayor de Antioquia. <https://doi.org/10.22507/pml.v10n1a2>

Jasper, J.T., Nguyen, M.T., Jones, Z.L., Ismail, N.S., Sedlak, D.L., Sharp, J.O., Luthy, R.G., Horne, A.J., & Nelson, K.L. (2013). Unit process wetlands for removal of trace organic contaminants and pathogens from municipal wastewater effluents. *Environ. Eng. Sci.*, 30 (8), 421–436. Recuperado de: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/23983451> <https://es.unesco.org/news/gestion-del-agua-elemento-clave-afrontar-cambio-climatico>. <https://doi.org/10.1089/ees.2012.0239>

Kadlec, R. & Wallace, S. (2009). *Treatment wetlands*. Francia: CRC.Pres

Kumar, M., Enamala, S., Chavali, M., Donepudi, J. Yadavalli, R. Kolapalli, B.... Kuppam, C.(2018). Production of biofuels from microalgae - A review on cultivation, harvesting, lipid extraction, and numerous applications of microalgae. Elsevier, 94, 49-68. Doi <https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.05.012>

Li, X., Wu, S., Yang, C., & Zeng, G. (2020). Microalgal and duckweed based constructed wetlands for swine wastewater treatment: A review. *Bioresource Technology*, 318(May), 123858. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2020.123858>

Marín, C., Solís, R., López, G., Bautista, R., y Romellón, M. (2016). Tratamiento de aguas residuales por humedales artificiales tropicales en Tabasco, México. *Revista Iberoamericana de Las Ciencias Biológicas y Agropecuarias*, 5(10), 4-20. Recuperado de <http://www.ciba.org.mx/index.php/CIBA/article/view/54>. <https://doi.org/10.23913/ciba.v5i10.54>

Manga, J., Molinares, N., y Arrieta, J. (2007). *Tratamiento de aguas residuales mediante sistemas de lagunaje*. Barranquilla (Colombia): Ediciones Uninorte.

Metcalf & Eddy Inc. (1995). *Ingeniería de aguas residuales tratamiento, vertido y reutilización*. Madrid (España): Editorial McGraw-Hill.

Nuamah, L. A., Li, Y., Pu, Y., Nwankwegu, A. S., Haikuo, Z., Norgbey, E., Banahene, P., & Bofah-Buoh, R. (2020). Constructed wetlands, status, progress, and challenges. The need for critical operational reassessment for a cleaner productive ecosystem. *Journal of Cleaner Production*, 269, 122340. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.122340>

Pérez, N., Peña, M., y Sanabria, J. (2011). Comunidades bacterianas involucradas en el ciclo del nitrógeno en humedales construidos. *Ingeniería y competitividad*. 11(2), 83-92. Doi: <https://doi.org/10.25100/iyc.v13i2.2676>.

Quintero García, K.L. (2020). Evaluación de la remoción de nitrógeno y materia orgánica a través de humedales artificiales de flujo subsuperficial, acoplados a reactores de lecho fijo con microalgas en la Institución Universitaria Colegio Mayor de Antioquia (Tesis de Maestría). Instituto Tecnológico Metropolitano, Medellín, Colombia. <https://doi.org/10.24850/j-tyca-2017-05-07>

Rabat, J. (2016). Análisis de los modelos de diseño de los sistemas naturales de depuración. (Tesis de maestría). Alicante. España.

Rodríguez, N., y Toro, C. (2006). Estandarización del tiempo de incubación y concentración de CaCO_3 , SO_4 $(\text{NH}_4)_2$ Y KNO_3 para la prueba del NMP con bacterias nitrificantes y denitrificantes usando como matriz compost. (Tesis de grado). Bogotá. Colombia.

Salgado, I., Cruz, M., Durán, M., Oviedo, R., Carballo, M., y Martínez, A. (2010). Bacterias como herramientas potenciales en el mejoramiento de humedales artificiales para el tratamiento de aguas. Revista CENIC. Ciencias Biológicas. 41, 1-10. Recuperado de <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=181220509036>. <https://doi.org/10.18235/0002341>

Souza, J., de Aguiar Junior, T.R. Efficiency of Nitrifying and Denitrifying Bacteria in Removing Micropollutants in Water Samples. Water Air Soil Pollut 231, 180 (2020). <https://doi.org/10.1007/s11270-020-04523-z>

UNESCO. (2020). La gestión del agua, elemento clave para afrontar el cambio climático.

Water environment Federation. (1999). Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater. In Public Health (Vol. 21, Issue 1). <https://doi.org/10.2105/AJPH.51.6.940-a>

Winkler, M. (2005). Tratamiento biológico de aguas de desecho. Balderas 95 (México, D.F): Editorial Limusa, S:A de C.V. Grupo Noriega Editores.

Wu, H., Gao, X., Wu, M., Zhu, Y., Xiong, R., & Ye, S. (2020). The efficiency and risk to groundwater of constructed wetland system for domestic sewage treatment - A case study in Xiantao, China. Journal of Cleaner Production, 277, 123384. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.123384>

Zapata, V., y González, M. (s.f). Observación y reconocimiento de algas y protozoos como bioindicadores en biotecnología ambiental. (Proyecto de investigación). Institución Universitaria Colegio Mayor de Antioquia. Colombia. <https://doi.org/10.22507/pml.v10n1a2>

La Revista Ingeniería y Región cuenta con la Licencia
Creative Commons Atribución (BY), No Comercial (NC) y Compartir Igual (SA)

