



Evaluación de la eficiencia de biodepuración para aguas de pozos profundos en la sabana de Bogotá

Evaluation of biodepuration efficiency for deep well waters in the sabana de Bogotá

Germán Melo Quintana¹ Ligia Consuelo Sánchez Leal² Edgar Agudelo López³

Para citar: Melo, G., Sánchez, L., y Agudelo, E. (2018). Evaluación de la eficiencia de biodepuración para aguas de pozos profundos en la sabana de Bogotá. *Redes de Ingeniería*, 9(1), 15-25, doi: <https://doi.org/10.14483/2248762X.13906>

Recibido: 5-octubre-2018 / **Aprobado:** 30-noviembre-2018

Resumen

En este artículo se evaluó el proceso de biodepuración de agua a ser utilizada en riegos de hortalizas en Chía, Cundinamarca; el proyecto tuvo como objetivo evaluar el tiempo y acción fitodepuradora con la presencia de tres especies de macrófitas —*Eichornnia crassipes*, *Scirpus californicus* y *Lemna minor*— que por tener características de fácil adaptación fueron seleccionadas. Para realizar la verificación de la acción del biosistema se generó un proceso de evaluación por medios físicos, químicos y microbiológicos, además de utilizar grupos control de *Spinacia oleracea*, cultivada en la zona de estudio. Se logró concluir que el biosistema posee un alto rendimiento de biodepuración, alcanzando un porcentaje de remoción óptimo para uso agrícola; adicionalmente, el sistema es funcional frente a su construcción, utilización y mantenimiento, dando respuesta a la crítica situación de las aguas empleadas para riego en esta zona colombiana.

Palabras clave: agua residual, calidad, contaminación, plantas acuáticas, riego, zona húmeda.

Abstract

In this article, the process of biodepuration of water to be used in irrigations of vegetables in Chia Cundinamarca was evaluated. The objective of the project was to evaluate the time and action of phytodepuration with the presence of three species of macrophytes *Eichornnia crassipes*, *Scirpus californicus* and *Lemna minor* that were selected for their easy adaptation characteristics. To carry out the verification of the action of the biosystem, an evaluation process was generated by physical, chemical and microbiological means, in addition to using control groups of *Spinacia oleracea* cultivated in the study area. It was concluded that the biosystem has a high performance of biodepuration reaching a percentage of removal suitable for agricultural use. Additionally, the system is comfortable against its construction, use and maintenance, responding to the critical situation of the water used for irrigation in this Colombian area.

Keywords: aquatic plants, irrigation, pollution, quality, wastewater, wet zone.

1. Doctorando en Ingeniería del agua y medioambiental. Universidad Politécnica de Valencia, España. Docente Universidad Santo Tomás. Vicerrectoría Universidad Abierta y a Distancia VUAD. Correo electrónico: germanmelo@ustadistancia.edu.co
2. Magíster en Biología aplicada. Universidad Militar Nueva Granada, Colombia. Docente del Programa de Bacteriología. Universidad Colegio Mayor de Cundinamarca, Bogotá D.C. Correo electrónico: lsanchezl@unicolmayor.edu.co
3. Magíster en Economía y Empresa. Universidad Oberta de Catalunya, España. Coordinador del Programa Administración de empresas agropecuarias. Universidad Santo Tomás. Vicerrectoría Universidad Abierta y a Distancia VUAD. Correo electrónico: edgaragudelo@ustadistancia.edu.co

INTRODUCCIÓN

Se estima que la superficie hídrica del planeta se ha reducido de un 75% a 71% debido a efectos de la contaminación [1]. Los sistemas acuáticos son hoy declarados como una de las fuentes a conservar no solo por su existencia de manera adecuada, sino por el valor de ser el reservorio de millones de especies que desempeñan un nicho valioso en el planeta [2]; de acuerdo con [3], entre las causas más habituales de contaminación del recurso hídrico se encuentra la agricultura, seguida de la alta tasa de asentamientos urbanos en zonas reducidas geográficamente y vertimientos en cuerpos de agua. Sin embargo, el fenómeno de degradación puede aumentar debido a legislaciones blandas o de poca acción, además de la falta de educación y procesos de conservación enmarcados en los objetivos del desarrollo sostenible [4].

Díaz [5] menciona adicionalmente que el ser humano, de no tomar conciencia a través de estrategias de conservación frente al recurso hídrico, establecerá una línea muy cercana a una degradación ambiental que difícilmente tendrá una posible solución. Acogido este principio, se debe aclarar que una de las estrategias frente a la contaminación hídrica es la rehabilitación del fluido a través de técnicas como los biosistemas, humedales artificiales o sistemas emuladores tipo humedal *wetlands*, que desde la década de los 50 en Alemania hacen parte de una estrategia viable en diferentes ubicaciones del planeta [6]. Este tipo de sistema es sencillo a nivel de su construcción y operación, empleando un lecho con gravilla u otro sustrato rocoso en el cual se suspenden las plantas (macrófitas acuáticas) que posteriormente son las encargadas de la filtración por medio de la rizosfera y zonas de contacto con el afluyente [7]. Como se describió anteriormente, el nivel de remoción de agentes contaminantes es muy efectivo, especialmente a nivel de sustancias nitrogenadas, estando alrededor del 78% respecto a un cuerpo de agua en un espacio de tiempo relativamente corto [8].

En consecuencia, se planteó generar una investigación basada en la evaluación de aguas de riego de pozos profundos contaminadas por microorganismos patógenos por medio de procesos biológicos, lo anterior bajo un sistema tecnológico de alta eficiencia, bajo costo y alta empleabilidad por comunidades rurales. Para Morales [9], la sostenibilidad hídrica posee relación con los indicadores económicos de países, responsables del cuidado y conservación de sus recursos naturales, entre los cuales se encuentran las plantas acuáticas (macrófitas) que entran a beneficiar procesos naturales o antrópicos como el de este estudio.

Finalmente, la investigación buscó presentar un modelo de tratamiento de aguas contaminadas basado en un proceso fisicoquímico y biológico con capacidad de remoción menor a ocho días, presentando una alternativa económica, de fácil construcción y replicabilidad.

MÉTODOS

La zona de estudio está ubicada en el municipio de Chía, Colombia, vereda La Balsa, en las coordenadas geográficas latitud 4.86667, longitud -74.0667 como se observa en la Figura 1.

Las fases metodológicas están divididas en dos de acuerdo con lo propuesto por Kivaisi [10], Kadlec [11] y Wang [12]. El principal elemento para seleccionar la zona fue que el agua provenga de pozos profundos, a una distancia no superior de 100 m del cauce del río Bogotá; con este planteamiento se realizaron 40 visitas a diferentes fincas teniendo como parámetro de muestreo el sitio de captación de agua y disponibilidad de realizar el trabajo de investigación.

En la segunda fase —que aborda la construcción del sistema humedal artificial— los pilares metodológicos están basados en la construcción de un sistema físico y biológico, se diseñó teniendo como soporte un tanque con una capacidad de 5000 L. Se emplearon tres conjuntos de mallas 7H, 14 mm y de 4 ¼ de acero inoxidable.

El principal medio de filtración fue gravilla de diferente granulometría [13], antracita de acuerdo con el boletín técnico AG.009 [14], en su evaluación de la eficiencia de desinfección mediante MIOX (agentes oxidantes mixtos) como se muestra en la Figura 2.

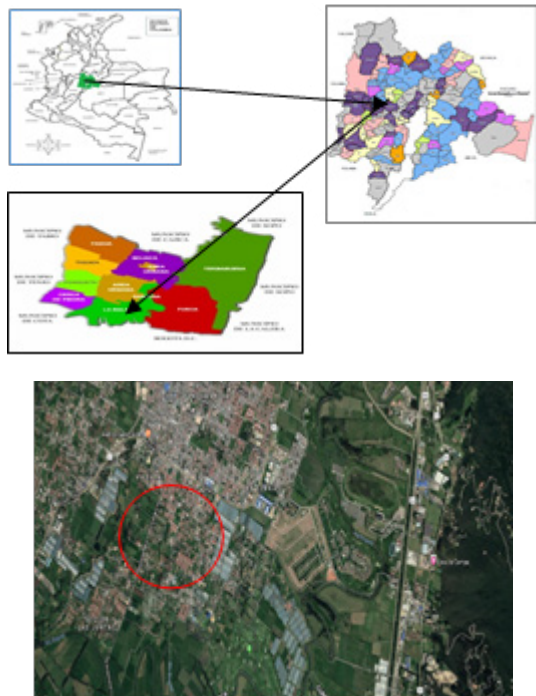


Figura 1. Ubicación de la zona de estudio

Fuente: Corporación Autónoma Regional de Cundinamarca (2017).

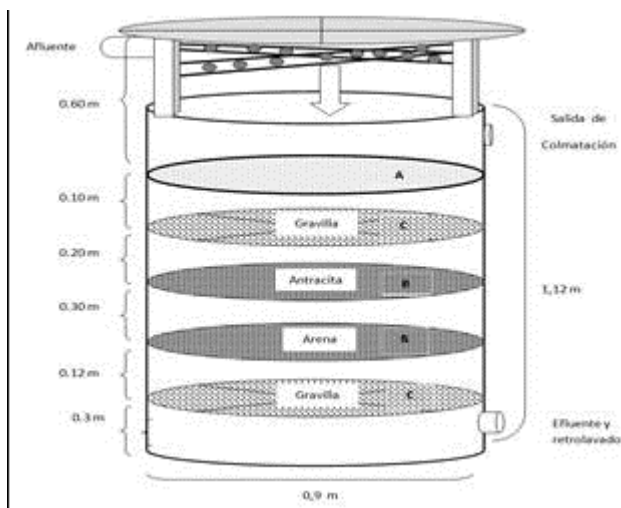


Figura 2. Ubicación de material filtrador en el sistema físico

Fuente: [14].

El sistema biológico posee recirculación a través de dos depósitos que tienen una dimensión de 50m² con un grado de pendiente de 20°. La oxigenación del sistema se logró a través de dos motobombas de 6.5 Hp [15]; la obtención, transporte y desinfección del material vegetal [16], [17].

El análisis de variables físicas del agua se realizó teniendo en cuenta el protocolo [17]. Las variables químicas fueron realizadas con el equipo marca Oakton, serie 417584, por metodología estándar; la evaluación microbiológica se realizó de acuerdo con los protocolos de bacterias [18] a nivel de hongos filamentosos, levaduras [19] y de protistas [20]. El análisis biológico de las macrófitas [21] a nivel del grupo control de *Spinacia oleracea* se realizó por medio de transectos [22].

RESULTADOS

Luego del proceso de biodepuración se registraron valores de retención hidráulica entre 25 y 30 m³/h, siendo congruente a nivel funcional con los resultados presentados por [23], [24] y aptos para las condiciones semejantes entre los estudios.

La Figura 3 muestra los resultados de una reducción del 0.95%, luego de pasar por el sistema obteniendo un valor final de 7.87. La Figura 4 muestra la temperatura con un porcentaje de reducción del 1.3% luego de pasar por el sistema obteniendo un valor final de 16.6 °C.

La temperatura que se generó en el sistema con el tiempo de retención no superior a los ocho días es cercana a la temperatura promedio ambiental de acuerdo con la estación meteorológica del Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM), la cual informó para este estudio que la temperatura media anual es de 15.7 °C. Bajo el cuadro comparativo metabólico de los microorganismos, estos presentan un comportamiento con un rango ideal de 17°C a 35°C [25], generando un medio adecuado para su crecimiento.

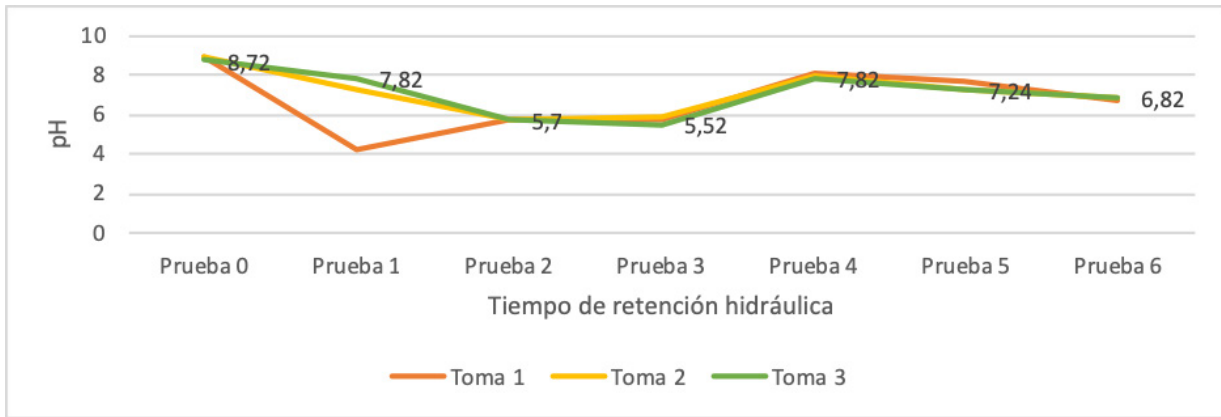


Figura 3. Seguimiento del pH durante el estudio.

Fuente: elaboración propia.

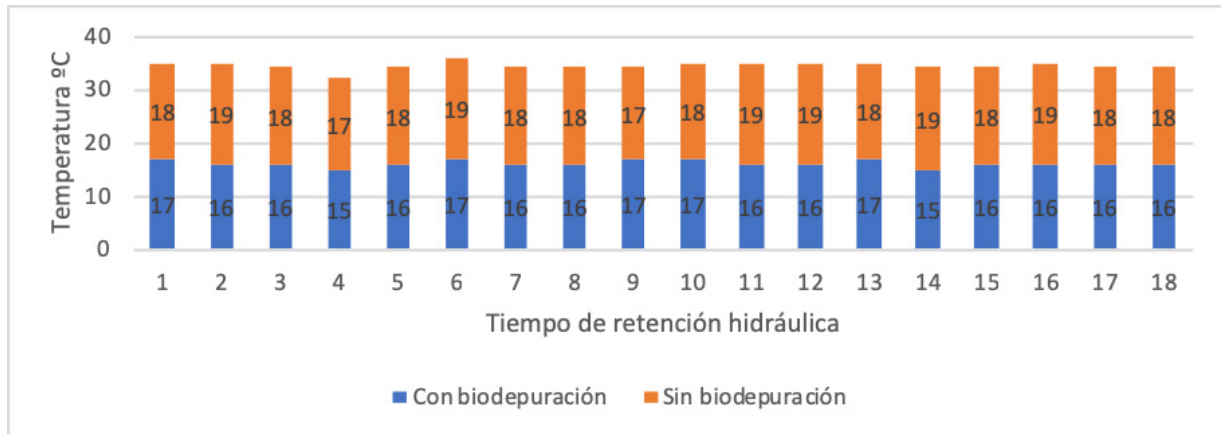


Figura 4. Comparativa de temperatura entre tratamientos.

Fuente: elaboración propia.

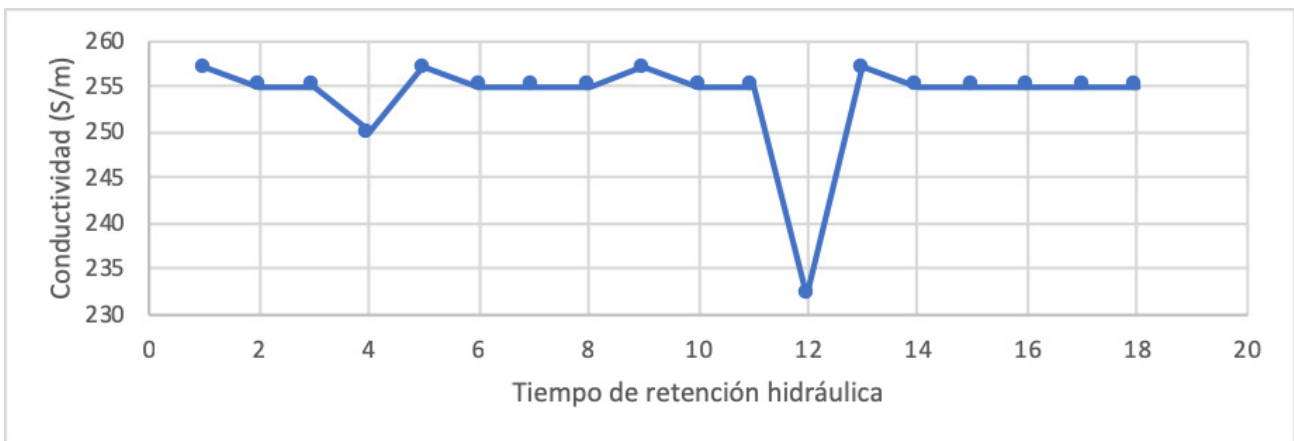


Figura 5. Comparativa de conductividad al inicio y final del proceso de biodepuración.

Fuente: elaboración propia.

La Figura 5 presenta la conductividad eléctrica, la cual varió de 495 S/m a 286 S/m al ser observada al inicio y finalización del proceso de biodepuración; adicionalmente, está relacionada directamente con la viscosidad del agua dada por la adición de elementos y con la temperatura que aumentó durante el proceso de biodepuración, como se mencionó en el apartado anterior. Se observó una caída en el día doce debido a alteraciones antrópicas en el sistema, demostrando la sensibilidad frente a los resultados de biodepuración [26].

Se observa que los dos provocan una reducción siendo óptimo el proceso físico, químico y

biológico; adicionalmente, se observa la tendencia de baja de los máximos cada vez menores durante la depuración.

La Figura 7 presenta los resultados de TDS luego del paso por los dos sistemas, como se mencionó anteriormente hay una estrecha relación entre TDS y la conductividad ocasionada por la interacción de las partículas del bloque de agua como Na⁺ y Cl⁻ [27]. En cuanto a lo microbiológico, el método de filtración por membrana determinó que al inicio del proceso de biodepuración el recuento de Unidades Formadoras de Colonia (UFC) era de 2400 NMP por 100 ml, luego del paso por el sistema físico fue de 100UFC.

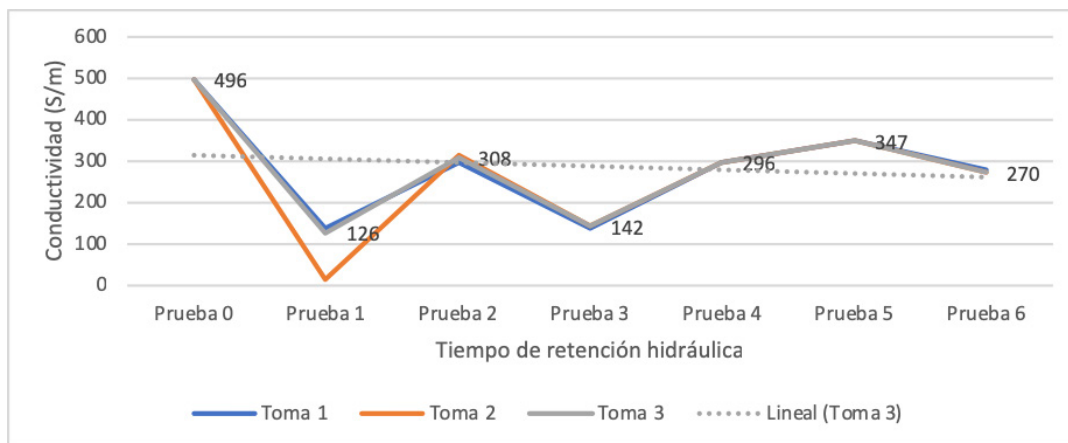


Figura 6. Comparativa de conductividad entre el sistema físico y biológico.

Fuente: elaboración propia.



Figura 7. Comportamiento TDS posterior a la biodepuración.

Fuente: elaboración propia.

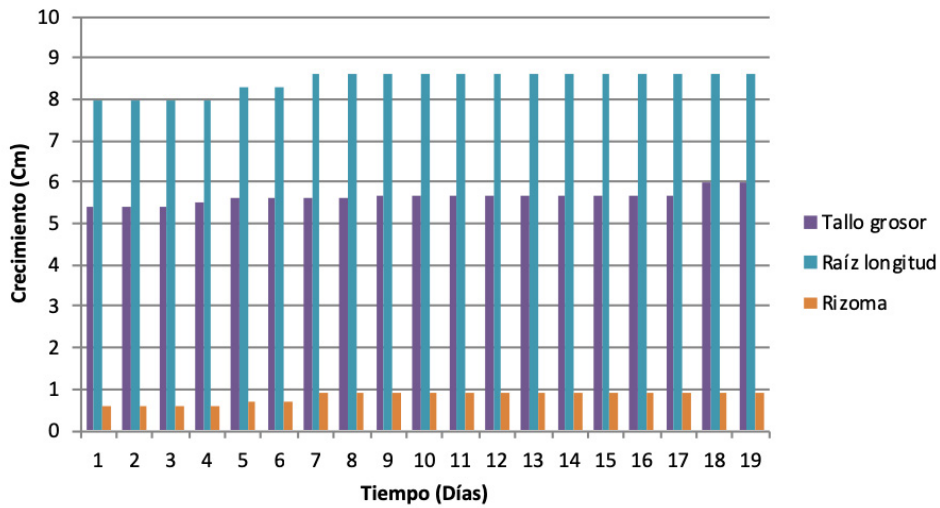


Figura 8. Comportamiento de las macrófitas durante el estudio.

Fuente: elaboración propia.

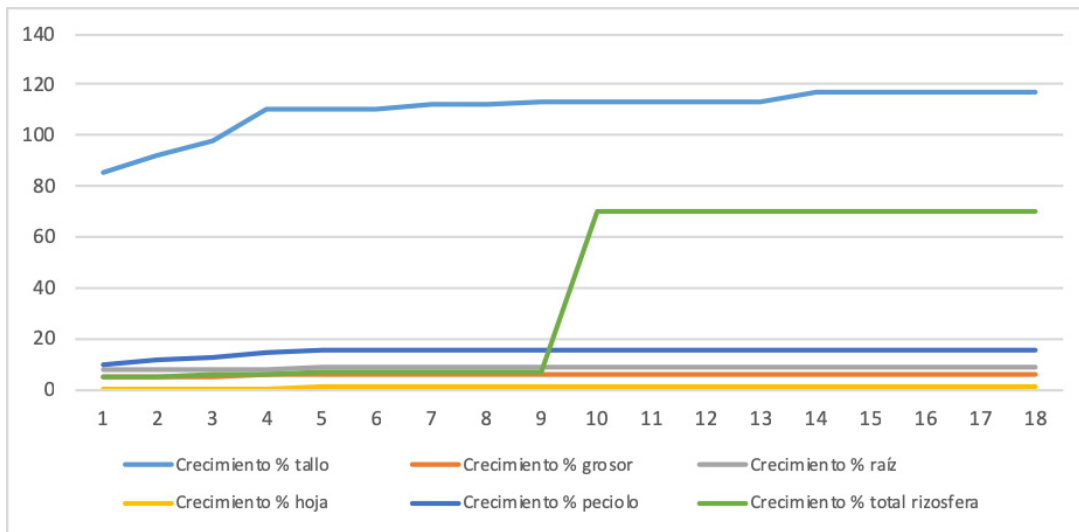


Figura 9. Comportamiento general de las tres macrófitas durante el estudio.

Fuente: elaboración propia.

Frente a *Eichornnia crassipes*, los aspectos fundamentales en cuando a crecimiento fueron el área foliar y peciolo; con respecto a peso, se evidenció un aumento del doble, pasando de 150 a 300 g, por lo que existe una alta capacidad de crecimiento en el sistema de biodepuración artificial como se observa en la Figura 8. En la Figura 9 resalta el crecimiento de la rizosfera en 8.7 cm para la etapa inicial del estudio a 25.9 cm, representando un 35% de la biomasa total, seguido del tallo con un

área de roseta de 0.6 cm a 11 cm y foliar de 4.75 a 9.45 cm

Frente al crecimiento de *Scirpus californicus* se destaca el porcentaje de peciolo y rizosfera, esto es provocado por su amplio conjunto de tejido meristemático y alta tasa de aprovechamiento de elementos como sodio y hierro [11]; además, presentó hojas y tallos engrosados debido a su estrategia de promover un aerénquima que transporta el oxígeno

a la zona de la rizosfera, activando el potencial re-
dox que promovió la oxidación en el sistema.

DISCUSIÓN

El análisis de pH obtenido en el sistema luego de la biodepuración es apto para generar procesos de adaptación y crecimiento de las macrófitas [28], las cuales presentan rangos entre 5.0 y 9.0 siendo óptimos. A medida que las plantas aumentaron su tasa de crecimiento se vio favorecido el proceso simbiótico planta-microorganismo, lo que benefició la fotosíntesis dentro de la columna de agua y activó la remoción de dióxido de carbón [29]. Al aumentar la biomasa vegetal en el sistema los valores de la tasa respiratoria e intercambio anaerobio-aerobio derivaron en un menor rango de pH, al descender generó que el sistema tuviera un comportamiento neutro y benefició a *Spinacia oleracea* en su proceso productivo. Es prudente mencionar que el pH se redujo favoreciendo el crecimiento Protista y Fungi, además de la evidencia obtenida de los resultados microbiológicos [7].

En consecuencia, la variación se relaciona con el cambio de temperatura que, a su vez, acelera la actividad microbiana y la conductividad, aspectos importantes que benefician a los microorganismos fotosintetizadores [7]. Al comparar la conductividad hidráulica eléctrica con la conductividad eléctrica se determina que el rango de eliminación de sólidos disueltos es del orden de 90%, el cual incide directamente en la conductividad.

Los autores mencionan que un tratamiento bajo la técnica de sistemas artificiales, como el de este estudio, tiende a que en el proceso de filtración que tiene una alta densidad ocasione la reducción entre partículas, reduciendo el volumen de aire [30]; bajo la consecuencia anterior, se analiza que los sistemas físicos y biológicos interactuaron y afectaron positivamente la conductividad [31]. El principio anterior establece que los microorganismos resultado de su metabolismo ejercieron presión sobre el sustrato, variando la impedancia provocada

por la captura de sodio y cloro que ejercen reducción de salinidad afectando la conductividad [32]; se resalta la efectividad del sistema físico debido a la capacidad de adherencia de las partículas contaminantes al carbon activado (antracita) que se evidencian en el momento de los retrolavados.

En este escenario, los resultados muestran que los TDS descendieron durante la biodepuración de 248 a 162 ppm, provocado por la oxigenación y reciclado del agua en los dos subsistemas; adicionalmente, el proceso de sedimentación, filtración y adhesión generó la reducción de sales, lo que hace que el oxígeno aumente y la conductividad descienda. Posterior a la reducción, se observó el aumento de la cantidad de oxígeno disuelto provocado por el mayor proceso fotosintético de microorganismos y plantas en el sistema [33] (Figura 10).

El análisis microbiológico determinó la reducción de coliformes durante las primeras dos semanas de 2400 y 1600 NMP, en las siguientes dos semanas se observó una reducción de 95% de coliformes totales y 92% de fecales, lo cual generó un valor apto de acuerdo con el límite estandarizado de 240 NMP/100 ml para aguas de riego, identificando el destacado papel de las macrófitas en procesos de biodepuración por lo cual se evidencia su importancia en procesos de conservación de cuerpos hídricos [34]. Es importante destacar su elevado nivel de procesamiento de micro y macronutrientes y agentes patógenos en sistemas acuáticos contaminados [35].

El comportamiento frente a metales pesados fue contemplado en este estudio desde un inicio, sin embargo, las aguas extraídas del pozo bajo los resultados arrojados muestran ausencia de metales pesados. Finalmente, se identificó en el cultivo de *Spinacia oleracea* a través del análisis estadístico comparativo, la diferencia en una mayor tasa de masa fresca total con un promedio del 51.6% y altura 25.6% frente a 40.3 y 21.2 cm de plantas regadas con aguas provenientes del biosistema y plantas regadas con agua sin tratar, como se observa en la Figura 11.



Figura 10. (a) Proceso inicial de biodepuración; (b) proceso final de biodepuración; (c) comparativa al inicio y final del proceso
Fuente: elaboración propia.



Figura 11. Disposición grupo control. (a) Cultivo regado con agua sin tratamiento; (b) cultivo regado con agua tratada.
Fuente: elaboración propia.

CONCLUSIONES

Se comprobó un biosistema de tratamiento de aguas provenientes de pozos profundos, identificando que es una propuesta de fácil construcción, la cual redundará en su mantenimiento sencillo. Se logró precisar que la utilización de un sistema físico y otro biológico logra depurar el suficiente fluido para un cultivo de tres hectáreas, esto significa un tiempo de retención hidráulica de tres a cinco días; adicionalmente, la simbiosis de macrófitas y microorganismos generó un máximo aprovechamiento y depuración del elemento de nitrógeno y coliformes. Se logra considerar que es necesario seguir trabajando de manera ambientalmente sostenible debido al alto grado de contaminación

que se identificó en el cuerpo de agua subterráneo ubicado en la sabana de Bogotá; finalmente, cabe mencionar que el crecimiento de *Spinacia oleracea* se vio favorecido por la experiencia, siendo hoy utilizado por la finca donde se elaboró el estudio.

RECOMENDACIONES Y AGRADECIMIENTOS

Se sugiere realizar trabajos con aguas de pozos subterráneos contemplando la presencia y ausencia de metales pesados, adicionalmente se debe identificar qué tan preciso es la depuración en sistemas con una tasa de recambio y necesidad más alta, además de su eficacia en otro tipo de cultivos

para consumo humano. Es preciso agradecer al señor Nelsón Velasquez, propietario del cultivo; a José Francisco Sánchez por la colaboración en el diseño y construcción del biosistema, y a los estudiantes de la Universidad Colegio Mayor de Cundinamarca, especialmente del grupo de investigación CEPARIUM.

REFERENCIAS

- [1] M. Molina, J. Sarukhán y J. Carabias, *El cambio climático: Causas, efectos y soluciones*. Ciudad de México: Fondo de Cultura Económica, 2017.
- [2] G. Roldán y J. J. Ramírez, *Fundamentos de Limnología neotropical*. Medellín: Universidad de Antioquia, 2008.
- [3] L. A. Ortega, L. P. Paz, D. Giraldo y M. Cadena, "Implementación de Servicios Integrados Participativos de Clima para la Agricultura (PICSA) en el TESAC-Cauca Colombia". [En línea]. Disponible en <https://ccaafs.cgiar.org/es/publications/Implementaci%C3%B3n-de-servicios-integrados-participativos-de-clima-para-la-agricultura#.XB0cO2hKjIU>
- [4] J. A. Hernández, A. T. Ortega y M. A. Márquez, "Reflujo gastroesofárico en pediatría ¿cuándo amerita tratamiento?: controversia de las últimas décadas", *Medica Sur*, vol. 15, no. 4, 288-294, 2008.
- [5] M. Y. Díaz, *Recuperación de sistemas forestales con especies nativas para la conservación de fuentes hídricas en el municipio de la Macarena-Meta "zona recuperación para la producción sur*, Tesis de grado, Universidad Nacional Abierta y a Distancia, Bogotá D.C., 2016.
- [6] A. Evseev, T. Krasovskaya, V. Tikunov and I. Tikunova, "Assessing the ecological services of the territories of traditional nature management in Nenets Autonomous Okrug," *Geography*, no. 3, pp. 134-139.
- [7] R. M. Atlas y R. Bartha, *Ecología microbiana y microbiología ambiental*. Madrid: Pearson España, 2002.
- [8] J.V. Davalos Parraga, *Diseño de un sistema de tratamiento para lixiviados del cantón La Concordia de la provincia de Santo Domingo de los Tsáchilas*, Tesis de grado, Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, Guayaquil, 2018.
- [9] J. Morales, *Sociedades rurales y naturaleza: en busca de alternativas hacia la sustentabilidad*. Jalisco: ITESO, 2004.
- [10] A. K. Kivaisi, "The potential for constructed wetlands for wastewater treatment and reuse in developing countries: a review", *Ecological Engineering*, vol. 16, no. 4, pp. 545-560, 2001. [https://doi.org/10.1016/S0925-8574\(00\)00113-0](https://doi.org/10.1016/S0925-8574(00)00113-0)
- [11] J. Vymazal, H. Brix, R. H. Kadlec., P. Cooper, R. Knight and R. Haberl, *Constructed wetlands for pollution control*. IWA Publishing, 2017.
- [12] J. Wang et al., "Capacity of various single-stage constructed wetlands to treat domestic sewage under optimal temperature in Guangzhou City, South China", *Ecological Engineering*, vol. 115, pp. 35-44, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2018.02.008>
- [13] J. Loba, S. Ramírez y J. E. Díaz, "Evaluación del coeficiente de uniformidad en cuatro emisores de riego usando filtración gruesa de flujo ascendente en capas", *Revista EIA*, vol. 8, no. 16, pp. 29-41, 2013.
- [14] J. S. Amézquita Rico and L.C. Beltrán Durango, *Evaluación de la eficiencia de desinfección mediante MIOX (agentes oxidantes mixtos) en la finca "El Rosalito" vereda de Chiguaza, Usme*, Tesis de grado, Universidad de La Salle, Bogotá D.C., 2016.
- [15] J. Sanz, C. Oliveros, C. Ramírez, U. López and J. Velásquez, Control de los flujos de café y agua en el módulo BECOLSUB.
- [16] E. N. Ogamba, S. C. Izah and B. P. Toikumo, "Water quality and levels of lead and mercury in Eichhornia crassipes from a tidal creek receiving abattoir effluent, in the Niger Delta, Nigeria", *Continental Journal of Environmental Science*, vol. 9, no. 1, pp. 13-25, 2015.

- [17] N. E. Coughlan, R. N. Cuthbert, T. C. Kelly and M. A. Jansen, "Parched plants: survival and viability of invasive aquatic macrophytes following exposure to various desiccation regimes", *Aquatic Botany*, vol. 150, pp. 9-15, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.aquabot.2018.06.001>
- [18] R. L. Droste and R. L. Gehr, *Theory and practice of water and wastewater treatment*. Wiley, 2018.
- [19] C. Fricker, "Análisis y control microbiológico de lodos de EDAR: la experiencia de Idexx en el Reino Unido", *Tecnoaqua*, no. 23, pp. 88-90, 2017.
- [20] A. Pérez, M. de los Ángeles, D. Garrido y A. T. Acebal, "Evaluación de metales pesados e impacto ambiental en los pozos 'Rive Fuente' y 'Bárbara' del poblado El Cobre", *Revista Cubana de Química*, vol. 30, no. 1, pp. 68-76, 2018.
- [21] D. A. Ross, H. M. Guzmán, C. Potvin and V. J. Van Hinsberg, "A review of toxic metal contamination in marine turtle tissues and its implications for human health", *Regional Studies in Marine Science*, vol. 15, pp. 1-9, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.rsma.2017.06.003>
- [22] F. Zuñe et al., "Línea base de la flora y fauna del Santuario Nacional Pampa Hermosa, Sector San Damián", *Revista Ciencia, Tecnología y Humanidades*, vol. 7, no. 2, pp. 11-38, 2016.
- [23] J. D. Villegas, J. Guerrero, J. M. Castaño and D. Paredes, "Septic Tank (ST)-Up flow anaerobic filter (UFAF). Subsurface flow constructed wetland (SSF-CW) systems aimed at wastewater treatment in small localities in Colombia", *Revista Técnica de la Facultad de Ingeniería, Universidad del Zulia*, vol. 29, no. 3, pp. 269-281, 2006.
- [24] G. Melo, *Evaluación fitodepurante de un sistema biológico artificial en aguas de riego como alternativa para la sostenibilidad del recurso hídrico*, Tesis de grado, Universidad de La Sabana, Chía, 2013.
- [25] M. T. Madigan, J. M. Martinko and J. Parker, *Brook, Biología de los microorganismos*.
- [26] N. Garin et al., "Cambios en la viscosidad del agua con espesantes por la adición de fármacos altamente prescritos en geriatría", *Nutrición Hospitalaria*, vol. 27, no. 4, pp. 1298-1303, 2012.
- [27] M. N. Bonilla, A. I. Ayala, S. González, J. D. Santamaría y S. E. Silva, "Calidad fisicoquímica del agua del distrito de riego 030 'Valsequillo' para riego agrícola", *Revista Iberoamericana de Producción Académica y Gestión Educativa*, vol. 2, no. 4, 2015.
- [28] J. Celis, J. Junod y M. Sandoval, "Recientes aplicaciones de la depuración de aguas residuales con plantas acuáticas", *Theoria*, vol. 14, no. 1, 2005.
- [29] J. Camargo y A. Alonso, "Contaminación por nitrógeno inorgánico en los ecosistemas acuáticos: problemas medioambientales, criterios de calidad del agua, e implicaciones del cambio climático", *Ecosistemas*, vol. 16, no. 2, 2007.
- [30] T. Cakmakci, Ü. Sahin, F. M. Kiziloglu, S. Tüfenkci, Y. Kuslu and F.S. Erkus, "Wastewater Treatment in Constructed Wetlands and Suggestions for the Use of Constructed Wetlands in Cold-Climate Regions", *Yyü Tar Bil Derg*, vol. 27, no. 4, 2017.
- [31] M. A. Charry y N. A. Castellanos, *Evaluación de la calidad físico-química y biológica de la laguna de ubaque para el diseño y actualización de las medidas de manejo ambiental*, Tesis de grado, Universidad Libre de Colombia, Bogotá D.C., 2016.
- [32] C. Murphy, A. R. Rajabzadeh, K. P. Weber, J. Nivala, S. D. Wallace and D.J. Cooper, "Nitrification cessation and recovery in an aerated saturated vertical subsurface flow treatment wetland: Field studies and microscale biofilm modeling", *Bioresource Technology*, vol. 209, pp. 125-132, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2016.02.065>
- [33] M. L. Hernández y M. A. Sisco, Propuesta de mejora del proceso de potabilización para

aguas eutroficadas presentes en la planta de potabilización Dr. Alejo Zuloaga.

- [34] T. Sricoth, W. Meeinkuir, J. Pichtel, P. Taeproyon and P. Saengwilai, "Synergistic phytoremediation of wastewater by two aquatic plants (*Typha angustifolia* and *Eichhornia crassipes*) and potential as biomass fuel", *Environmental Science and Pollution Research*, vol. 25, no. 6, 2018. <https://doi.org/10.1007/s11356-017-0813-5>
- [35] R. Núñez, Y. Meas, R. Ortega y E. J. Oliguín, "Fitorremediación: fundamentos y aplicaciones", *Revista Ciencia*. [En línea]. Disponible en: https://www.revistaciencia.amc.edu.mx/images/revista/55_3/Fitorremediacion.pdf

