

Aplicación de humedal construido híbrido para tratamiento de lixiviados de relleno sanitario de la ciudad de Rafaela

Rafaela's landfill leachate treatment applying hybrid constructed wetland.

Presentación: 05/08/2024

Doctorando:

Gonzalo GUTIÉRREZ

Universidad Tecnológica Nacional Facultad Regional Rafaela (UTN FRRa), Rafaela, Santa Fe - Argentina
Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET), Buenos Aires - Argentina
Correo: gonzalo.gutierrez@frra.utn.edu.ar

Directora:

Ma. Cecilia PANIGATTI

Codirectora:

Ma. Celeste SCHIERANO

Resumen

La descomposición anaeróbica de residuos orgánicos en rellenos sanitarios produce biogás y un efluente líquido conocido como lixiviado, cuyo tratamiento y disposición final representan un desafío ambiental significativo. Este estudio evalúa la eficiencia de un humedal construido híbrido para eliminar contaminantes del lixiviado. El sistema consta de un humedal de flujo subsuperficial vertical y uno de flujo subsuperficial horizontal dispuestos en serie. Se instalaron cuatro mesocosmos en un invernadero, usando *Typha domingensis* como macrófita y hormigón celular curado en autoclave y arena como sustratos. Se midieron parámetros fisicoquímicos antes y después del tratamiento, obteniéndose eficiencias de remoción totales del 43% para sólidos suspendidos, 64% para demanda química de oxígeno, 89% para demanda biológica de oxígeno, 93% para fósforo total, 98% para amonio y 86% para nitrógeno total Kjeldahl. Los resultados demuestran que este humedal híbrido es una solución efectiva y sostenible para el tratamiento de lixiviados, mejorando significativamente la calidad del efluente final.

Palabras clave: Humedal Construido Híbrido, Lixiviado, Relleno Sanitario, Hormigón Celular Curado en Autoclave

Abstract

Anaerobic decomposition of organic waste in landfills produces biogas and leachate, which treatment and final disposal represent a significant environmental challenge. This study evaluates the efficiency of a hybrid constructed wetland for removing contaminants from leachate. The system consists of a vertical subsurface flow wetland and a horizontal subsurface flow wetland arranged in series. Four mesocosms were installed in a greenhouse, using *Typha domingensis* as macrophyte and autoclaved aerated concrete and sand as the substrates. Physicochemical parameters were measured before and after treatment, achieving removal efficiencies: 43% for suspended solids, 64% for chemical oxygen demand, 89% for biological oxygen demand, 93% for total phosphorus, 98% for ammonium, and 86% for total Kjeldahl nitrogen. The results demonstrate that this hybrid constructed wetland is an effective and sustainable solution for leachate treatment, significantly improving the quality of the final effluent.

Keywords: Hybrid constructed wetland, Landfill Leachate, Landfill, Autoclaved Aerated Concrete.

Introducción

Los rellenos sanitarios son instalaciones diseñadas y administradas para la disposición final de residuos sólidos urbanos (RSU) y, además, para proteger el medio ambiente de los contaminantes que pueden estar presentes en ellos (Ramón & Rubio, 2022). Son aplicados mundialmente debido a su bajo costo y alto rendimiento para el tratamiento de estos residuos (Wang et al., 2022).

Según Wdowczyk et al. (2022) los RS representan un desafío en la gestión de RSU, particularmente por el tratamiento del efluente que producen. Los lixiviados representan un riesgo a la calidad de las aguas superficiales y subterráneas si no son tratados correctamente, debido a su composición. Dentro de los tratamientos convencionales se pueden encontrar: fangos activados, ósmosis inversa, intercambio iónico, ultrafiltración y coagulación-floculación. Estas alternativas requieren de altos costos de construcción, mantenimiento y operación (Bakhshoodeh et al., 2020).

Maine et al. (2022) presentan una alternativa a los métodos convencionales a la que denominan Soluciones Basadas en la Naturaleza (SBN). Un ejemplo son los Wetland o humedales construidos (HC), los cuales se caracterizan por ser diseñados para mejorar la calidad del agua con requisitos mínimos de energía externa, bajos costos de construcción, fácil operación y mantenimiento y beneficios ambientales sustanciales (Ji et al., 2022). Éstos emulan y optimizan los procesos físicos, químicos y biológicos que ocurren en los humedales naturales para la depuración de aguas residuales. Estos procesos se llevan a cabo debido a los principales componentes de estos sistemas que son el sustrato, las macrófitas y los microorganismos.

Según el flujo del efluente dentro del HC, los mismos pueden clasificarse en HC de flujo libre o de flujo subsuperficial. En estos últimos el agua residual a tratar fluye por debajo de la superficie, pudiendo seguir una trayectoria vertical en los HC de flujo subsuperficial vertical (HFSSV) u horizontal en los HC de flujo subsuperficial horizontal (HFSSH). Para el presente estudio se utilizó un HC híbrido compuesto por estos dos tipos de HC dispuestos en serie. Esta combinación tiene como objetivo explotar las ventajas de un tipo de HC para contrarrestar las desventajas del otro, haciendo foco en la reducción de los compuestos nitrogenados.

Diferentes estudios han analizado la tecnología de HCs como aplicación para el tratamiento de lixiviados en diversas partes de Latinoamérica: Colombia (Madera-Parra et al., 2014), Brasil (Cano et al., 2019) y Argentina (Silvestrini et al., 2019). Entonces, es necesario continuar ampliando los conocimientos sobre el uso de esta tecnología para los tratamientos de lixiviados y, especialmente, en las condiciones climáticas propias de nuestra región.

El objetivo del trabajo es evaluar la eficiencia de remoción de contaminantes de lixiviados de RS mediante la aplicación de un humedal construido híbrido, compuesto por un HFSSV y un HFSSH a lo largo de varias estaciones, empleando *Typha domingensis* y hormigón celular.

Desarrollo

Materiales y métodos

Bajo un invernadero, se dispusieron por duplicado, mesocosmos cilíndricos (0,35 x 0,60 m; diámetro x altura) simulando HFSSV y mesocosmos cilíndricos truncados longitudinalmente (0,35 x 0,30 x 0,65 m; ancho x alto x largo) simulando HFSSH, de acuerdo a lo detallado en la Figura 1.

En los HFSSV se dispuso un lecho de 10 cm de residuos de Hormigón Celular Curado en Autoclave (HCCA, Retak®) tamizado con Tamiz IRAM N° 1/2, seguido de una capa de 30 cm de arena fina previamente tamizada con Tamiz IRAM N°8 y finalmente una capa de 10 cm de HCCA.

Los HFSSH fueron completamente llenados con HCCA hasta una altura de 25 cm. El sustrato utilizado, HCCA, se caracteriza por su baja densidad y gran porosidad debido a la incorporación de agentes espumógenos en su elaboración. En Gutierrez et al. (2022) se realizó un estudio de selección de sustratos y en el cual fue seleccionado HCCA por su capacidad para remover contaminantes y promover la circularidad al ser un residuo de construcción.

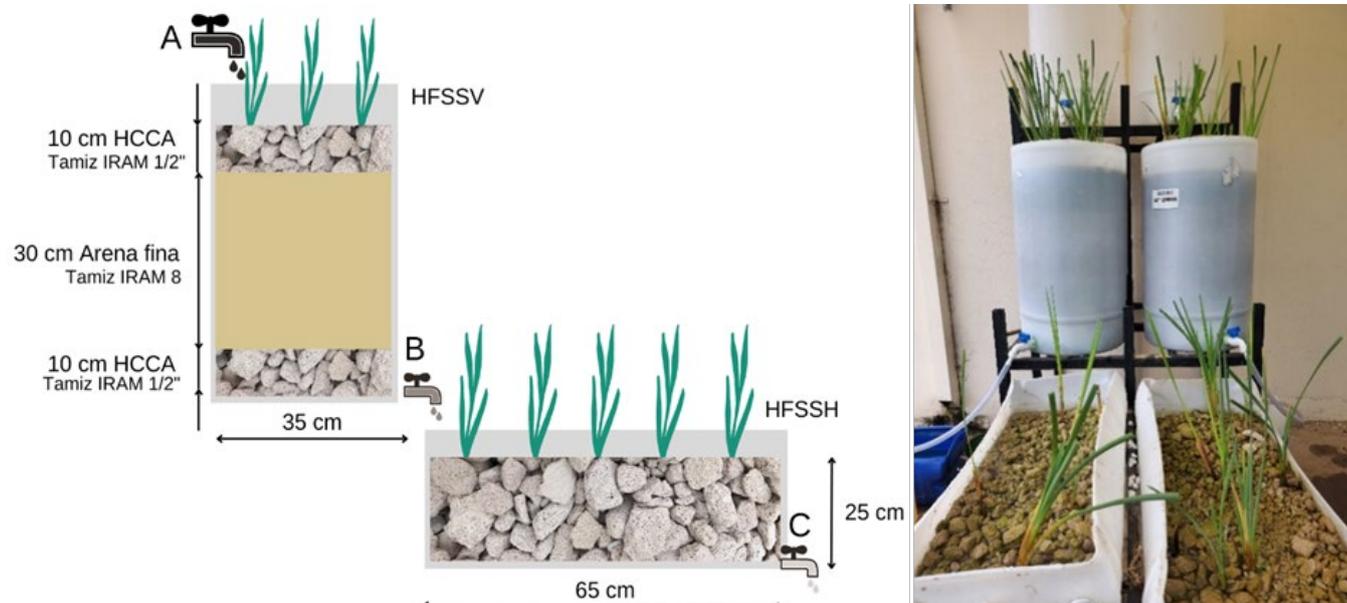


Figura 1 – Configuración del HC híbrido (izq.) y foto de los mesocosmos simulando HC híbrido real (der.)

Recolección y adaptación de plantas. Muestreo de lixiviado.

Typha domingensis (Totora) fue la macrófita elegida debido a su gran productividad y eficiencia de eliminación de contaminantes (Maine et al., 2007) y fue extraída de humedales naturales ubicados en zonas rurales cercanas a la ciudad de Rafaela. Previo al inicio del experimento, se plantaron, se cortaron todas a una altura uniforme de 40 cm y se aclimataron regándolas con agua de red durante la primera quincena y efluente diluido (33%) durante la segunda. El efluente empleado durante toda la experiencia fue extraído de un pozo de monitoreo de lixiviado del RS de la ciudad de Rafaela.

Análisis fisicoquímicos y eficiencias de remoción.

Se realizaron experiencias del tipo Batch en el período junio 2023 - marzo 2024, en las cuales se midió la concentración de contaminantes del efluente al inicio y al final de cada tratamiento. Los tiempos de retención hidráulica (TRH) fueron de 12 horas para los HFSSV y 7 días para los HFSSH. El sistema de alimentación del lixiviado en el sistema puede ser explicado de la siguiente manera: El Efluente A (lixiviado real, inicial) se riega sobre el HFSSV (6 litros aproximadamente) y luego de un TRH de 12 horas, se recolecta el efluente obtenido (B). Luego, nuevamente, se riega el HFSSV con efluente A. Consecuentemente, luego de 12 horas, se obtiene un total aproximado de 12 litros de efluente B, con los que se riega el HFSSH, a partir del cual y luego de un TRH de 7 días, se obtiene el efluente tratado (C).

Se realizaron análisis semanales sobre la muestra de entrada al HFSSV (A), sobre el de salida de HFSSV (B) y sobre el de salida del HFSSH (C). Los parámetros analizados fueron los siguientes: pH, Conductividad Eléctrica (CE), Alcalinidad Total (AT), Sólidos Suspendedos Totales (SST), Nitrógeno Total Kjeldahl (NTK), amonio (NH_4^+), nitrato (NO_3^-), nitrito (NO_2^-), fósforo total (PT), Demanda Química de Oxígeno (DQO) y Demanda Biológica de Oxígeno (DBO). Para todos los análisis se utilizó la metodología propuesta por APHA (2017). Con las concentraciones halladas para cada contaminante a la entrada y a la salida de cada mesocosmo se calcularon eficiencias de remoción.

Se utilizó el Test ANOVA de una vía a fin de evaluar la significancia del tipo de tratamiento utilizado (factor con 3 niveles: Inicial, HFSSV y HFSSH) en una variable de interés (concentraciones). Se chequeó a priori

homocedasticidad de varianzas y normalidad de datos y se aplicó el test de diferencia mínima significativa (LSD) de Fisher para identificar diferencias significativas. Se trabajó con un nivel de significancia del 95% y se utilizó el software Statgraphics Plus 5.0 para todos los cálculos matemáticos.

Resultados

En la Tabla 1, se disponen los valores promedio de las concentraciones para las diferentes etapas del tren de tratamiento y las eficiencias de remoción de cada proceso y totales ($n=18$).

	A	B	C	Remoción HFSSV (%)	Remoción HFSSH (%)	Remoción SISTEMA (%)
pH	7.7 ± 0.2	8.3 ± 0.3	8.4 ± 0.4	-	-	-
CE (mS/cm) (a 20 °C)	6.2 ± 1.0	5.5 ± 0.8	5.2 ± 0.8	-	-	-
AT (mg/l CaCO ₃)	1890.56 ± 617.2	547.3 ± 293.3	321.6 ± 221.8	74.91%	51.85%	87.92%
DQO [mg O ₂ /l]	303.2 ± 165.4	180.3 ± 62.5	108.1 ± 32.2	40.52%	40.04%	64.34%
DBO [mg O ₂ /l]	70.9 ± 37.4	14.6 ± 10.8	7.4 ± 3.9	59.23%	72.95%	88.97%
PT [mg P/l]	1.5 ± 1.5	0.3 ± 0.2	0.1 ± 0.1	83.12%	57.69%	92.86%
SST [mg/l]	21.9 ± 12.2	13.7 ± 8.9	12.3 ± 9.9	36.91%	11.01%	43.86%
NH ₄ ⁺ [mg NH ₄ ⁺ /l]	245.1 ± 177.5	29.9 ± 28.8	2.8 ± 1.9	87.81%	90.63%	98.89%
NTK [mg N/l]	231.6 ± 149.1	45.9 ± 29.2	31.5 ± 21.8	80.19%	31.26%	86.38%
NO ₂ ⁻ [mg NO ₂ ⁺ /l]	1.4 ± 1.0	67.5 ± 89.7	5.9 ± 13.2	4690.07%	91.19%	-321.99%
NO ₃ ⁻ [mg NO ₃ ⁺ /l]	99.4 ± 101.9	422.5 ± 228.6	451.8 ± 158.2	-325.23%	-6.94%	-354.74%

Tabla 1 - Valores promedio de concentraciones por etapa de tratamiento y eficiencias de remoción respectivas y totales.

En cuanto a los valores de pH, si bien se observa un aumento de los valores promedio a lo largo del proceso, no han sufrido grandes variaciones y se encuentran cercanos a la neutralidad en todos los casos. Para Conductividad Eléctrica, se observa una disminución a lo largo del proceso, la cual podría atribuirse a la disminución de contaminantes que aportan a este parámetro. De manera similar, en Alcalinidad Total se observa una disminución notable obteniendo en el primer tratamiento (HFSSV) una eliminación cercana al 75% de este parámetro y 88% en el tratamiento completo (HFSSV + HFSSH). Para los parámetros de DQO y DBO. Se hallaron diferencias significativas entre las concentraciones de las tres etapas para ambos contaminantes.

En el caso de PT, no se detectaron diferencias significativas entre concentraciones de cada etapa del tratamiento, pero si se halló diferencias significativas entre los valores iniciales y los valores de salida de cada tratamiento. La adsorción sobre el sustrato es uno de los principales mecanismos de remoción de fósforo (Maine et al., 2009). La remoción de este contaminante en nuestro estudio puede deberse a la composición del HCCA, ya que se compone principalmente de agentes alcalinos y, usualmente, contiene polvos metálicos (como aluminio o zinc) como agentes aireantes, cuyo objetivo es reducir su densidad y, además, actúan como precipitantes para los fosfatos (Narayanan y Ramamurthy, 2000).

Según Shukla et al. (2024) los principales mecanismos para eliminar SST son los procesos físicos de filtración sobre el sustrato y la sedimentación. Por otro lado, según Vymazal (2022), este parámetro es uno de los que posee mayores eficiencias de remoción en la tecnología de HCs. Sin embargo, este no fue el caso, siendo la eficiencia de remoción de ambas etapas de 37%, 11%, respectivamente, y del 44% para el sistema completo. Si bien se han detectado diferencias significativas entre las concentraciones de SST del efluente de ingreso y los demás, otros estudios han reportado mayores valores de remoción. Esto puede deberse a la presencia de material proveniente de descomposición orgánica o del mismo sustrato, como la arena como así también a que los valores de ingreso al sistema son reducidos.

Ayaz et al., (2012) reportan al proceso de nitrificación-desnitrificación como la principal vía por la que este compuesto es eliminado. Las eficiencias de remoción obtenidas para NTK fueron de 80% (HFSSV), 31% (HFSSH) y 86% para el sistema completo. Se han detectado diferencias significativas entre concentraciones iniciales y los valores de concentraciones de ambas etapas del sistema.

El parámetro amonio fue reducido aproximadamente en un 98% en el sistema total (88% y 89% para HFSSV y HFSSH respectivamente). Wdowczyk et al. (2022) estudió la aplicación de HFSSV utilizando diferentes sustratos obteniendo remociones de amonio cercanas al 97%. Si bien esta configuración es la más efectiva en la remoción de este contaminante, en nuestro caso ambas etapas obtuvieron eficiencias de remoción similares y ambas marcaron diferencias significativas con respecto a los valores de las concentraciones de amonio iniciales.

En Tabla 1, observando los valores y eficiencias de remoción de los parámetros de NTK y Amonio, se puede inferir que los valores de NTK están compuestos principalmente por nitrógeno amoniacal y sólo una reducida parte de nitrógeno orgánico. Debido a adecuadas condiciones aerobias en el HFSSV, por medio de nitrificación, se han conseguido altas remociones de ambos parámetros. Los HC híbridos se caracterizan por combinar ventajas individuales contribuyendo a la eliminación de compuestos nitrogenados mediante condiciones aeróbicas y anaeróbicas en cada una de las etapas.

Con respecto a nitritos y nitratos, se han obtenido mayores concentraciones de estos contaminantes al final del tratamiento. Esto puede atribuirse a la alimentación intermitente en el humedal vertical, que produce una elevada oxigenación en el sustrato, promoviendo el proceso aerobio de nitrificación. En este proceso los productos intermedios son los nitritos y los finales son los nitratos. En el estudio de Silvestrini et al. (2019) se han obtenido resultados similares en la generación de nitratos, demostrando un proceso de nitrificación-desnitrificación incompleto debido de oxígeno disponible.

Conclusiones

La combinación de HFSSV y HFSSH resultó una alternativa viable como tratamiento para lixiviados de relleno sanitario ya que evidenció mejorar la calidad del efluente y eliminar potenciales contaminantes.

En términos generales, tanto HFSSV y HFSSH han marcado diferencias significativas en cuanto a los valores de ingreso al sistema en diferentes parámetros.

La utilización del sustrato HCCA también resultó una opción viable como elemento fundamental en el humedal construido híbrido permitiendo que se obtenga un efluente de mejor calidad y promueve la circularidad al ser un residuo de construcción.

Referencias

- APHA. (2017). *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater*, 23rd Edition.
- Ayaz, S. C., Aktaş, Ö., Fındık, N., Akça, L., & Kınacı, C. (2012). Effect of recirculation on nitrogen removal in a hybrid constructed wetland system. *Ecological Engineering*, 40, 1-5. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2011.12.028>
- Bakhshoodeh, R., Alavi, N., Oldham, C., Santos, R. M., Babaei, A. A., Vymazal, J., & Paydary, P. (2020). Constructed wetlands for landfill leachate treatment: A review. *Ecological Engineering*, 146, 105725. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2020.105725>
- Cano, V., Vich, D. V., Rousseau, D. P., Lens, P. N., & Nolasco, M. A. (2019). Influence of recirculation over COD and N-NH₄ removals from landfill leachate by horizontal flow constructed treatment wetland. *International journal of phytoremediation*, 21(10), 998-1004. <https://doi.org/10.1080/15226514.2019.1594681>
- Gutiérrez, G.; Schierano, M. C.; Panigatti, M. C.; Boglione, R. y Pagaburu, A. "Aplicación de humedales de flujo subsuperficial horizontal para el tratamiento de lixiviados de relleno sanitario." Libro del VIII Congreso Bianual PROIMCA y VI Congreso Bianual PRODECA (Villa María, Córdoba-Argentina) Pág. 387-398. <http://hdl.handle.net/20.500.12272/6748>
- Madera-Parra, C. A., Peña, M. R., Peña, E. J., & Lens, P. N. L. (2015). Cr (VI) and COD removal from landfill leachate by polyculture constructed wetland at a pilot scale. *Environmental Science and Pollution Research*, 22, 12804-12815. <https://doi.org/10.1007/s11356-014-3623-z>
- Maine, M. A., Sanchez, G. C., Hadad, H. R., Caffaratti, S. E., del Carmen Pedro, M., Di Luca, G. A., ... & Nocetti, E. (2022). Hybrid wetland system for a pet-care center wastewater treatment. *Ecological Engineering*, 182, 106700. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2022.106700>
- Maine, M. A., Sune, N., Hadad, H., Sánchez, G., & Bonetto, C. (2007). Removal efficiency of a constructed wetland for wastewater treatment according to vegetation dominance. *Chemosphere*, 68(6), 1105-1113. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2007.01.064>
- Maine, M.A., Suñé, N., Hadad, H.R., Sanchez, G.C., Bonetto, C. (2009). Influence of vegetation on the removal of heavy metals and nutrients in a constructed wetland. *J. Environ. Manag.* 90, 355-363. [10.1016/j.jenvman.2007.10.004](https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2007.10.004)
- Narayanan, N., & Ramamurthy, K. (2000). Microstructural investigations on aerated concrete. *Cement and Concrete Research*, 30(3), 457-464. [https://doi.org/10.1016/S0008-8846\(00\)00199-X](https://doi.org/10.1016/S0008-8846(00)00199-X)
- Ramón Vélez, G. N., & Rubio Cedillo, J. F. (2022). Propuesta para la implementación de una planta de clasificación de los residuos sólidos provenientes de la funda negra que se disponen en el relleno sanitario de Pichacay Cuenca-Ecuador (Bachelor's thesis, Universidad del Azuay). <http://dspace.uazuay.edu.ec/handle/datos/12184>
- Silvestrini, N. C., Maine, M. A., Hadad, H. R., Nocetti, E., & Campagnoli, M. A. (2019). Effect of feeding strategy on the performance of a pilot scale vertical flow wetland for the treatment of landfill leachate. *Science of the Total Environment*, 648, 542-549. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.08.132>
- Shukla, R., Gupta, D., & Mishra, V. K. (2024). Investigation of treatment potential of horizontal subsurface flow constructed wetland for the treatment of secondary treated sewage. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 21(3), 2965-2974. <https://doi.org/10.1007/s13762-023-05108-z>
- Vymazal, J. (2007). Removal of nutrients in various types of constructed wetlands. *Science of the total environment*, 380(1-3), 48-65. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2006.09.014>
- Vymazal, J. (2022). The historical development of constructed wetlands for wastewater treatment. *Land*, 11(2), 174. <https://doi.org/10.3390/land11020174>
- Wang, H., Yang, C., Wang, B., He, Z., & Fu, T. (2022). Nitrogen removal performance and microbiological characteristics for the landfill leachate treatment in a three-stage vertical flow constructed wetlands system. *Environmental Technology & Innovation*, 28, 102728. <https://doi.org/10.1016/j.eti.2022.102728>
- Wdowczyk, A., Szymańska-Pulikowska, A., & Domańska, M. (2022). Analysis of the bacterial biocenosis of activated sludge treated with leachate from municipal landfills. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 19(3), 1801. <https://doi.org/10.3390/ijerph19031801>