



scienceevolution

ISSN: 2810-8728 (En línea)

4.12

OCTUBRE - DICIEMBRE 2024

Artículo Científico

107 - 113



ARTÍCULO  
Científico

## ANÁLISIS COMPARATIVO DEL APROVECHAMIENTO DEL CARRIZO Y LIRIO ACUÁTICO EN LA FITORREMEDIACIÓN SOBRE AGUAS GRISES

COMPARATIVE ANALYSIS OF THE EFFICIENCY OF REED AND WATER HYACINTH IN THE PHYTOREMEDIATION OF GRAY WATER

**Nicolle Marce Gamboa**

nsmarceg@unjbg.edu.pe

ORCID: 0009-0004-6695-404X

UNIVERSIDAD NACIONAL JORGE BASADRE GROHMANN, Tacna, Perú

**Macarena Caqui Gamboa**

mccaquig@unjbg.edu.pe

ORCID: 0000-0001-7700-6409

UNIVERSIDAD NACIONAL JORGE BASADRE GROHMANN, Tacna, Perú

**Aceptación:** 7 de Noviembre del 2024

**Publicación:** 25 de Noviembre del 2024

### RESUMEN

El estudio comparó la eficiencia del carrizo (*Phragmites australis*) y el lirio acuático (*Eichhornia crassipes*) en la fitorremediación de aguas grises domésticas. El objetivo fue evaluar su capacidad para remover parámetros fisicoquímicos como el pH, conductividad eléctrica (CE) y sólidos suspendidos totales (SST). Asimismo, se aplicó un estudio de esquema experimental junto a dos tratamientos y tres iteraciones en humedales artificiales, midiendo las variables antes y después de 15 días. Los resultados indicaron que el carrizo fue más eficiente en la remoción de SST (38%) en comparación con el lirio acuático (24%), mientras que este último mostró mayor eficiencia en la reducción de CE (17% frente a 11% del carrizo). Ambas plantas disminuyeron ligeramente el pH del agua, pero sin diferencias significativas entre ellas. En conclusión, el carrizo es más eficaz para eliminar sólidos suspendidos, mientras que el segundo es más apropiado para reducir la CE. Del mismo modo, estos hallazgos sugieren que la elección de la planta para la fitorremediación debe depender del contaminante que se quiera reducir.

**Palabras clave:** Fitorremediación, aguas grises, sólidos suspendidos totales, conductividad eléctrica.

### ABSTRACT

The study compared the efficiency of reed (*Phragmites australis*) and water hyacinth (*Eichhornia crassipes*) within the phytoremediation regarding Greywater. The aim was to evaluate their ability to eliminate physicochemical parameters such as pH, electrical conductivity (EC), and total suspended solids (TSS). Likewise, a study based on an experimental design was conducted with two treatments and three iterations in artificial wetlands, measuring the variables before and after 15 days. Results indicated that reed was more efficient in TSS removal (38%) compared to water hyacinth (24%), while the latter showed higher efficiency in reducing EC (17% versus 11% for reed). Both plants slightly decreased water pH, with no significant differences between them. In conclusion, reed is more effective for removing suspended solids, while water hyacinth is better suited for reducing EC. These findings suggest that plant selection for phytoremediation should depend on the contaminant to be reduced.

**Keywords:** Phytoremediation, gray water, total suspended solids, electrical conductivity.

ANÁLISIS COMPARATIVO DEL APROVECHAMIENTO DEL CARRIZO Y LIRIO ACUÁTICO EN LA FITORREMEDIACIÓN SOBRE AGUAS GRISES

Macarena Caqui Gamboa

ORCID: 0000-0001-7700-6409

Nicolle Marce Gamboa

ORCID: 0009-0004-6695-404X

<https://revista.scienceevolution.com/>





## INTRODUCCIÓN

En todo el mundo, crece la demanda de tecnologías económicas, efectivas y de bajo costo para el saneamiento de aguas residuales domésticas (Rahman et al., 2020). En contraste, el saneamiento de aguas contaminadas y grises es costoso y complejo. Debido a esto, muchos países optan por verterlas directamente en ríos o cerca de cuerpos de agua. Asimismo, esta práctica ocasiona daños al suelo y al agua, además de generar malos olores y contaminación visual (Matovelle et al., 2024). En contraste, una alternativa viable es la fitorremediación, la cual es sostenible, eficiente y económica. A través de este proceso, se aprovecha la capacidad de las plantas macrófitas para tratar y eliminar una gran cantidad de contaminantes del agua (Ortiz & Valeriano, 2023). Del mismo modo, estos mecanismos presentan ventajas, desventajas y consecuencias económicas que deben evaluarse; sin embargo, la alternativa ideal será aquella que sea menos costosa, fácil de implementar y respetuosa con el medio ambiente.

La biorremediación, la cual utiliza organismos vivos, principalmente microorganismos y plantas para recuperar áreas contaminadas con metales pesados, ha demostrado ser eficiente, con costos accesibles y favorable para el entorno natural (Karam et al., 2023). Por ello, aumentó la frecuencia del uso de humedales de diseño artificial en modalidad de alternativa hacia el saneamiento de residuos de aguas, debido a que estos replican los sistemas naturales de purificación de agua.

Los humedales de diseño artificial combinan procesos físicos, químicos y biológicos, los cuales incluyen la presencia de plantas, microorganismos y la atmósfera (López et al., 2023). Su implementación mejora tanto el medio ambiente como la calidad del agua (Mohamed et al., 2022). Por lo tanto, los humedales proporcionan una solución ecológica y sostenible para el tratamiento de aguas residuales. Ayudan a eliminar eficazmente los contaminantes, crean hábitats y mejoran el entorno (Kulshreshtha et al., 2022).

Asimismo, la flora cumple un rol esencial en los humedales de diseño artificial, siendo su función principal absorber nutrientes y oxigenar el agua. Se utiliza la *Eichhornia crassipes*, una planta acuática de gran tamaño que figura entre las 100 especies más invasoras a nivel global, debido a su notable adaptabilidad y rápido crecimiento en diversos ecosistemas. En consecuencia, esta planta provoca interrupciones en ciertas actividades productivas, y la expansión veloz de esta especie afecta el flujo de agua, impide la penetración de la luz solar hacia la vegetación acuática originaria y perturba tanto el esquema alimenticio como el flujo de nutrientes (Gonzales, 2023). No obstante, esta planta invasora se ve como un bien valioso para la fitorremediación de metales tóxicos, ya que su gran biomasa le permite eliminar grandes cantidades de contaminantes. Asimismo, *Phragmites australis* tiene una capacidad para eliminar contaminantes, la cual depende del tiempo de retención del agua y de otros factores que pueden influir en la efectividad de la planta, mostrando gran desempeño en la eliminación de los contaminantes (Muñiz, 2024).

Esta investigación propone la aplicación de técnicas de fitorremediación de agua mediante el uso de plantas macrófitas tales como el lirio acuático (*Eichhornia crassipes*) y el carrizo (*Phragmites australis*), las cuales remueven los contaminantes en las aguas contaminadas a través de la absorción y bioacumulación en las raíces y plantas con fines no comestibles. En este sentido, la investigación tuvo como objetivo demostrar la eficiencia en la remoción de parámetros fisicoquímicos, evaluando la factibilidad técnica en el empleo de este sistema para reducir la contaminación de las aguas grises domésticas. En este contexto, la investigación se presenta como una alternativa prometedora y sostenible para la eliminación de contaminantes en las aguas grises del hogar.

## MÉTODO

El esquema es cuantitativo, y se basa en la aplicación de técnicas de recopilación directa de datos previo al análisis y la implementación de la investigación. Además, se emplea un diseño completamente aleatorio (DCA), que consiste en dos tratamientos con tres repeticiones. Asimismo, durante el periodo de 15 días, se realizaron mediciones de las variables de respuesta: pH, SST y CE, en los accesos y egresos de los humedales de diseño artificial. Según los muestreos, se obtendrá 1 muestra compuesta de entrada y 6 muestras de salida para medir las variables mencionadas. Luego de implementar el diseño experimental, se registran los resultados finales que reflejan cómo la aplicación del lirio acuático y el carrizo impacta en la mitigación de contaminantes en el agua para cada tratamiento y repetición. Posteriormente, cada unidad de



muestra es enviada al laboratorio para el análisis de los parámetros. Se lleva a cabo una comparación entre los datos iniciales y los datos finales de las muestras. Para el análisis de datos, se utilizó el software STATGRAPHICS, y se realizó un análisis de varianza (ANOVA) con un nivel de confianza de 95%. Para poder medir las variables de respuestas se utilizaron el multiparámetro y el phmetro. Finalmente, con los resultados obtenidos se realizó un cálculo de eficiencia de remoción en los parámetros.

## RESULTADOS

### Análisis de los parámetros fisicoquímicos de las aguas grises domésticas

Se evaluaron los parámetros fisicoquímicos del agua gris, como el pH, la CE y los SST. Además, estos tres parámetros fueron monitoreados al momento de tomar la muestra testigo del agua gris. Se consideraron 30 litros de aguas grises producidas en el lavado de ropa en la ciudad de Tacna.

Tabla 1

Parámetros fisicoquímicos iniciales

Antes del tratamiento	pH	Conductividad (us/cm)	Sólidos Suspendedos Totales (SST)
	7.612	3.45	1773 mg/l

La Tabla 1 muestra los parámetros fisicoquímicos iniciales de las aguas grises antes del tratamiento, donde se evaluaron el pH, la CE y los SST. En primer lugar, el valor de pH obtenido es 7.612, lo que indica una naturaleza ligeramente alcalina. Este resultado sugiere que el agua gris no presenta un carácter extremadamente corrosivo ni ácido, lo cual es beneficioso para los procesos de tratamiento como la fitodepuración, que suelen ser más efectivos en condiciones neutras o ligeramente alcalinas.

Por otro lado, la conductividad eléctrica registrada es 3.45 us/cm, lo que indica una baja presencia de iones y sales disueltas en el agua gris. Este valor relativamente bajo sugiere una menor cantidad de contaminantes inorgánicos, lo cual favorece tratamientos tanto biológicos como físicos, ya que la concentración de sólidos disueltos no es lo suficientemente elevada como para interferir en estos procesos.

Sin embargo, la concentración de sólidos disueltos suspendidos totales (SST) es 1773 mg/l, lo que representa un valor elevado. Este dato es relevante, ya que una alta cantidad de sólidos suspendidos puede generar problemas en los sistemas de tratamiento, como la obstrucción de filtros o la disminución de la eficiencia en la remoción de contaminantes. Por lo tanto, la reducción de SST debe ser uno de los principales objetivos en el proceso de depuración de estas aguas grises, ya que afecta directamente la calidad del agua y la eficiencia de los sistemas de tratamiento posteriores.

Gráfico 1

Toma de muestra testigo de agua gris





## Determinación del efecto del lirio acuático y el carrizo sobre los parámetros fisicoquímicos de las aguas grises

Para la determinación del efecto del lirio acuático y el carrizo sobre los parámetros fisicoquímicos del agua gris, se aplicó las plantas en el humedal artificial y se dividió de acuerdo a los tratamientos y repeticiones.

**Tabla 1**  
Parámetros fisicoquímicos iniciales

Tratamientos	Repeticiones	SST	CE	pH
Lirio acuático	R1	1354.372	3.07	6.1201
	R2	1355.077	3.1	6.1200
	R2	1354.7245	3.05	6.1201
Carrizo	R1	1098.29	2.84	6.1471
	R2	1097.98	2.84	6.1502
	R3	1098.14	2.87	6.1498

En cuanto a los sólidos totales disueltos, el tratamiento con lirio acuático mostró una leve reducción, con valores que oscilaron en torno a 1354 mg/l, en comparación al valor inicial de 1773 mg/l. Aunque se observa una disminución, esta no es significativa, lo que sugiere que el lirio acuático tiene una efectividad moderada en la remoción de partículas suspendidas. En contraste, el carrizo demostró una mayor capacidad de remoción, alcanzando valores alrededor de 1098 mg/l. Esto representa una reducción más evidente, donde nos sugiere que el carrizo es más eficiente en la remoción de SST en comparación al lirio acuático.

Respecto a la conductividad eléctrica, el lirio acuático mostró una leve disminución, con valores que variaron entre 3.05 y 3.1 us/cm, frente al valor inicial de 3.45 us/cm. Esta ligera reducción sugiere una baja capacidad para la eliminación de sales disueltas y otros iones presentes en el agua gris. Por otro lado, el tratamiento con Carrizo resultó en una disminución más significativa de la conductividad, con valores entre 2.84 y 2.87 us/cm. Por lo tanto, este resultado indica que el Carrizo tiene una mayor capacidad para reducir la concentración de iones en el agua, siendo más eficaz que el lirio acuático en este aspecto.

En lo que respecta al pH, ambos tratamientos mostraron una ligera reducción. El lirio acuático mantuvo los valores de pH en torno a 6.12, lo que indica una leve disminución respecto al valor inicial de 7.612, sugiriendo que el agua tratada con lirio acuático tiende a ser ligeramente menos alcalina. De manera similar, el Carrizo registró valores de pH entre 6.14 y 6.15, también mostrando una ligera disminución en la alcalinidad. No obstante, la diferencia en la reducción de pH entre ambas especies es mínima, por lo que su impacto en este parámetro es comparable.

### Prueba estadística de los parámetros fisicoquímicos

En la Tabla 3 se puede evidenciar que el lirio acuático tuvo un mayor rango promedio de SST, por lo que el carrizo fue la plántula que removió más el SST. Asimismo, el lirio acuático tuvo un mayor rango promedio de CE, aunque el carrizo fue el que tuvo mejor desempeño en la remoción de SST. Además, el Carrizo tuvo un mayor rango promedio de SST, esto significa que el lirio acuático fue la plántula que logró reducir más los niveles de pH del agua residual.

**Tabla 3**  
Rangos

	Plántula	N	Rango promedio	Suma de rangos
SST	Lirio acuático	3	5.00	15.00
	Carrizo	3	2.00	6.00
	Total	6		
CE	Lirio acuático	3	5.00	15.00
	Carrizo	3	2.00	6.00
	Total	6		
PH	Lirio acuático	3	2.00	6.00
	Carrizo	3	5.00	15.00
	Total	6		



**Tabla 4**

Estadísticos de prueba<sup>a</sup>

	SST	CE	PH
U de Mann-Whitney	.000	.000	.000
W de Wilcoxon	6.000	6.000	6.000
Z	-1.964	-1.993	-1.993
Sig. asintótica (bilateral)	.049	.046	.046
Significación exacta [2*(sig. unilateral)]	.100 <sup>b</sup>	.100 <sup>b</sup>	.100 <sup>b</sup>

- a. Variable de agrupación: PLÁNTULA
- b. No corregido para empates

En la tabla 4 se demuestra que existen diferencias significativas entre los niveles de SST, CE y pH obtenidos tras tratar el agua residual con las dos plántulas, pudiendo afirmarlo con un 95 % de confianza.

**Eficiencia de remoción de contaminantes**

Los resultados indican que el Lirio acuático tuvo una mitigación de SST del 24% y para la CE del 17%; mientras que para el carrizo se obtuvo una remoción del 38% y 11%, respectivamente. Esto muestra que el lirio acuático obtuvo mejores resultados en la remoción de SST; mientras que el carrizo fue más efectivo en la remoción de CE, tal como se presenta en la tabla 6.

**Tabla 6**

Porcentaje de remoción de contaminantes

Eficiencia de remoción (%)		
Tratamiento	SST	CE
Lirio acuático	24	17
Carrizo	38	11

**RESULTADOS**

Los resultados de SST obtenidos en el tratamiento realizado con el carrizo fue de 38% de eficiencia de remoción. Pascual et al. (2024), menciona que obtuvo un 100% de eficiencia de remoción, mientras que Bianchi et al. (2020) tuvo 65% de remoción. En el caso de la *Phragmites australis* es capaz de generar condiciones óptimas para la eliminación de contaminantes (García-Valero et al., 2020). Asimismo, posee un sistema radicular bastante denso, con rizomas entrelazados que forman una red en la base que puede alcanzar hasta 0,5 m de profundidad, donde habitan microorganismos. En esa zona, el oxígeno se libera desde las partes superiores de las raíces y rizomas, generando un microhábitat aeróbico en la rizosfera (Yadav et al., 2018).

Según Poma y Pucllas (2022), al aplicar su humedal de diseño artificial a las muestras de aguas grises, el pH promedio de las tres muestras fue de 6.31, cumpliendo con los requisitos de los Estándares de Calidad Ambiental (ECA) para agua según el D.S.004-2017-MINAM. En comparación, los resultados obtenidos al aplicar lirio acuático dieron un pH de 6.1201, lo que tampoco cumple con los ECA. Sin embargo, esta planta tiene un impacto positivo como estabilizador del pH.

Por otro lado, *E. crassipes*, conocido como lirio acuático, es una de las macrófitas más relevantes, ampliamente estudiada por su capacidad para remover diversos contaminantes en diferentes condiciones físicas y climáticas (Vásquez et al., 2023). Asimismo, esta especie acuática flotante es reconocida por su alta tasa de crecimiento y su capacidad para tolerar ambientes contaminados (Singh & Balomajumder 2021). Su estructura de raíces flotantes es ideal para la absorción de sólidos suspendidos y metales pesados. Además, su capacidad para formar grandes colonias aumenta su potencial invasivo y mejora gradualmente su capacidad de captura de contaminantes (Nazir et al., 2020).



Estudios han demostrado que esta especie es capaz de absorber concentraciones significativas de arsénico en un periodo relativamente corto (Cruz et al., 2021). Sin embargo, su principal limitación radica en su naturaleza invasiva, lo que exige un control riguroso de su propagación para evitar impactos negativos en los ecosistemas donde se aplique (Nazir et al, 2020).

## CONCLUSIONES

Este estudio ha evaluado la eficiencia en la remoción de contaminantes mediante dos tratamientos. Por un lado, el uso del carrizo demostró una remoción del 38% de SST en las aguas grises domésticas, lo que representa una reducción significativa de este parámetro. Por otro lado, el lirio acuático alcanzó 24% de eficiencia. La remoción de SST es mayor con el uso del carrizo en comparación con otros tratamientos aplicados en esta investigación. Sin embargo, de todos modos el lirio acuático comprobó que presenta una capacidad fitorremediadora para la mitigación de SST presente en aguas grises de hogares. Asimismo, el lirio acuático presentó 17% de eficiencia para CE, mientras que el carrizo 11%. La remoción de CE es mayor con el uso del lirio acuático. La comparación entre ambas plantas demuestra que, aunque ambas resultan efectivas, estos hallazgos destacan la importancia de elegir tecnologías adecuadas para el tratamiento de aguas grises. Finalmente, se sugiere llevar a cabo estudios adicionales para analizar los factores que influyen en la eficiencia operativa a largo plazo y para evaluar posibles mejoras tecnológicas en ambas plantas.

## REFERENCIAS

- Bianchi, E., Biancalani, A., Berardi, C., Antal, A., Fibbi, D., Coppi, A., Lastrucci, L., Bussotti, N., Colzi, I., Renai, L., Scordo, C., Del Bubba, M., & Gonnelli, C. (2020). Improving the efficiency of wastewater treatment plants: Bio-removal of heavy-metals and pharmaceuticals by *Azolla filiculoides* and *Lemna minuta*. *The Science of the Total Environment*, 746, 141219. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.141219>
- García-Valero, A., Martínez-Martínez, S., Faz, Á., Terrero, M. A., Muñoz, M. Á., Gómez-López, M. D., & Acosta, J. A. (2020). Treatment of wastewater from the tannery industry in a constructed wetland planted with *Phragmites australis*. *Agronomy*, 10(2). <https://doi.org/10.3390/agronomy10020176>
- Gonzales León, S. C. (2023). *Evaluación de la capacidad de fitorremediación de *Eichhornia crassipes* (jacinto de agua) en efluentes con cromo de una industria curtidora del parque industrial Río Seco, Arequipa* [Tesis de licenciatura, Universidad Católica Santa María]. <https://hdl.handle.net/20.500.12920/13305>
- Karam, F., Haddad, R., Amacha, N., Charanek, W., & Harmand, J. (2023). Assessment of the Impacts of PhytoRemediation on Water Quality of the Litani River by Means of Two Wetland Plants (*Sparganium erectum* and *Phragmites australis*). *Water*, 15(1). <https://doi.org/10.3390/w15010004>
- Kulshreshtha, N. M., Verma, V., Soti, A., Brighu, U., & Gupta, A. B. (2022). Exploring the contribution of plant species in the performance of constructed wetlands for domestic wastewater treatment. *Bioresource Technology Reports*, 18, 101038. <https://doi.org/10.1016/j.biteb.2022.101038>
- López Ocaña, G., Estrada Pérez, N., Aguilar Pérez, G., Alonso Mendoza, E. C., & Torres Balcázar, C. A. (2023). Degradación de contaminantes en humedales artificiales en serie con especies macrófitas del trópico húmedo. *CIBA Revista Iberoamericana de Las Ciencias Biológicas y Agropecuarias*, 12(24), 19 - 48. <https://doi.org/10.23913/ciba.v12i24.122>
- Matovelle, C., Quinteros, M., & Ochoa-García, S. A. (2024). Performance of *Equisetum* spp and *Zantedeschia aethiopica* on the evaluation of artificial wetlands as an alternative for wastewater treatment in rural areas of the Ecuadorian Andes. *Current Research in Environmental Sustainability*, 7. <https://doi.org/10.1016/j.crsust.2024.100243>
- Ministerio del Ambiente del Perú. (2017). Decreto Supremo N° 004-2017-MINAM: Aprueban estándares de calidad ambiental (ECA) para agua y establecen disposiciones complementarias. Ministerio del Ambiente. <https://www.minam.gob.pe/disposiciones/decreto-supremo-n-004-2017-minam/>



Nazir, M., Idrees, I., Idrees, P., Ahmad, S., Ali, Q., & Malik, A. (2020). POTENTIAL OF WATER HYACINTH (*EICHHORNIA CRASSIPES* L.) FOR PHYTOREMEDIATION OF HEAVY METALS FROM WASTE WATER. *Biological and Clinical Sciences Research Journal*, 2020(1). <https://doi.org/10.54112/bcsrj.v2020i1.6>

Mohamed, A., Siggins, A., Healy, M., hUallacháin, D. Ó., Fenton, O., & Tuohy, P. (2022). A novel hybrid coagulation-constructed wetland system for the treatment of dairy wastewater. *The Science of the Total Environment*, 847, 157567. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.157567>

Ortiz Moreno, J. A., & Valeriano Quispe, R. (2023). *Aplicación del lirio acuático (Eichhornia crassipes) para la remoción de cromo hexavalente y zinc en aguas residuales galvánicas, Lima Este 2023* [Tesis de licenciatura, Universidad Nacional del Callao]. <https://hdl.handle.net/20.500.12952/8318>

Pascual, A., Álvarez, J. A., de la Varga, D., Arias, C. A., Van Oirschot, D., Kilian, R., & Soto, M. (2024). Horizontal flow aerated constructed wetlands for municipal wastewater treatment: The influence of bed depth. *Science of the Total Environment*, 908. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.168257>

Poma Chanca, G., & Pucllas Quispe, J. (2022). *Tratamiento de aguas grises con el sistema de humedales artificiales, para riego ornamental, Concepción* [Tesis de licenciatura, Universidad Peruana de los Andes]. <https://hdl.handle.net/20.500.12848/4945>

Rahman, M. E., Bin Halmi, M. I. E., Bin Abd Samad, M. Y., Uddin, M. K., Mahmud, K., Abd Shukor, M. Y., Sheikh Abdullah, S. R., & Shamsuzzaman, S. M. (2020). Design, Operation and Optimization of Constructed Wetland for Removal of Pollutant. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 17(22), 8339. <https://doi.org/10.3390/ijerph17228339>

Singh, N., & Balomajumder, C. (2021). Phytoremediation potential of water hyacinth (*Eichhornia crassipes*) for phenol and cyanide elimination from synthetic/simulated wastewater. *Applied Water Science*, 11(8). <https://doi.org/10.1007/s13201-021-01472-8>

Vásquez, L. a. H., García, F. P., Lassman, A. A., Gómez, C. R., Torres, E. A., Salinas, G. H., De Jesús Ramírez Rivera, E., Sandoval, O. a. A., & Rosas, S. R. (2023). Treatment of laundry wastewater by constructed wetlands with *Eichhornia crassipes*. *Desalination and Water Treatment*, 312, 50–54. <https://doi.org/10.5004/dwt.2023.30009>

Yadav, A., Chazarenc, F., & Mutnuri, S. (2018). Development of the “French system” vertical flow constructed wetland to treat raw domestic wastewater in India. *Ecological Engineering*, 113, 88–93. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2018.01.001>