

UNIVERSIDAD INTERAMERICANA DE PUERTO RICO
RECINTO DE SAN GERMÁN
DEPARTAMENTO DE CIENCIA Y TECNOLOGÍA
PROGRAMA DE MAESTRÍA EN CIENCIAS AMBIENTALES

**Evaluación del crecimiento de la planta *Eichhornia crassipes* (Jacinto de agua) en
lixiviados procedentes de un Relleno Sanitario Municipal en Puerto Rico y su
relación con el cambio en concentración de nutrientes.**

Awilda E. Sánchez Santiago

2026

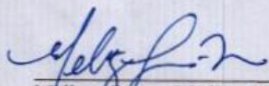
Página de aprobación

Evaluación del crecimiento de la planta *Eichhornia crassipes* (Jacinto de agua) en
lixiviados procedentes de un Relleno Sanitario Municipal en Puerto Rico y su relación
con el cambio en concentración de nutrientes.

Por

Awilda E. Sánchez Santiago

Nosotros, los miembros del Comité del Programa de Maestría en Ciencias Ambientales de
la estudiante Awilda E. Sánchez Santiago, certificamos que la investigación sometida por
esta cumple con los requisitos para las tesis de maestría establecidos por el Programa de
Maestría en Ciencias Ambientales del Recinto de San Germán, de la Universidad
Interamericana de Puerto Rico, y para que así conste firmamos certificando la aprobación
de la misma.



Melitza Crespo Medina, Ph. D.
Presidente, Comité Graduado

20 mayo 2026

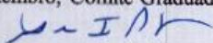
Fecha



Angela González Mederos, Ph. D.
Miembro, Comité Graduado

20 mayo 2026

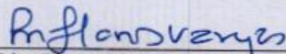
Fecha



Graciela Ramírez Toro, Ph. D.
Miembro, Comité Graduado

20 mayo 2026

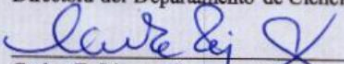
Fecha



Lina Llanos Vargas, Ed. D
Directora del Departamento de Ciencias y Tecnología

mayo 20/2026

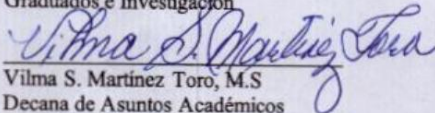
Fecha



Carlos E. Irizarry-Guzman, D.B.A.
Director de Escuela de Estudios
Graduados e Investigación

20 de mayo de 2026

Fecha



Vilma S. Martínez Toro, M.S
Decana de Asuntos Académicos

21/mayo/2026

Fecha

Certificación de autoría

Yo, Awilda E. Sánchez Santiago, certifico que la tesis de maestría titulada Evaluación del crecimiento de la planta *Eichhornia crassipes* (Jacinto de agua) en lixiviados procedentes de un Relleno Sanitario Municipal en Puerto Rico y su relación con el cambio en concentración de nutrientes, la cual presento como requisito para optar por el Grado de Maestría en Ciencias Ambientales en el Programa de Maestría del Recinto de San Germán de la Universidad Interamericana de Puerto Rico, es el producto de mi labor investigativa. Asimismo, doy fe que este trabajo es uno original e inédito.



Firma legible del estudiante

Abstracto

La generación de lixiviados en vertederos constituye un problema ambiental severo, debido a su impacto negativo sobre el suelo y su potencial para contaminar cuerpos de agua superficiales y subterráneos. Entre las alternativas disponibles para remover contaminantes, la fitorremediación destaca como un método ecológico y de bajo costo al emplear la capacidad natural de la planta que tiene para absorber, acumular y estabilizar sustancias tóxicas presentes en el suelo o agua. Este estudio evaluó el crecimiento del Jacinto de agua, *Eichhornia crassipes*, expuesto a diferentes concentraciones de lixiviados provenientes de un Relleno Sanitario ubicado en la región oeste de Puerto Rico. Además, se midieron cambios en las concentraciones de fosfato (PO_4^{-3}), nitrito (NO_2^-) y nitrato (NO_3^-) durante la exposición del Jacinto de agua a las diferentes concentraciones del lixiviado. Se desarrolló una fase experimental utilizando tratamientos con concentraciones de 0%, 50% y 100% de lixiviado durante un periodo de 30 días. Se analizaron parámetros del crecimiento de la planta, incluyendo crecimiento absoluto, crecimiento de la raíz, conteo de hojas y producción de brotes, así como variables fisicoquímicas del agua como pH, turbidez, nitritos (NO_2^-), nitratos (NO_3^-) y fosfatos (PO_4^{-3}). Los resultados mostraron que el tratamiento de 0% presentó el mayor crecimiento de la planta y de la raíz, con un crecimiento absoluto de muy bajo a crecimiento moderado de: 0.03 a 0.63 cm/días, mientras que las concentraciones de 50% y 100% de lixiviado generaron valores negativos de crecimiento de: -0.43 a -0.66 cm/días y de -0.10 a -0.63 cm/días, evidenciando posible estrés fisiológico y pérdida de biomasa. No obstante, el conteo de hojas y la producción de brotes aumentaron en tratamientos de 50% y 100% con lixiviados de 1 a 4 brotes, indicando capacidad de reproducción

vegetativa en dichos tratamientos. El pH permaneció entre 7.20 y 7.88, mientras que la turbidez aumentó en los tratamientos con concentraciones más altas de lixiviados, junto a una disminución en las concentraciones de nitritos y fosfatos, alcanzando reducciones cercanas al 100% en tratamientos con 50% de lixiviados. Resultados muestran que el Jacinto de agua sobrevivió, y se reprodujo cuando se expuso a lixiviados del Relleno Sanitario en estudio y mostró potencial de reproducción en las concentraciones de lixiviado bajo estudio.

Palabras claves: fitorremediación, lixiviados, Jacinto de agua.

Abstract

The generation of leachates in landfills constitutes a severe environmental problem due to its negative impact on soil and its potential to contaminate surface and groundwater bodies. Among the available alternatives for contaminant removal, phytoremediation stands out as an ecological and low-cost method because it utilizes the natural ability of plants to absorb, accumulate, and stabilize toxic substances present in soil or water. This study evaluated the growth of Water Hyacinth, *Eichhornia crassipes*, exposed to different concentrations of leachate obtained from a landfill located in the western region of Puerto Rico. In addition, changes in phosphate (PO_4^{3-}), nitrite (NO_2^-), and nitrate (NO_3^-) concentrations were measured during the exposure of water Hyacinth to the different leachate concentrations. An experimental phase was conducted exposing the plant to treatments with 0%, 50%, and 100% leachate concentrations, over a period of 30 days. Plant growth parameters were analyzed, including absolute growth, root growth, leaf count, and offspring production, as well as physicochemical water variables such as pH, turbidity, nitrites (NO_2^-), phosphates (PO_4^{3-}) and nitrates (NO_3^-). The results showed that the 0% treatment exhibited the greatest plant and root absolute growth ranging from very low to moderate growth rates of 0.03 to 0.63 cm/day, whereas the 50% and 100% leachate concentrations produced negative growth values ranging from -0.43 to -0.66 cm/day and from -0.10 to -0.63 cm/day, respectively, demonstrating possible physiological stress and biomass loss. Nevertheless, leaf count and offspring production increased when the plants were exposed to 50% and 100% leachate treatments, producing

with one (1) and four (4) offspring, indicating a capacity for vegetative reproduction under these treatments. The pH ranged between 7.20 and 7.88, while turbidity increased in the treatments at higher concentrations of leachates. Likewise, reduction in nitrite and phosphate concentrations were observed, reaching reductions close to 100% in the 50% leachate treatments. Results show the capability of the Water Hyacinth to reproduce and survive under the leachate concentrations of the landfill studied.

Keywords: Phytoremediation, landfill leachates, Water hyacinth.

Tabla de contenido

Página de aprobación	Error! Bookmark not defined.
Abstracto	iv
Abstract	vi
Índice de figuras	x
Índice de tablas	xi
Capítulo I Introducción	1
1.1 Introducción	1
1.2 Justificación del estudio	4
Capítulo II Revisión de Literatura	6
2.1 Características generales de los lixiviados y su definición	6
2.2 Métodos de tratamiento de lixiviados	8
2.3 Fitorremediación	10
2.4 <i>Eichhornia crassipes</i> (Jacinto de agua)	12
2.5 Sistemas de Relleno Sanitario en Puerto Rico	14
Capítulo III Metodología	18
3.1 Preparación de la planta <i>Eichhornia crassipes</i> (Jacinto de agua)	18
3.2 Colección de muestra de lixiviados	19
3.5 Características morfológicas de la planta	19
3.3 Análisis de parámetros fisicoquímicos	20
3.4 Fase preliminar	22
3.5 Fase experimental	23
3.6 Análisis de los datos:	24

Resultados	25
3.10 Fase preliminar.....	25
Características morfológicas de la planta	26
pH en los tratamientos	28
Resultados de turbidez (NTU).	29
3.11. Resultados Fase Experimental	30
Características morfológicas de las plantas	30
Longitud de la raíz	32
Cantidad de hojas por planta.....	34
pH.....	35
Turbidez (NTU)	36
Concentración de nutrientes.....	37
Análisis de resultados	44
Conclusión	51
Referencias.....	52

Índice de figuras

Figura 1. Jacinto de agua	13
Figura 2. Promedio de la concentración de NO_2^- en el líquido de cada uno de los tratamientos 0%, 50 y 100% de lixiviados al inicio del experimento (día 1), y al cabo de 30 días (día 30).....	39
Figura 3. Promedio de la concentración de PO_4^{3-} en el líquido de cada uno de los tratamientos 0%, 50 y 100% de lixiviados al inicio del experimento (día 1), y al cabo de 30 días (día 30).....	41
Figura 4. Promedio de la concentración de NO_3^- en el líquido de cada uno de los tratamientos 0%, 50 y 100% de lixiviados al inicio del experimento (día 1), y al cabo de 30 días (día 30).....	43

Índice de tablas

Tabla 1. <i>Rotulación de peceras según el tratamiento.</i>	23
Tabla 2. <i>Morfología de las plantas expuestas a diferentes concentraciones de lixiviado</i>	26
Tabla 3. <i>Crecimiento absoluto de la planta y la raíz del Jacinto de agua por tratamiento, en ambas peceras.</i>	27
Tabla 4. <i>Resultados de pH en el líquido, de las peceras grandes y pequeñas que contenían plantas de Jacinto de agua, el día 1 y día 14 de exposición. Dos peceras por tratamiento.</i>	28
Tabla 5. <i>Resultados de turbidez del líquido en las peceras grandes y pequeñas, que contenían la planta Jacinto de agua, el día 1 y día 14 de exposición. Dos peceras por tratamiento.</i>	29
Tabla 6. <i>Longitud de cada planta expuestas a diferentes concentraciones de lixiviado. Se utilizaron dos plantas (P1 y P2) en cada pecera, y dos peceras con cada tratamiento (0%, 50% y 100%)</i>	31
Tabla 7. <i>Crecimiento absoluto de las plantas (P1 y P2) expuestas a diferentes concentraciones de lixiviado. Se utilizaron dos plantas (P1 y P2) en cada pecera, y dos peceras con cada tratamiento (0%, 50% y 100%)</i>	32
Tabla 8. <i>Longitud de las raíces de las plantas expuestas a diferentes concentraciones de lixiviado, al inicio y a los 30 días de exposición. Se utilizaron dos plantas (P1 y P2) en cada pecera, y dos peceras con cada tratamiento (0%, 50% y 100%)</i>	33
Tabla 9. <i>Crecimiento absoluto de la raíz en planta 1 y planta 2. (P1 y P2) expuestas a diferentes concentraciones de lixiviado, al inicio y a los 30 días de exposición. Se</i>	

<i>utilizaron dos plantas (P1 y P2) en cada pecera, y dos peceras con cada tratamiento (0%, 50% y 100%)</i>	33
Tabla 10. <i>Conteo de hojas de cada planta (P1 y P2) expuestas a diferentes concentraciones de lixiviado, al inicio y a los 30 días de exposición. Se utilizaron dos plantas (P1 y P2) en cada pecera, y dos peceras con cada tratamiento (0%, 50% y 100%)</i>	34
Tabla 11. <i>Conteo de brotes de las plantas expuestas a diferentes concentraciones de lixiviado, al cabo de 30 días de exposición. Se utilizaron dos peceras con cada tratamiento (0%, 50% y 100%).</i>	35
Tabla 12. <i>Niveles de pH en las diferentes concentraciones de lixiviado durante 30 días. Se utilizaron dos plantas en cada pecera, y dos peceras con cada tratamiento (0%, 50% y 100%)</i>	36
Tabla 13. <i>Medida de turbidez (NTU) en un periodo de 30 días. Se utilizaron dos plantas en cada pecera, y dos peceras con cada tratamiento (0%, 50% y 100%)</i>	37
Tabla 14. <i>Concentración de NO_2^- y el porcentaje (%) de cambio en el líquido de los diversos tratamientos de lixiviados. Rango del método (0.002-0.3 mg/L), el cero significa: “valor por debajo del límite de detección”</i>	38
Tabla 14a. <i>Promedio de la concentración NO_2^- en cada tratamiento de lixiviados.</i>	38
Tabla 15. <i>Concentración de PO_4^{3-} y porcentaje de cambio en el líquido de los diversos tratamientos de lixiviados. Rango del método (0.02-2.50 mg/L), el cero significa: “por debajo del límite de detección”</i>	40
Tabla 15a. <i>Promedio de la concentración de PO_4^{3-} por cada tratamiento con lixiviados</i>	40

Tabla 16. <i>Concentración de NO_3^- y porcentaje de cambio en el líquido de los diversos tratamientos de lixiviados. Rango del método (0.3-30.0 mg/L) el cero significa: “por debajo del límite de detección”.</i>	41
Tabla 16a. <i>Promedio de la concentración de NO_3^- en un mes en las peceras por cada tratamiento con lixiviados</i>	42

Capítulo I

Introducción

1.1 Introducción

Uno de los problemas ambientales que enfrenta la sociedad a nivel global es el manejo de sus desperdicios sólidos (Sáez, 2014). De estos desperdicios, los domésticos son recolectados y acumulados en los rellenos sanitarios diseñados para que se degraden naturalmente (*United States Environmental Protection Agency*, 2020); como resultado de los procesos de degradación se producen sustancias de diferente composición colectadas en una mezcla que se genera formando subproductos en forma de líquido conocidos como lixiviados (Agencia de Protección Ambiental [EPA], 2021; Departamento de Recursos Naturales y Ambientales [DRNA], 2020). Los lixiviados se forman por los procesos de fermentación y descomposición de materia orgánica acumulada en los desperdicios depositados en los rellenos sanitarios, por lo que suelen tener una gran variedad de compuestos químicos, tanto orgánicos como inorgánicos (Telwesa, 2022). Los lixiviados suelen presentar una apariencia de color oscuro y un olor fuerte, y al percolarse a través de las capas del relleno sanitario pueden arrastrar sustancias químicas y biológicas que pueden ser nocivas y tóxicas para el ambiente y la salud humana. Entre los componentes que pueden contener los lixiviados se encuentran metales pesados, nutrientes como nitratos, fosfatos, compuestos de nitrógeno amoniacal, y en algunas ocasiones, se pueden encontrar orgánicos, algunos de ellos sumamente tóxicos. Adicionalmente, pueden arrastrar sólidos, pequeños o grandes, como las telas, plásticos, rocas, arena, entre otros (Zhao, 2018; Roper, 2020 Torres et al., 2014).

La generación de los lixiviados depende de múltiples factores, como el grado de compactación de los desechos, la humedad de los desechos sólidos, el material de cobertura del vertedero o relleno sanitario, la precipitación, la temperatura, la evaporación y el tamaño del vertedero o relleno sanitario, así como de la capacidad de almacenamiento de los residuos sólidos, generalmente expresada en metros cúbicos o toneladas (Cárdenas et al., 2020). Las diferencias en la calidad de los lixiviados de los vertederos y rellenos sanitarios de desperdicios sólidos se pueden atribuir a las características de los desperdicios depositados, las condiciones geológicas y el clima distintivo de la región de donde se encuentran estos depósitos, que a su vez, pueden experimentar eventos climáticos catastróficos (Torres-Lozada et al., 2014; Teng et al., 2021).

En 1990, la generación de residuos sólidos per cápita en Puerto Rico era un 7% menor que en los Estados Unidos, sin embargo, para el periodo 2020–2021, esta superaba la de los Estados Unidos en aproximadamente un 13% (Agencia de Protección Ambiental [EPA], 2021). Este aumento se atribuye, en gran medida, a los escombros generados en el año 2017 como consecuencia de los huracanes Irma y María, los cuales produjeron aproximadamente 2.3 millones de toneladas métricas de residuos sólidos (United States Army Corps of Engineers, (2018)). A consecuencia de estos eventos catastróficos, hubo un aumento en la producción de lixiviados debido la alta precipitación, lo que provocó la infiltración de agua a través de los residuos sólidos y la sobrecarga de los vertederos reduciendo la eficiencia operativa y afectando los procesos de la compactación y manejo de los desperdicios sólidos (Robey et al., 2024). Los residentes en Puerto Rico generan

un promedio de 5.6 libras de residuos sólidos por persona al día, superior a la de los Estados Unidos que es de 4.91 libras por día (Amador, 2023).

En Puerto Rico el alto volumen de los residuos sólidos en combinación a la generación y manejo de los lixiviados constituyen un problema ambiental de importancia. En la isla, muchos de los vertederos no cumplen con los estándares requeridos para los rellenos sanitarios, los cuales no tienen sistema de revestimiento, de colección y tratamientos de lixiviados creando riesgos de contaminación ambiental (United States Environmental Protection Agency, 2018). Estos líquidos (lixiviados) pueden filtrarse y alcanzar el suelo, así como las aguas subterráneas y superficiales, transportando compuestos químicos a estos cuerpos de agua, arriesgando así la salud de los ecosistemas y la salud humana. Existen muchas técnicas propuestas para reducir la contaminación que pueden arrastrar los lixiviados, pero muchos son costosos, y requieren tecnologías complejas que combinan procesos fisicoquímicos, biológicos, de membrana, de oxidación y ósmosis inversa (Kjeldsen et al., 2002). Entre los tratamientos menos costosos se encuentra la fitoremediación, esto es el uso de plantas para remover contaminantes de un cuerpo de agua o área contaminada. Estudios previos han demostrado que la planta *Eichhornia crassipes* (Jacinto de agua) tiene la capacidad de remover contaminantes en lixiviados (Cabrera et al., 2019), por lo que en esta investigación se evaluó la sobrevivencia y crecimiento de la especie Jacinto de agua en diferentes concentraciones de lixiviados del Relleno Sanitario en Hormigueros, y los cambios en concentración nitrito (NO_2^-), fosfato (PO_4^{3-}) y nitrato (NO_3^-), como un paso preliminar antes de proponerla como agente fitoremediador de los lixiviados para este relleno sanitario. En este estudio, se determinó el crecimiento absoluto y se

documentaron cambios en número de brotes de la planta Jacinto de Agua, crecida en peceras y expuestas a diferentes concentraciones de los lixiviados (0%, 50% y 100%) del Relleno Sanitario de Hormigueros.

1.2 Justificación del estudio

El manejo adecuado de los lixiviados representa un reto ambiental en Puerto Rico, debido a la contaminación que estos pueden provocar. Esta investigación evaluó el crecimiento de la especie *Eichhornia crassipes* (Jacinto de agua) en diferentes concentraciones de lixiviados obtenidos de un vertedero del suroeste de Puerto Rico.

Diversos estudios han evidenciado que esta planta puede remover eficazmente compuestos nitrogenados como lo son: el amonio (NH_4^+), nitratos (NO_3^-) y nitrógeno total (N), así como fósforo total (P) y fosfatos (PO_4^{3-}), mediante absorción radicular y asimilación en su biomasa de la planta (Abbas et al., 2019; Singh & Balomajumder, 2021). En un estudio realizado en México, evaluaron la efectividad del Jacinto de agua y la Lechuga de agua para reducir la concentración de contaminantes, durante 21 días de lixiviados. Reportaron la reducción de la concentración de nitritos cuando las plantas fueron expuestas a una mezcla de 50% de lixiviados y usando ambas plantas en conjunto (Zúñiga et al., 2024).

En Puerto Rico, Cabrera et al. (2019) reportó la remoción de entre 55% y 99% de nitrato (NO_3^-) y fosfato (PO_4^{3-}) de los lixiviados de un Relleno Sanitario en Moca, en el noroeste de la isla (Cabrera et al., 2019). Dicho relleno sanitario, recibe desperdicios sólidos de varios pueblos cercanos como lo son: Moca, Aguada, San Sebastián, Maricao y Camuy, y está ubicado en la ecozona de las Laderas del Norte; una región húmeda caracterizada por ubicarse en la costa norte y zonas montañosas de la isla. Para dicho

estudio evaluaron un sistema dinámico que expone las plantas a un flujo continuo de lixiviados (Cabrera et al., 2019).

Sin embargo, el uso del Jacinto de agua, para reducir la concentración de compuestos químicos en los lixiviados del Relleno Sanitario de Hormigueros, no se ha evaluado previamente. Este relleno sanitario se encuentra en la ecozona de San Germán, en una zona intermedia en las Laderas del Sur de la isla y presenta condiciones climáticas distintas a las de la ecozona húmeda de Moca, incluyendo menores niveles de precipitación, mayores períodos de sequía y temperaturas más cálidas. Estas diferencias ambientales pueden influir en las características fisicoquímicas de los lixiviados y en la respuesta de las especies utilizadas en el tratamiento (United States Environmental Protection Agency, 2021). Por ello, resulta necesario evaluar el crecimiento del Jacinto de agua en lixiviados generados bajo las condiciones climáticas propias de esta ecozona y en el relleno sanitario de estudio. Por lo que, el objetivo principal de este estudio fue documentar el crecimiento de las plantas Jacinto de agua, en diferentes concentraciones de lixiviados del Relleno Sanitario en estudio, y evaluar los cambios en concentraciones de nitrito (NO_2^-), fosfato (PO_4^{3-}) y nitrato (NO_3^-) en dichas mezclas. Esta información permitirá continuar estudios que desarrollen estrategias efectivas para evaluar el Jacinto de agua para la remoción de compuestos químicos en los lixiviados de este relleno sanitario.

Capítulo II

Revisión de Literatura

2.1 Características generales de los lixiviados y su definición

El impacto ambiental de los rellenos sanitarios o vertederos está asociado con la emisión de Gases de Efecto Invernadero (GEI) (dióxido de carbono (CO_2), metano (CH_4) y los efluentes líquidos o lixiviados producidos como consecuencia de la percolación de las aguas de lluvias, a través de la masa de residuos (Torres et al., 2014).

Los lixiviados son líquidos que se generan al pasar agua a través de los desechos sólidos y materiales en descomposición en un relleno sanitario o vertedero (Morales et al., 2024). Los procesos químicos que están involucrados incluyen la descomposición de la materia orgánica y la liberación y transformación de los metales pesados de los desperdicios, las enfermedades por bacterias, virus y patógenos también pueden afectar al ser humano y a otros organismos (Perevochtchikova, 2013). Estas mezclas pueden arrastrar compuestos químicos y microorganismos que pueden afectar la calidad del agua, subterránea y superficial, el aire y alterar la composición del suelo, los ecosistemas y hábitat de la flora y la fauna, además de afectar la salud humana al exponerse a estos contaminantes a largo plazo (Navarrete et al., 2024). Debido al impacto ambiental, el tratamiento de los lixiviados es de mucha importancia para el manejo apropiado de los desperdicios sólidos. (Kjeldsen et al., 2002).

Los manejadores de los vertederos o los rellenos sanitarios deben monitorear las características fisicoquímicas de los lixiviados como son el pH, turbidez, compuestos orgánicos presentes, la salinidad, el color y la temperatura, previo a ser depositados en los medios correspondientes, como los receptores de agua o reciclados (United States

Environmental Protection Agency, 2021). Si los lixiviados tienen concentraciones y parámetros dentro de los estándares establecidos por la Agencia de Protección Ambiental, estos pueden ser descargados en los cuerpos de agua o reutilizados. En aquellos casos, donde no se cumplen con los parámetros, estos deben ser sometidos a tratamientos más avanzados y manejo especial (Kjeldsen et al., 2002), antes de la disposición final o de ser reusado (Kjeldsen et al., 2002), (United States Environmental Protection Agency, 2020).

La ubicación del vertedero o relleno sanitario también es importante, utilizándose las ecozonas para adaptar el diseño y manejo de los vertederos, y los rellenos sanitarios a las condiciones tropicales de cada región, lo que contribuye a mejorar la protección de las aguas subterráneas, implementar soluciones más sostenibles y económicas, y a reducir el riesgo de impactos o fallas ambientales (Abichou et al., 2023). Según United States Environmental Agency, (2021) las ecozonas se definen como un área o lugar con características homogéneas de clima, vegetación y suelo, lo que permite procesos como la infiltración de agua, generación de lixiviados y la estabilidad del vertedero. Las ecozonas en Puerto Rico se clasifican en zonas húmedas, intermedias y secas, y dependiendo de sus características es el diseño del vertedero o relleno sanitario encontrado.

Para la protección del suelo y el agua subterránea, muchos vertederos y rellenos cuentan con revestimientos sintéticos o *liners* en su estructura, con el propósito de evitar la percolación de estos líquidos hacia el suelo, los acuíferos, las escorrentías y los pozos, entre otras medidas dirigidas a la prevención de la contaminación (United States Environmental Protection Agency, 2026). La generación de los lixiviados en vertederos por rellenos sanitarios o vertederos se considera uno de los contaminantes más severo para el suelo, por lo que su apropiado manejo y tratamiento es imperativo.

2.2 Métodos de tratamiento de lixiviados.

En los vertederos o rellenos sanitarios se emplean diferentes métodos o combinaciones de técnicas para el tratamiento de lixiviados, adaptadas a la calidad de las mezclas, el volumen generado y la infraestructura que esté disponible. Algunos de estos son: lagunas de estabilización (anaerobias, facultativas, aerobias, de maduración), lodos activados, procesos de coagulación, floculación, procesos de membrana, procesos de oxidación avanzada, adsorción con carbón activado, desinfección con cloro u ozono, entre otros métodos (Pellón et al. 2015). A continuación, se describen brevemente estos tratamientos:

1. Colección y manejo inicial como los sistemas de drenaje y de colección, que son los tubos y pozos en donde atrapan el lixiviado en la base del vertedero y luego llegan a los tanques de almacenamiento. Tanques de almacenamiento o ecualización en donde se iguala la carga contaminante antes del tratamiento.
2. Las lagunas de estabilización son sistemas naturales que utilizan microorganismos para degradar contaminantes. Entre sus limitaciones está el que debe ser utilizada en superficies grandes, emiten olores no controlados y tienen baja eficiencia para compuestos recalcitrantes y sales.
3. Los lodos activados son un proceso biológico en donde los microorganismos degradan la materia orgánica en condiciones aeróbicas reduciendo la demanda de oxígeno química, (DQO) y biológica (DBO) del lixiviado (Tchobanoglous et al., 2003).
4. La coagulación y floculación donde se añaden reactivos químicos que facilitan la remoción del contaminante por sedimentación (Tchobanoglous et al., 1993).

5. El proceso de membrana el cual incluye la tecnología osmosis inversa, permitiendo separar contaminantes disueltos por medio de membranas semipermeables (United States Environmental Protection Agency, 2020).
6. Los procesos de oxidación avanzada que utilizan ozono o peróxido de hidrógeno para degradar compuestos orgánicos complejos (Kjeldsen et al., 2002).
7. La absorción con carbón activado que remueve los contaminantes mediante la retención en la superficie del carbón activado. Este procedimiento es efectivo para compuestos orgánicos (Tchobanoglous et al., 1993).
8. La desinfección consiste en eliminar microorganismos mediante oxidantes (cloro), ozono o radiación ultravioleta. Su limitación es la formación de subproductos con materia orgánica presente.
9. La recirculación de los lixiviados dentro del relleno sanitario produce o resulta en una disminución en la concentración de compuestos en los lixiviados y el aumento del contenido de humedad dentro de los residuos sólidos. Este proceso de recirculación del lixiviado mejora la eficiencia del relleno sanitario y favorece la descomposición biológica de la materia orgánica (Martínez et al., 2014).
10. Biorremediación: utiliza organismos vivos (microorganismos) para degradar o transformar contaminantes en formas menos dañina. Entre sus ventajas, se encontró que es de bajo costo, sostenible, ecológico y que mejora la calidad del suelo. A pesar de sus ventajas y eficiencia, este es un proceso lento, que depende de factores ambientales como el pH, temperatura, humedad y es limitada su efectividad según el contaminante.

11. La fitorremediación es una técnica basada en el uso de las plantas para extraer, estabilizar o degradar contaminantes. Este proceso puede incluir la fitoextracción, fitoestabilización y fitodegradación, en donde las plantas absorben o inmovilizan contaminantes en sus tejidos (Parida et al., 2024). Entre sus ventajas, se destacan el bajo costo en comparación con los métodos convencionales, su carácter de tecnología ecológica y sostenible, la mejora de la calidad del suelo, la posibilidad de aplicarse en grandes extensiones y su contribución a la restauración del ecosistema y del ambiente aunque es un proceso lento, depende de la biodisponibilidad de los contaminantes, es limitada a la profundidad de las raíces y provoca estrés en las plantas en ambientes altamente contaminados (Garbisu & Alkorta, 2024), (Tamma et al., 2025). La fitorremediación no solo reduce la contaminación en el suelo o el agua, sino que también contribuye a la recuperación de la función del suelo, lo que la convierte en una estrategia integral de rehabilitación ambiental (Delgadillo-López et al., 2011).

2.3 Fitorremediación

La fitorremediación utiliza las plantas para remover, reducir, transformar, mineralizar, degradar, volatilizar o estabilizar contaminantes. Se han identificado una amplia diversidad de especies que se emplean para este fin. Algunas de ellas, debido a su gran capacidad para acumular metales pesados, reciben el nombre de hiperacumuladoras. En este proceso, se aprovecha la capacidad que tienen las plantas de absorber, acumular, metabolizar, volatilizar o estabilizar contaminantes presentes en el suelo, aire y agua (Delgadillo et al., 2011). Entre las ventajas de la fitorremediación se puede mencionar que puede realizarse tanto *in situ* como *ex situ*. Además, no es necesario transportar el

sustrato contaminado, lo que reduce la diseminación de contaminantes a través del aire y el agua. Se han utilizado muchas especies de plantas en estudios de fitoremediación, entre estas water lettuce (*Pistia stratiotes*), *Eichhornia crassipes* (Jacinto de agua, flor de boca o camalote), *Schoenoplectus coliformicus* (Junco o totora), *Phragmites australis* (Carricillo o gramínea trepadora) entre otras (Parida, 2024) (Zuñiga, 2024) (Mena, 2020).

En este estudio se utilizó *Eichhornia crassipes* (Jacinto de agua, flor de boca o camalote). Abbas et al. (2019) reportaron disminución de metales y de otros parámetros físicoquímicos en lixiviados de vertederos tratados con Jacinto de agua. De manera similar, estudios experimentales en India, reportan que el Jacinto de agua puede remover hasta más del 90 % de fenol y cianuro en sistemas de tratamiento de aguas residuales bajo condiciones controladas (Singh & Balomajumder, 2021). Mena (2020), resume que esta especie retiene, entre sus rizomas y tallos, metales como: aluminio, titanio, manganeso, cobalto, cobre, zinc, selenio, bario, uranio, calcio y hierro hasta un 57% en promedio. En México, combinaron dos plantas conocidas por su capacidad fitoremediadora: Jacinto de agua y la Lechuga de agua. Evaluaron, durante 21 días, el efecto de las plantas sobre la concentración de contaminantes químicos y otros parámetros como la turbidez, la demanda de oxígeno y los nitritos. Los resultados reflejaron una reducción significativa de nitritos en la concentración 50% al utilizar ambas plantas en conjunto (Zuñiga et al., 2024).

Revisiones sobre el uso de plantas acuáticas en tratamientos naturales confirman que el Jacinto de agua presenta una alta eficiencia en la reducción de nutrientes responsables de la eutrofización (enriquecimiento excesivo de nutrientes, principalmente nitrógeno (N) y fósforo (P)), lo que lo posiciona como una alternativa sostenible y de

bajo costo para el tratamiento de aguas contaminadas en regiones tropicales (Bindal & Ramesh, 2024). Diversos estudios han demostrado la capacidad de esta especie para absorber contaminantes y mejorar la calidad del agua, lo que sugiere su potencial como alternativa sostenible y de bajo costo (Rezania et al., 2015).

2.4 *Eichhornia crassipes* (Jacinto de agua)

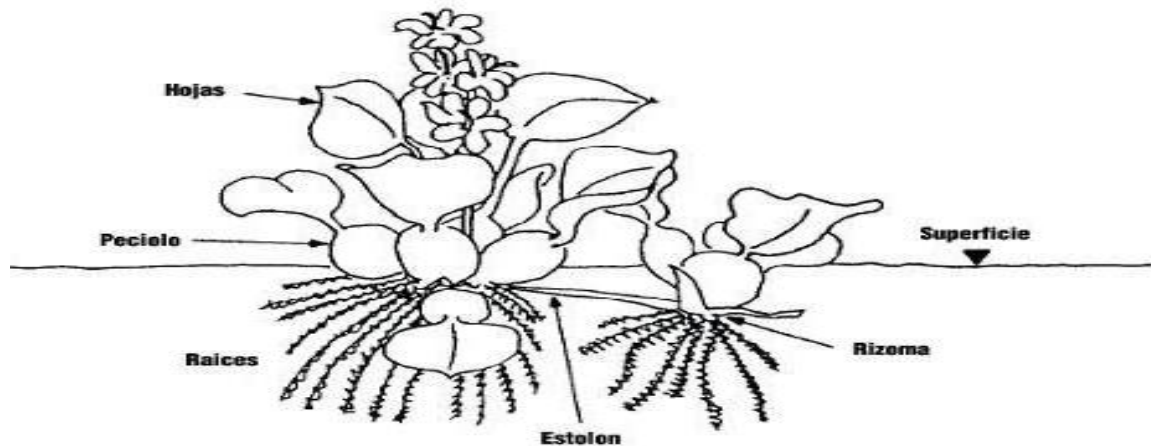
El Jacinto de agua es una planta acuática originaria de la cuenca del Amazonas, además de otros cuerpos de agua de esta región, así como en lagos y pantanos de Brasil y la región Ecuatorial. Los últimos reportes indican que se encuentra distribuido entre el trópico y el subtrópico, entre los 39°N y 39°S (Mena, 2021). Pertenecce a la familia Pontederiaceae, orden Comelinales, clase Liliopsidas y división Magnoliophytas.

El Jacinto de agua es una planta acuática flotante conocida por su capacidad de producción de biomasa y la eliminación de contaminantes del agua. Esta planta crece en un rango de pH óptimo para el crecimiento del Jacinto de agua entre (6) y ocho (8), a una temperatura de uno (1) a 40 °C y para un crecimiento óptimo de 25 a 27.5 °C. Se encuentra en una amplia variedad de tipos de humedales y prefiere aguas ricas en nutrientes, tolerando una variación considerable en los niveles de nutrientes, temperatura y pH. (Poma et al., 2014).

El Jacinto de agua, figura 1, se reproduce sexualmente, a partir de flores que producen frutos en forma de cápsula, procedimiento que le permite multiplicarse. No obstante, la reproducción más sencilla que tiene la planta es por división de los estolones que los plantones emiten durante la estación favorable. Esto provoca una tupida red vegetal capaz de colonizar en poco tiempo una gran superficie acuática y reproducirse fácilmente. (Sayago, 2020)

Figura 1.

Jacinto de agua



Martelo, J. & Borrero L. (2012)

El Jacinto de agua se ha propuesto como fitoremediador porque ayuda a controlar la proliferación de algas, se ha demostrado que remueve contaminantes como metales pesados y otros compuestos químicos orgánicos, pueden ser fuente de alimento para el ganado, protege a los peces de los depredadores y sus raíces aportan un excelente lugar para que los peces pongan huevos. Adicionalmente, esta planta adquiere nutrientes del medio ambiente, los cuales se pueden utilizar como composta (Sayago, 2020).

Sin embargo, el uso de las plantas debe ser controlada por que su rápida propagación la hace invasora en áreas cálidas (duplicando su tamaño cada 9 a 14 días), por lo que no deben ser sembradas cerca de ríos o arroyos. Por estas características, esta planta se encuentra en el listado de las 100 plantas más invasoras del mundo, además de que son un lugar ideal para la proliferación de mosquitos, por lo que es recomendable mantener el agua agitada y con bomba o criar peces que se alimenten de las larvas. Otro

de los problemas que presentan estas plantas, y por lo que deben ser utilizadas bajo control, es que reducen la luz y nutrientes en los estanques, por lo que puede afectar otras especies, y organismos que dependan de dichas especies para alimento y oxígeno. (Sayago, 2020).

En Puerto Rico, Cabrera et al. (2019) expuso plantas de Jacinto de agua a una concentración de 50% de lixiviado, en un diseño de flujo continuo de lixiviados. Realizaron el experimento en el Relleno Sanitario de Moca, el cual recibe desperdicios sólidos de varios pueblos cercanos y algunas compañías privadas, y está ubicado en la ecozona húmeda de las Laderas del Norte con precipitaciones de 100 y 1600 mm anuales, en la zona montañosa norte de la isla. Reportaron una remoción de entre 55 y 99% de nitrato (NO_3^-) y fosfato (PO_4^{3-}) cuando se expuso la planta a una mezcla de 50% de lixiviados (Cabrera et al., 2019)

No se identificaron investigaciones sobre el uso de Jacinto de agua, para el tratamiento de lixiviados del Relleno Sanitario de Hormigueros en la ecozona de las Laderas del Sur, con precipitación anual de 1500 y 1750 mm, por lo que este estudio evaluó el crecimiento y sobrevivencia del Jacinto de agua en varias concentraciones de lixiviados obtenidos de este relleno sanitario.

2.5 Sistemas de Relleno Sanitario en Puerto Rico

En Puerto Rico, se genera un promedio de 5.6 libras de residuos sólidos por persona, por día (Amador, 2023). De acuerdo con la Agencia de Protección Ambiental, no existe una estimación del volumen anual de los lixiviados generados en los vertederos o rellenos sanitarios. (United States Environmental Protection Agency, 2022).

Actualmente existen 29 vertederos, de los cuales 11 son rellenos sanitarios, diseñados con un sistema de impermeabilización, colección, conducción y tratamiento de lixiviados, control de gases y geomembranas (liners). Los restantes 18 son vertederos, generalmente de cielo abierto, no tienen revestimiento ni control de los lixiviados, y muchos utilizan cubiertas. Los vertederos o rellenos sanitarios están distribuidos en toda la isla, y su diseño debe considerar las ecozonas definidas para Puerto Rico. Las ecozonas son áreas geográficas con clima, topografía, vegetación y tipos suelo similares, donde se esperaría un comportamiento similar de los lixiviados provenientes de los vertederos o rellenos sanitarios. (McCleary, E., Abichou, T., & Rock, S., 2022). En Puerto Rico se identifican cinco ecozonas:

- Costa norte, ubicada al norte de la isla, tiene una extensión de aproximadamente 80 millas y se ubica cerca del nivel del mar, con una precipitación anual entre 1500 y 1750 mm. Tiene elevada infiltración de agua, por lo que tienen alta producción de lixiviados y mayor riesgo de contaminación de acuíferos.
- Laderas del Norte, también se encuentra en el norte de la isla, pero entre 100 y 1000 pies sobre el nivel del mar. Esta ecozona recibe precipitación entre 100 y 1600 mm anuales. El Relleno Sanitario de Moca donde se realizó el estudio de Cabrera (2019) se encuentra ubicado dentro de esta ecozona.
- La ecozona montañosa corresponde al centro montañoso de la isla, con elevaciones que llegan a más de 4000 pies. Es la zona que recibe más precipitación anual de las cinco ecozonas (entre 1500 y 2300 mm). El 60% de la isla se encuentra en esa ecozona.

- Laderas del Sur, ubicada en el sur de la isla, tiene una extensión de unas 110 millas y está ubicada entre 100 y 1000 pies sobre el nivel del mar. Esta ecozona recibe una precipitación anual entre 1500 y 1750 mm. El Relleno Sanitario de Hormigueros estudiado en este trabajo se encuentra en esta ecozona.
- Costa sur incluye el área sur de la isla a nivel del mar desde el municipio de Cabo Rojo hasta Salinas, con un clima más árido y temperaturas elevadas durante gran parte del año, con precipitación anual entre 800 y 1000 mm.

En este estudio se utilizaron lixiviados del Relleno Sanitario de Hormigueros, ubicado en el municipio del mismo nombre, que se encuentra en la ecozona Laderas del Sur. Este sistema de Relleno Sanitario fue construido entre los años 1983 y 1984 en terrenos propiedad del municipio de Hormigueros. El Relleno Sanitario cuenta con aproximadamente 25 cuerdas de terreno y recibe desperdicios tales como basura doméstica y material vegetativo. Además, acepta el recogido de escombros exclusivamente del municipio de Hormigueros. El Relleno Sanitario dispone de un sistema de colección de lixiviados compuesto por seis (6) tanques, cada uno con una capacidad de 6,000 galones, para un total de 36,000 galones.

El lixiviado almacenado en los tanques se elimina diariamente mediante un sistema de descarga directa al sistema de la Autoridad de Acueductos y Alcantarillados (AAA) donde es tratado. La cantidad de lixiviado permitida por la Agencia de Calidad Ambiental, a descargarse mediante el sistema de alcantarillado de Hormigueros, es de 2,800 galones de lixiviado al día. De manera mensual, un laboratorio externo realiza las mediciones en acuerdo con el permiso del relleno sanitario para la

disposición de los lixiviados. De los parámetros en el permiso en este estudio solo se verificará el pH. El permiso del relleno sanitario exige pH de 6.5 a 9.0 para autorizar la descarga de los lixiviados al sistema de alcantarillado (Departamento de Recursos Naturales y Ambientales, 2025).

El Relleno Sanitario de Hormigueros cuenta con dos (2) tomas de muestreo de lixiviados. La primera toma corresponde al lugar donde los camiones, por medio de mangueras, se conectan y se vacían los tanques de lixiviados; en este punto se recolectaron las muestras de lixiviados. El segundo punto de toma está ubicado en la entrada principal del relleno sanitario, y es donde se descargan los lixiviados directamente al sistema de alcantarillado. Este relleno sanitario no cuenta con otro tratamiento de los lixiviados además del almacenamiento y descarga. En este estudio, se documentó el crecimiento de la planta Jacinto de agua, en diferentes concentraciones de lixiviados, y se determinó las concentraciones de nitrito (NO_2^-), fosfato (PO_4^{-3}) y nitrato (NO_3^-) en el agua con lixiviados en presencia de la planta, para evaluar si la planta sobrevive y crece en estas condiciones.

Capítulo III

Metodología

En esta investigación, se evaluó el crecimiento de la planta Jacinto de agua en lixiviados procedentes del Relleno Sanitario de Hormigueros. Para esto, las plantas se expusieron a diferentes concentraciones de lixiviado en agua (0%, 50% y 100%), y se determinó la longitud de la planta y la raíz, el número de hojas y brotes producidos al cabo de 30 días de exposición. Se determinó el crecimiento absoluto y también parámetros fisicoquímicos como pH, turbidez y concentración de nitrito (NO_2^-), fosfato (PO_4^{3-}) y nitrato (NO_3^-). Se realizó una fase preliminar donde se evaluó el efecto del volumen del medio adecuado para el crecimiento de las plantas, y una fase experimental donde se evaluó el crecimiento de las plantas durante 30 días de exposición a los lixiviados.

3.1 Preparación de la planta *Eichhornia crassipes* (Jacinto de agua)

El Jacinto de agua se obtuvo del vivero Karla's Garden Center, ubicado en el municipio de Hormigueros, a aproximadamente cinco (5) km del Relleno Sanitario bajo estudio. Se adquirieron diez plantas adultas (aproximadamente 14 días de crecimiento) para su utilización en los ensayos experimentales, transportadas al lugar de estudio en dos pailas de cinco galones previamente lavadas con agua potable. Al llegar al lugar de estudio se sacaron de las dos pailas y rápidamente fueron colocadas en un tanque de 55 galones con agua de potable de la red de distribución pública, para su adaptación y cultivo inicial.

3.2 Colección de muestra de lixiviados

Las muestras de lixiviado se colectaron directamente de la primera toma del sistema de colección de lixiviados del Relleno Sanitario de Hormigueros en Puerto Rico. Esta toma es la misma que se utiliza para llenar los camiones y vaciar los tanques. Las muestras fueron colectadas en tres envases de cinco (5) galones, previamente lavados con agua potable, esto se realizó durante visitas, previamente coordinadas, llevadas a cabo en el año 2024, así como en marzo de 2025. Las muestras recolectadas se transportaron al lugar de estudio situado a 15 minutos del Relleno Sanitario, en el pueblo de San Germán, para posterior análisis.

Se colectó una muestra de 125 mL para cada tratamiento (seis) en un envase de polietileno (HDPE) limpio (American Public Health Association, 2017), para el análisis de pH y turbidez. Estas fueron transportadas al laboratorio dentro de cajas de cartón a temperatura ambiente (TA). Se determinó el pH y turbidez en un periodo menos a una hora después de la colección a temperatura ambiente (TA).

Adicionalmente, se tomó una segunda muestra de 500 mL en envases de polipropileno (PP), químicamente limpios (American Public Health Association, 2017), destinada al análisis de nutrientes en el espectrofotómetro, y se analizaron antes en un término de 6 meses. Estas muestras se almacenaron a -20 °C hasta el momento de análisis.

3.5 Características morfológicas de la planta

Se midió la longitud de las plantas (desde las hojas a la raíz) y la longitud de la raíz; para esto se utilizó una cinta métrica (cm); las medidas fueron tomadas en una

superficie plana. Se calculó el crecimiento absoluto utilizando la expresión reportada por Odum, 2004:

$$C = \frac{L_f - L_i}{t} \quad (1)$$

Donde L_f es la longitud final, L_i es la longitud inicial y t es el tiempo. Esta fórmula representa la velocidad promedio con la que una planta aumenta su tamaño en un periodo determinado expresado en cm/día (Odum, 2004). Valores positivos con medidas de longitud indican aumento en longitud (crecimiento, aumentando tamaño físico), mientras que valores negativos reflejan una reducción o han acortado en tamaño físico de la planta o la raíz. Los rangos de referencias del crecimiento absoluto de acuerdo a Odum, (2004) se clasifican como: de 0-0.5 cm/día crecimiento lento, de 0.6-1.5 cm/día crecimiento moderado y mayor de 1.5 cm/día crecimiento rápido.

El número de hojas y de nuevos brotes se determinó contando las hojas y contando el número de brotes de manera manual el primer día de la exposición y el último (30).

3.3 Análisis de parámetros fisicoquímicos

Se determinaron el pH y turbidez, así como la concentración de nitrato, nitrito y fosfato de la solución acuosa en la que se encontraban las plantas, el primer día de exposición y el último (30).

Para la determinación del pH se utilizó un equipo de la marca Corning 450 pH/Ion utilizando el Método Standard 4500A (American Public Health Association (APHA), 2017), el cual consiste en determinar la acidez o alcalinidad de la muestra usando el medidor de pH calibrado con soluciones estándares de 4.0, 7.0 y 10.0.

Se midió la turbidez utilizando un turbidímetro marca HF Scientific modelo DRT-100B usando el método Standard 2130B (American Public Health Association (APHA), 2017), este se basa en la cuantificación de la intensidad de la luz dispersada por las partículas suspendidas en una muestra de agua a un ángulo de 90° con respecto a la fuente de luz. Para esto se ajustó el instrumento con agua destilada, se calibró con soluciones estándar de turbidez conocida, y se determinó las unidades de turbidez nefelométrica de la muestra.

Para determinar la concentración de nutrientes se utilizó un espectrofotómetro (Spectronic Genesys 8 UV/Visible Spectrophotometer) y los métodos estándares de la American Public Health Association correspondientes. (American Public Health Association, 2017). El espectrofotómetro se ajustó a la longitud de onda a utilizar, y se ajustó el cero con 10 ml de la muestra, sin tratamiento previo. Para la determinación de nitrito (NO_2^-) se utilizó el Método HACH 8507 (HACH, 2019) con el reactivo Nitri VerR 3. Se determinó fosfato (PO_4^{3-}) siguiendo el Método 8048 (HACH, 2003) con el reactivo Phos VerR 3. Para la determinación de nitrato (NO_3^-) se utilizó el Método 8039 (HACH, 2019b) utilizando el reactivo Nitra VerR 3. Los tres métodos determinan la concentración basándose en la intensidad de color que desarrollan tras añadir reactivos específicos a una longitud de onda determinado para cada nutriente, así para nitrito (NO_2^-) se produce una solución rosada y se midió utilizando una longitud de onda de 507 nm. En el caso del fosfato (PO_4^{3-}), se produce una solución azul-verde y se mide a 880 nm, mientras que en la determinación de nitrato (NO_3^-), se produce una solución color rosa-anaranjado cuya absorción se mide a de 500 nm. El instrumento se ajusta al método deseado y reporta la concentración en la muestra.

El cambio en las concentraciones de los compuestos químicos se calcularon utilizando la siguiente fórmula:

$$\% \text{ cambio en concentración} = \frac{C_f - C_i}{C_i} * 100 \quad (2)$$

Donde:

C_f = concentración del parámetro al día 30

C_i = concentración del parámetro al inicio del experimento.

3.4 Fase preliminar

En esta fase, se evaluó la sobrevivencia de la planta Jacinto de agua en tres tratamientos con concentraciones de lixiviados diferentes (0%, 50% y 100%), para identificar la necesidad de volumen del medio para el crecimiento de las plantas en las peceras. En esta fase, se verificaron los parámetros de pH y turbidez el primer día, y luego a los 14 días de exposición.

Se utilizaron seis peceras pequeñas con capacidad máxima de 3.8L y seis peceras grandes con una capacidad máxima de 18.9L. En las peceras pequeñas se colocó una planta en 1.9L de la mezcla de lixiviado dependiendo del tratamiento: 0% lixiviado, 50% lixiviado y 100% lixiviado, según se muestra en la tabla 1. En las peceras grandes se colocó una planta de Jacinto de agua en 8.0L de la solución correspondiente a cada tratamiento: 0% lixiviado, 50% lixiviado y 100% lixiviado (ver tabla 1).

Los tratamientos se mantuvieron en un área techada con luz indirecta y protegidos de la lluvia durante 14 días. Se determinó el crecimiento de las plantas y las raíces, pH y turbidez el primer día y a los 14 días. Este experimento se repitió por 30 días y se evaluó la sobrevivencia de la planta.

Tabla 1.

Rotulación de peceras según el tratamiento.

Peceras	Rotulación de peceras	Tratamientos % de lixiviado	Volumen de agua (L)	Volumen de Lixiviado (L)
Pequeñas	a1, a2	0%	1.9	0
	c1, c2	50%	0.95	0.95
	b1, b2	100%	0	1.9
Grandes	A1, A2	0%	8.0	0.0
	C1, C2	50%	4.0	4.0
	B1, B2	100%	0.0	8.0

3.5 Fase experimental

Para la fase experimental se utilizaron las peceras grandes y se le añadieron 18L de la mezcla correspondiente de lixiviados y agua: 0% lixiviado, 50% lixiviado y 100% lixiviado. Cada mezcla de lixiviado se añadió a dos peceras y se consideraron réplicas. Se colocaron 2 plantas en cada pecera grande, para un total de 4 plantas por tratamiento. Los tratamientos se mantuvieron en un área abierta expuestas al sol y lluvia durante 30 días. Durante el estudio, se recibió media pulgada de lluvia el día 8 y una pulgada de lluvia el día 16, medido con un pluviómetro. No se le agregó agua adicional. Se determinó el pH, turbidez, concentración de nutrientes (nitrito (NO_2^-), fosfato (PO_4^{3-}) y nitrato (NO_3^-) y las características morfológicas de las plantas creciendo en las distintas mezclas de lixiviados en agua: 0% lixiviado, 50% lixiviado y 100% lixiviado. Estas determinaciones se realizaron el primer día de exposición (día 1) y luego de 30 días (día 30). Las plantas inicialmente midieron entre 51cm y 92cm de longitud.

3.6 Análisis de los datos:

El análisis de los datos se realizó utilizando ANOVA con un 95% de confianza. Esta prueba estadística permitió comparar medias de tres o más grupos; en este caso para determinar si había diferencias significativas entre el tiempo y tratamientos de las muestras de 0%, 50% y 100% de lixiviado. Se compararon variables, tales como: pH, turbidez, crecimiento absoluto de la planta y la raíz y la concentración de nutriente: nitrito (NO_2^-), fosfato (PO_4^{3-}) y nitrato (NO_3^-) del día uno y día 30.

Resultados

Previo a recomendar estudios futuros del uso de la planta Jacinto de agua (*Eichhornia crassipes*) para la fitoremediación de nutrientes nitrito (NO_2^-), fosfato (PO_4^{3-}) y nitrato (NO_3^-) en los lixiviados del Relleno Sanitario de Hormigueros, este estudió evaluó el crecimiento y sobrevivencia de la planta en dichos compuestos. Para esto, en una fase preliminar se evaluó el crecimiento y sobrevivencia de la planta en diferentes volúmenes de líquido de los diferentes tratamientos: 0%, 50% y 100% de lixiviado mezclado con agua potable. Se determinaron las características morfológicas de la planta y raíz, así como parámetros fisicoquímicos el día de inicio (día 1) y al cabo de 14 días (día 14). Una vez identificadas las condiciones óptimas para el crecimiento, se realizó la fase experimental donde se evaluó el efecto de la concentración de lixiviado en las características morfológicas de la planta y raíz, y los parámetros químico-físicos el primer día (día 1) y al cabo de 30 días de exposición (día 30).

3.10 Fase preliminar

En la fase preliminar un grupo de las plantas fueron expuestas a tratamientos con 0%, 50% y 100% de lixiviado, en peceras pequeñas con 1.9L de mezcla total (lixiviado más agua) y otro grupo en peceras grandes con 8.0L de mezcla total lixiviado más agua. Estas se mantuvieron bajo techo con luz indirecta. Se determinó la sobrevivencia de la planta Jacinto de agua bajo los tres tratamientos al día 14. También se determinó el crecimiento de las plantas y el pH y turbidez. En las peceras pequeñas se utilizaron con 1.9L de líquido, se utilizaron plantas pequeñas, entre 5 y 12 cm de longitud y en las

peceras grandes con 8.0L de líquido, midieron entre 47 y 61 cm de longitud, como se muestra en la tabla 1.

Características morfológicas de la planta

La determinación de las características morfológicas de la planta Jacinto de agua permitieron reportar el crecimiento en la planta y la raíz. En la tabla 2, se observan las medidas (cm) de longitud de cada planta y la raíz en un periodo de 14 días en diferentes concentraciones de lixiviados (con dos peceras por tratamiento).

Tabla 2.

Características morfológicas de las plantas expuestas a diferentes concentraciones de lixiviado

Tamaño pecera	Volumen de líquido (L)	Tratamiento (% lixiviado)	Longitud de planta (cm)		Longitud de raíz (cm)	
			Día 1	Día 14	Día 1	Día 14
Pequeña	1.9	0%	5.0	10.0	3.0	4.0
			6.0	10.0	4.0	6.0
		50%	7.0	9.0	4.0	6.0
			7.5	10.0	5.5	8.0
		100%	7.0	13.0	5.0	8.0
			12	17.0	5.0	8.0
Grande	8.0	0%	50.0	53.0	29.0	33.0
			56.0	60.0	28.0	32.0
		50%	61.0	62.0	39.0	41.0
			57.0	59.0	38.0	39.0
		100%	47.0	48.0	21.0	22.0
			55.0	54.0	29.0	30.0

Se determinó el crecimiento absoluto en cm/día de la planta, entre el día uno y el día 14, con la expresión reportada por Odum, 2004, medido en cm/día y los resultados se presentan en la siguiente tabla 3. (Odum, 2004; Hunt, 1990)

Tabla 3.

Crecimiento absoluto de la planta y la raíz del Jacinto de agua por tratamiento, en ambas peceras.

Tamaño pecera	Volumen de líquido (L)	% lixiviado	Crecimiento absoluto (cm/ día)	
			Planta	Raíz
Pequeña	1.9	0%	0.35	0.07
			0.28	0.14
		50%	0.14	0.14
			0.17	-0.17
		100%	0.42	0.21
			0.35	0.21
Grande	8	0%	0.21	0.28
			0.28	0.28
		50%	0.07	0.14
			0.14	0.07
		100%	0.07	0.07
			-0.07	0.07

Al evaluar los resultados del crecimiento absoluto, al observar los resultados, pareciera que en presencia de lixiviados el crecimiento absoluto de las plantas y las raíces fue menor en los tratamientos con 50% y 100% de lixiviados en ambas peceras, al igual que para la raíz, cuando se compara con el tratamiento de 0% de lixiviado. Sin embargo, al analizar los resultados utilizando un análisis de varianza (ANOVA), con un 95 % de confianza, se obtuvo una $p=0.89$ (> 0.05) para el crecimiento absoluto de las plantas en los diferentes tratamientos usando las peceras pequeñas. Esto indica que no se observó una diferencia significativa entre el crecimiento absoluto de las plantas o las raíces que fueron expuestas a los distintos tratamientos 0%, 50% y 100% cuando se utilizaron peceras pequeñas.

Resultados similares se obtuvieron al analizar el crecimiento absoluto de las plantas y raíces en las peceras grandes. Para este grupo el análisis de varianza al 95% de

confianza, reportó una $p = 0.13$ (> 0.05), lo cual indica que no se observó una diferencia significativa entre el crecimiento absoluto de las plantas y la raíces que fueron expuestas a los distintos tratamientos 0%, 50% y 100% en las peceras grandes. Durante todo el experimento, las plantas se mantuvieron vivas, aunque al final de los 14 días se observaban hojas con zonas amarillas que indicaban posible deterioro de las plantas.

pH en los tratamientos

El análisis del pH se realizó en ambas peceras: grandes y pequeñas (1.9L y 8.0L) con el propósito de monitorear y comparar las variaciones en los tratamientos durante el desarrollo del experimento (Dos peceras por tratamiento).

Tabla 4.

Resultados de pH en el líquido, de las peceras grandes y pequeñas que contenían plantas de Jacinto de agua, el día 1 y día 14 de exposición. Dos peceras por tratamiento.

Tamaño pecera	Volumen de líquido (L)	% lixiviado	pH	
			Día 1	Día 14
Pequeña	1.9	0%	7.818	7.602
			7.612	7.634
		50%	7.134	8.209
			7.235	8.642
		100%	7.007	8.238
			7.009	8.305
Grande	8.0	0%	7.818	7.863
			7.345	7.870
		50%	7.134	8.281
			7.256	8.306
		100%	7.007	8.238
			7.124	8.322

El pH se mantuvo entre valores neutros y ligeramente alcalinos en todas las peceras: entre 7.00 y 8.64 en las peceras pequeñas y entre 7.00 y 8.32 en las peceras grandes.

Se observa que el pH aumentó en el líquido de los tratamientos de 50% y 100% de lixiviado, mientras se mantuvo estable en los tratamientos sin lixiviado. El análisis de ANOVA comparando pH del día 1 con los del día 14 en las peceras pequeñas, indica que los valores fueron estadísticamente diferentes ($p=0.026 < 0.05$), y de igual manera se encuentra para el pH en las peceras grandes ($p = 0.0038 < 0.05$), (Tabla 4).

Resultados de turbidez (NTU).

El análisis de la turbidez se realizó en ambas peceras: grandes y pequeñas los días uno y día 14, con el objetivo de evaluar la presencia de partículas suspendidas en las muestras durante el desarrollo del experimento. La tabla 5 muestra los resultados de las medidas de turbidez en los diferentes tratamientos (Dos peceras por tratamiento).

Tabla 5.

Resultados de turbidez del líquido en las peceras grandes y pequeñas, que contenían la planta Jacinto de agua, el día 1 y día 14 de exposición. Dos peceras por tratamiento.

Tamaño pecera	Volumen de líquido (L)	% lixiviado	Turbidez (NTU)	
			Día 1	Día 14
Pequeña	1.9	0%	0.85	2.26
			0.89	1.65
		50%	1.26	2.80
			1.28	2.34
		100%	0.15	1.20
			0.12	1.50
Grande	8.0	0%	0.85	0.80
			0.99	0.59
		50%	0.12	0.95
			0.10	0.65
		100%	1.29	1.30
			1.10	1.75

Se observa que la turbidez aumentó en las peceras pequeñas para todos los tratamientos, incluyendo el que no tenía lixiviados. El análisis de ANOVA, comparando

la turbidez del día 1 con la del día 14 en las peceras pequeñas, indica que los valores fueron estadísticamente diferentes ($p=0.0041 < 0.05$). El incremento de la turbidez refleja incremento en niveles de sólidos suspendidos, que posiblemente se deban a la degradación de las plantas en el pequeño volumen de líquido (Environmental Protection Agency EPA, 2023). No se observó el mismo comportamiento en las peceras grandes ($p= 0.3597 > 0.05$), como se observa en los resultados, la turbidez no varió entre el día 1 y el día 14, posiblemente porque los sólidos suspendidos estaban dispersos en mayor volumen de líquido. Estos resultados parecen indicar que volumen de la mezcla de lixiviados podría afectar los resultados de turbidez de este estudio, por lo que se utilizó un mayor volumen de líquido en la fase experimental.

3.11. Resultados Fase Experimental

En la fase experimental, plantas de más de 60 cm de longitud se expusieron a tratamientos con 0%, 50% y 100 % de lixiviados, en peceras grandes y con 18L de la mezcla. Estas fueron expuestas al sol y a la lluvia durante 30 días. Durante este período llovió en dos ocasiones, por lo que no fue necesario agregar agua para mantener el volumen. Se determinaron las características morfológicas y los parámetros físico-químicos el primer día de exposición (día 1) y al cabo de 30 días (día 30).

Características morfológicas de las plantas

A continuación, se presentan los resultados de la longitud de las plantas en las peceras grandes, expuestas a los diferentes tratamientos de lixiviados, por un período de 30 días. Se comparó la longitud de la planta en el día uno vs el día 30 en tres tratamientos: 0%, 50% y 100% de lixiviados en 18L en todos los casos.

Tabla 6.

Longitud de cada planta expuestas a diferentes concentraciones de lixiviado. Se utilizaron dos plantas (P1 y P2) en cada pecera, y dos peceras con cada tratamiento (0%, 50% y 100%)

Volumen de líquido (L)	% lixiviado	Longitud de planta P1 (cm)		Longitud de planta P2 (cm)	
		Día 1	Día 30	Día 1	Día 30
18.0	0%	87	88	80	81
		70	74	51	70
	50%	90	76	91	71
		78	65	79	66
	100%	73	70	93	74
		95	80	86	79

Se determinó el crecimiento absoluto de la planta entre el día uno y el día 30 siguiendo la siguiente formula (1) descrita por Odum, 2024:

$$C = \frac{L_f - L_i}{t}$$

Donde Lf es la longitud final, Li es la longitud inicial y t es el tiempo (Odum, 2004) y los resultados se presentan en la siguiente tabla 7.

Tabla 7.

Crecimiento absoluto de las plantas (P1 y P2) expuestas a diferentes concentraciones de lixiviado. Se utilizaron dos plantas (P1 y P2) en cada pecera, y dos peceras con cada tratamiento (0%, 50% y 100%)

Volumen de líquido (L)	% lixiviado	Crecimiento absoluto (cm/día)	
		Planta 1 (P1)	Planta 2 (P2)
18	0%	0.03	0.03
		0.13	0.63
	50%	-0.46	-0.66
		-0.43	-0.43
	100%	-0.10	-0.63
		-0.50	-0.23

Al evaluar estos resultados, se observó que en la presencia de los lixiviados el crecimiento absoluto fue negativo. Los resultados negativos indican que la planta no creció, esto puede deberse al estrés al que se somete la planta debido a componentes del lixiviado, exceso de toxicidad, la descomposición de la planta o al ciclo de vida de la planta que es solo de 14 días.

Se realizó un análisis (ANOVA) con un 95 % de confianza y se obtuvo una $p=0.29 > 0.05$ entre los tratamientos, lo cual refleja que no se observó una diferencia significativa entre el crecimiento absoluto de las plantas en los distintos tratamientos.

Longitud de la raíz

Los resultados de la longitud de las raíces de las plantas en los diferentes tratamientos en un periodo de 30 días se encuentran en la tabla 8. Se determinó el crecimiento absoluto de la raíz, en el día uno y el día 30, en los tres tratamientos: 0%, 50% y 100% de lixiviados en 18L en todos los casos, tabla 9.

Tabla 8.

Longitud de las raíces de las plantas expuestas a diferentes concentraciones de lixiviado, al inicio y a los 30 días de exposición. Se utilizaron dos plantas (P1 y P2) en cada pecera, y dos peceras con cada tratamiento (0%, 50% y 100%)

Volumen de líquido (L)	% lixiviado	Longitud de raíz P1 (cm)		Longitud de raíz P2 (cm)	
		Día 1	Día 30	Día 1	Día 30
18.0	0%	57	58	55	59
		45	46	23	29
	50%	64	35	62	44
		43	46	46	34
	100%	42	45	71	47
		69	67	48	47

Tabla 9.

Crecimiento absoluto de la raíz en planta 1 y planta 2. (P1 y P2) expuestas a diferentes concentraciones de lixiviado, al inicio y a los 30 días de exposición. Se utilizaron dos plantas (P1 y P2) en cada pecera, y dos peceras con cada tratamiento (0%, 50% y 100%)

Volumen de líquido (L)	% lixiviado	Crecimiento absoluto (cm/día)	
		Raíz 1 (P1)	Raíz 2 (P2)
18	0%	0.03	0.13
		0.03	0.20
	50%	-0.96	-0.60
		0.10	-0.40
	100%	0.10	-0.80
		-0.06	-0.03

Se observa que en la presencia de los lixiviados (50% y 100%), el crecimiento (longitud) de las raíces de las plantas fue de crecimiento muy bajo (-0.96) a crecimiento bajo (-0.03), siguiendo la escala de crecimiento de Odum, 2004 & Hunt, 1990. Al cabo de los 30 días, las raíces en peceras con 0% de lixiviado crecieron entre 1 y 6 cm, mientras

que, en presencia de lixiviado, no se observa un patrón. El análisis de varianza (ANOVA) con un 95% de confianza, realizado en las pruebas de la longitud de la raíz no mostró diferencias significativas entre la longitud de las raíces en los diferentes tratamientos ($p=0.358$. 0.05).

Cantidad de hojas por planta

Además de medir la longitud de la planta, se contabilizó la cantidad de hojas por planta al día 1 y al día 30 del experimento, con el objetivo de evaluar crecimiento o reproducción y desarrollo de biomasa para tener otro parámetro de crecimiento para comparar dichos cambios con las diferentes concentraciones de lixiviado.

Tabla 10.

Conteo de hojas de cada planta (P1 y P2) expuestas a diferentes concentraciones de lixiviado, al inicio y a los 30 días de exposición. Se utilizaron dos plantas (P1 y P2) en cada pecera, y dos peceras con cada tratamiento (0%, 50% y 100%)

Volumen de líquido (L)	% lixiviado	Conteo de hojas P1		Conteo de hojas P2	
		Día 1	*Día 30	Día 1	*Día 30
18.0	0%	13	14	13	14
		8	10	10	11
	50%	12	14	14	19
		7	10	12	14
	100%	9	14	8	11
		11	15	7	10

*conteo total = número de hojas día uno más número de hojas nuevas.

Se observó que todas las plantas aumentaron el número de hojas entre el día 1 al día 30, independientemente de la concentración de lixiviado. En 0 % de lixiviado, el aumento en el número de hojas, según el conteo manual, fue de una o dos hojas en ambas plantas (P1 y P2), en 100 % de lixiviado el número de hojas aumentó entre 3 y 4 hojas y en los tratamientos con 50 % de lixiviado se observó un aumento entre 2 y 5 hojas. El

análisis de varianza (ANOVA) realizado en la cantidad de hojas producidas por las plantas en cada tratamiento no reflejó diferencias significativas en el número de hojas, entre los tratamientos ($p=0.293 > 0.05$).

También se determinaron los brotes nuevos producidos durante el experimento. En la tabla 11, se presentan los resultados obtenidos al día 30 en la cantidad de brotes por pecera en cada tratamiento, considerando que no había brotes al inicio del experimento.

Tabla 11.

Conteo de brotes de las plantas expuestas a diferentes concentraciones de lixiviado, al cabo de 30 días de exposición. Se utilizaron dos peceras con cada tratamiento (0%, 50% y 100%).

Volumen de líquido (L)	% lixiviado	Número de brotes Día 30
18.0	0%	1
		1
	50%	4
		2
	100%	4
		2

Se observa que todas las plantas tuvieron brotes desde 1 en las peceras que no fueron expuestas a lixiviados (0%) hasta 2 y 4 en las peceras con 50% o 100% de lixiviado.

pH

En la tabla 12, se presentan los valores en pH en cada tratamiento por peceras los días uno y día 30. Se utilizaron dos peceras por tratamiento.

Tabla 12.

Niveles de pH en las diferentes concentraciones de lixiviado durante 30 días. Se utilizaron dos plantas en cada pecera, y dos peceras con cada tratamiento (0%, 50% y 100%).

Volumen de líquido (L)	% lixiviado	pH	
		Día 1	Día 30
18.0	0%	7.880	7.098
		7.800	7.309
	50%	7.580	7.372
		7.700	7.208
	100%	7.346	7.425
		7.241	7.429

El pH en las peceras se mantuvo entre 7.098 y 7.88 en el líquido con 0 % de lixiviados, 7.05–7.43 en los que contenían inicialmente 100 % de lixiviado y entre 7.03–7.7 cuando se utilizó 50 % de lixiviados. Estos valores se encuentran dentro del rango adecuado (6–8) para el crecimiento de las plantas, según la literatura (Reddy & Tucker, 1988). El análisis de varianza (ANOVA) realizado en las pruebas de pH no reflejan diferencias significativas entre los pH por tratamientos al inicio y a los 30 días de exposición ($p=0.094 > 0.05$).

Turbidez (NTU)

Se analizaron los niveles de turbidez en NTU en el líquido de cada tratamiento, al inicio del experimento (día 1) y al cabo de 30 días (día 30). En la tabla 13, se presentan los valores de turbidez en cada tratamiento de lixiviado por peceras los días uno y día 30. (Dos peceras por tratamiento).

Tabla 13.

Medida de turbidez (NTU) en un periodo de 30 días. Se utilizaron dos plantas en cada pecera, y dos peceras con cada tratamiento (0%, 50% y 100%)

Volumen de líquido (L)	% lixiviado	Medida de turbidez (NTU)	
		Día 1	Día 30
18.0	0%	15.5	10.1
		14.3	11.3
	50%	9.06	15.9
		8.66	19.8
	100%	2.5	74.8
		2.3	70.9

La turbidez mostró comportamientos diferentes según la concentración de lixiviado durante los 30 días. En las peceras con 0 % de lixiviado, se observó una disminución de turbidez de 15.5 NTU a 10.1 NTU; mientras que en las de 50 % se registró un incremento, de 9.06 a 15.9 (NTU) y 8.66 a 19.8 (NTU). Mientras en los líquidos que contenían 100% de lixiviados, la turbidez aumentó alrededor de 35 veces, de 2.5 a 74.8 (NTU) y de 2.3 a 70.9 (NTU). El análisis de varianza (ANOVA) realizado en los valores de turbidez mostraron diferencias significativas al comparar la turbidez del día y del día 30 ($p=0.000011 < 0.05$) y diferencia significativa entre los tratamientos ($p=2.1 \times 10^{-7} < 0.05$).

Concentración de nutrientes

Las tablas de nutrientes (14, 15 y 16), presentan los resultados obtenidos de la concentración de nitrito (NO_2^-), fosfato (PO_4^{3-}) y nitrato (NO_3^-), en el líquido de los diferentes tratamientos, al inicio del estudio (día 1) y al cabo de 30 días (día 30). Se calculó el % de cambio de cada nutriente presente en las tablas 14a, 15a y 16a.

Tabla 14.

Concentración de NO_2^- y el porcentaje (%) de cambio en el líquido de los diversos tratamientos de lixiviados. Rango del método (0.002-0.3 mg/L), el cero significa: “valor por debajo del límite de detección”.

Volumen de líquido (L)	% lixiviado	NO_2^- (mg/L)		Porciento de cambio %
		Día 1	Día 30	
18.0	0%	0.022	0.013	-40
		0.029	0.015	-48
	50%	0.118	0.000	-100
		0.138	0.007	-94.9
	100%	0.002	0.000	-100
		0.026	0.004	-84.6

Tabla 14a.

Promedio de la concentración NO_2^- en cada tratamiento de lixiviados.

% de lixiviado	Día 1 (mg/L)	Día 30 (mg/L)
0	0.025	0.014
50	0.128	0.003
100	0.014	0.002

La concentración de nitrito (NO_2^-) disminuyó en todos los tratamientos durante el periodo de 30 días. En las peceras con 0 % la concentración de nitrito, disminuyó en promedio de 0.025 a 0.014 mg/l al día 30, lo que representó un 44% de disminución en promedio. En las soluciones con 100 % de lixiviado, se observó una disminución de 0.014 a 0.002 mg/L en promedio, lo que corresponde a una disminución promedio de 95%. En el tratamiento de 50% también se observó una disminución de 0.128 a 0.003 mg/L en promedio, lo que representó una disminución de 93% en la concentración de nitrito. El análisis de varianza (ANOVA) realizado a las concentraciones de nitrito (NO_2^-) sí mostró diferencia significativa entre los tratamientos y en los días ($p = 0.00 < 0.05$). La

figura 2, presenta el promedio de la concentración de NO_2^- al inicio y final del experimento, para cada tratamiento (0%, 50% y 100%).

Figura 2.

Promedio de la concentración de NO_2^- en el líquido de cada uno de los tratamientos 0%, 50 y 100% de lixiviados al inicio del experimento (día 1), y al cabo de 30 días (día 30).

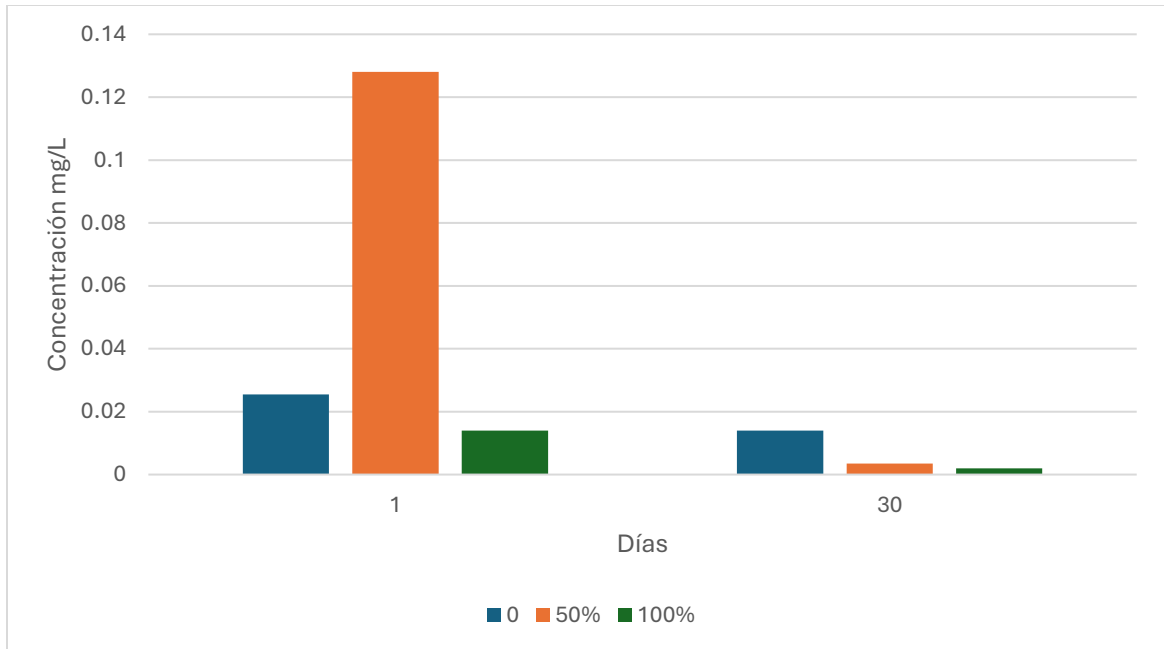


Tabla 15.

Concentración de PO_4^{-3} y porcentaje de cambio en el líquido de los diversos tratamientos de lixiviados. Rango del método (0.02-2.50 mg/L), el cero significa: “por debajo del límite de detección”

Volumen de líquido (L)	% lixiviado	PO_4^{-3} (mg/L)		Porciento de cambio %
		Día 1	Día 30	
18.0	0%	0.207	0.218	+5.3
		0.24	0.186	-22.5
	50%	0.68	0.004	-99.4
		0.771	0.024	-96.8
	100%	0.38	0.071	-81.3
		0.44	0.207	-52.9

Tabla 15a.

Promedio de la concentración de PO_4^{-3} por cada tratamiento con lixiviados

Cantidad de lixiviado	Día 1 (mg/L)	Día 30 (mg/L)
0%	0.2235	0.202
50%	0.725	0.014
100%	0.41	0.139

La concentración de fosfato (PO_4^{-3}) en los lixiviados disminuyó al día 30 de exposición con la planta Jacinto de agua. En 0 % de lixiviado se observó un comportamiento mixto, con un leve aumento en una pecera y una disminución en la otra pecera, aunque la concentración se mantuvo alrededor de 0.2 mg/L. En las peceras con 100 % de lixiviado y 50 % de lixiviado se registró una reducción del fosfato (PO_4^{-3}), siendo más notable en las de 50%. El análisis de varianza (ANOVA) realizado en las pruebas de fosfato (PO_4^{-3}) no se encontró diferencia significativa entre los tratamientos ($p=0.216$). La figura 3 presenta el promedio de la concentración de fosfato al inicio y final del experimento, para cada tratamiento (0%, 50% y 100%).

Figura 3.

Promedio de la concentración de PO_4^{3-} en el líquido de cada uno de los tratamientos 0%, 50 y 100% de lixiviados al inicio del experimento (día 1), y al cabo de 30 días (día 30).

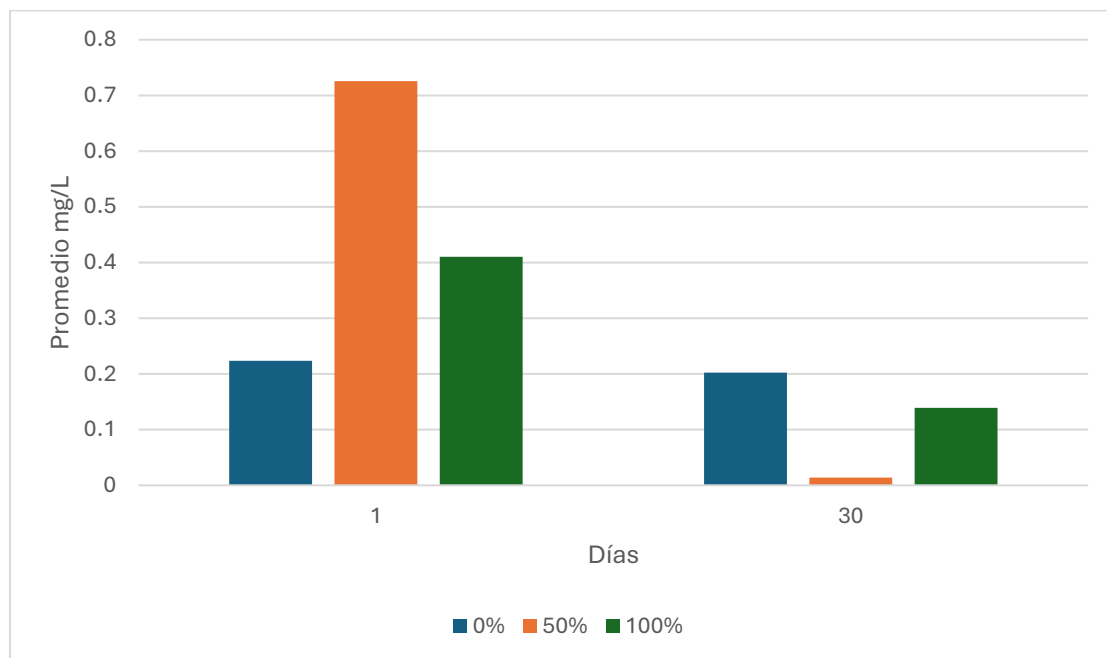


Tabla 16.

Concentración de NO_3^- y porcentaje de cambio en el líquido de los diversos tratamientos de lixiviados. Rango del método (0.3-30.0 mg/L) el cero significa: “por debajo del límite de detección”.

Volumen de líquido (L)	% lixiviado	NO_3^- (mg/L)		Porcentaje de cambio %
		Día 1	Día 30	
18.0	0%	1.16	1.89	+62.9
		1.22	2.63	+ 115.5
	50%	7.51	4.68	-37.6
		4.95	0.317	-93.5
	100%	3.23	2.53	-27.6
		3.56	4.152	+16.6

Tabla 16a.

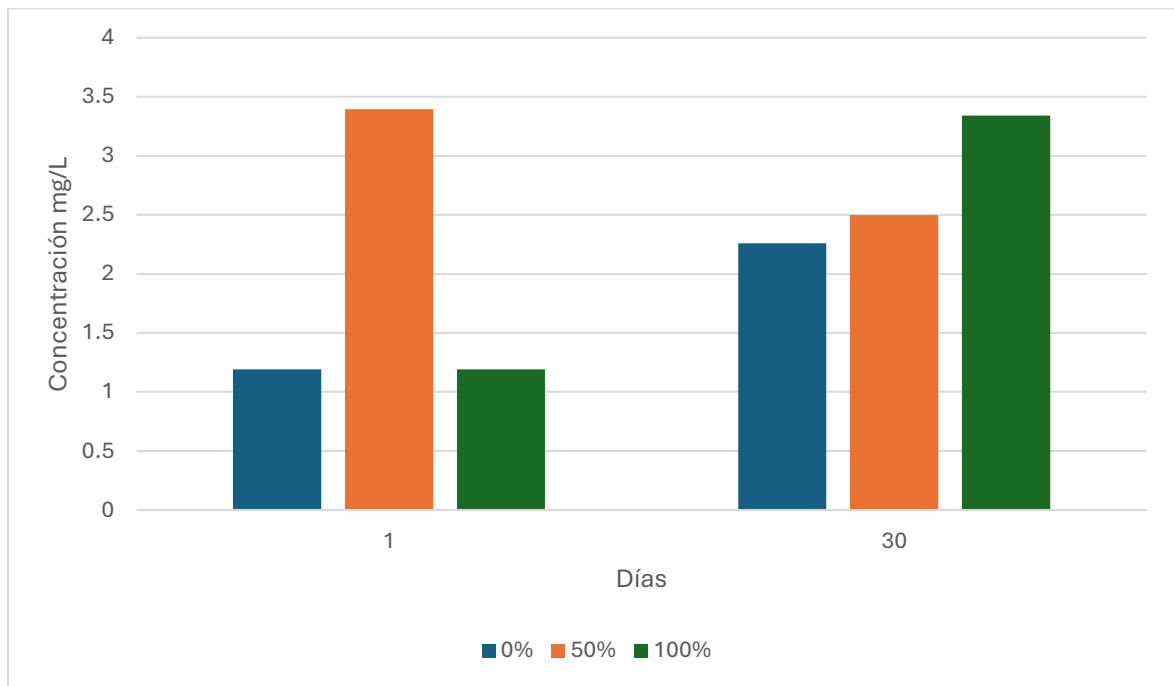
Promedio de la concentración de NO_3^- en las peceras en el líquido de cada uno de los tratamientos 0%, 50 y 100% de lixiviados al inicio del experimento (día 1), y al cabo de 30 días (día 30).

% lixiviado	Día 1 (mg/l)	Día 30 (mg/l)
0%	1.19	2.26
50%	6.23	2.49
100%	3.395	3.341

El comportamiento del nitrato (NO_3^-) varió según la concentración de lixiviado durante los 30 días. En las peceras con 0 % de lixiviado y la pecera B2 de 100% lixiviado se observó un aumento en la concentración. En contraste, en la pecera con 100 % de lixiviado B1, se encontró una reducción de 27.6 % de nitrato. En las peceras de 50%, se obtuvo un cambio de 37.6% en la pecera C1 y de 93.5% en la pecera C2. En conjunto, los resultados muestran una leve tendencia general a la reducción de NO_3^- , en los sistemas con presencia de lixiviado en los tratamientos de 50%. El análisis de varianza (ANOVA) realizado para comparar las concentraciones de NO_3^- durante el experimento para cada tratamiento, no encontró diferencia significativa entre los tratamientos ($p=0.302 > 0.05$). La figura 4 presenta el promedio de la concentración de nitrato, al inicio y final del experimento, para cada tratamiento (0%, 50% y 100% de lixiviados).

Figura 4.

Promedio de la concentración de NO_3^- en el líquido de cada uno de los tratamientos 0%, 50 y 100% de lixiviados al inicio del experimento (día 1), y al cabo de 30 días (día 30).



Análisis de resultados

Se evaluó la sobrevivencia de la planta Jacinto de agua (*Eichhornia crassipes*) expuesto a diferentes concentraciones de lixiviados provenientes del Relleno Sanitario en Hormigueros en Puerto Rico. En la fase preliminar se evaluó el volumen necesario para el crecimiento de la planta. Se expusieron las plantas a diferentes volúmenes de lixiviados y diferentes concentraciones de estos en agua (0%, 50% y 100% de lixiviados). Se evaluaron cambios morfológicos, pH y turbidez en plantas que crecieron en 1.9 L de líquido y se compararon con aquellas que crecieron en 8.0 L de líquido. Los resultados mostraron que las plantas crecieron tanto cuando estaban en 1.9 L como cuando estaban en 8.0 L de la mezcla de lixiviados. Por su parte, el pH aumentó en las peceras con lixiviado, en comparación con las que no tenían lixiviado, sin distinción entre el volumen de líquido utilizado. La turbidez aumentó más en las peceras pequeñas, pero no se observó este comportamiento en las peceras grandes. Esto puede deberse a la acumulación de materia orgánica y descomposición de la planta, que se acumula en un menor volumen de líquido, cuando se utilizó 1.9 L de solución a cuando se utilizó en 8.0 L de mezcla. Durante esta fase, las plantas estaban protegidas del sol directo y la lluvia, y al cabo de 14 días, se observaron hojas marchitándose. De la fase preliminar, se decidió utilizar el mayor volumen de líquido posible para cada mezcla de tratamiento, por lo que en esa fase se utilizó 18L de líquido, y se decidió exponer las plantas al sol y la lluvia, para simular el entorno que tendrían en su ambiente natural.

En la fase experimental, las plantas se expusieron a diferentes concentraciones de lixiviados en agua (0%, 50% y 100%), durante 30 días. Se determinaron cambios en longitud de la planta y raíz, así como el crecimiento absoluto expresado en cm/día, el

número de hojas y brotes que se produjeron durante el experimento, y se determinaron el pH, turbidez y la concentración de (nitrito (NO_2^-), fosfato (PO_4^{3-}) y nitrato (NO_3^-).

En tratamientos con 0% de lixiviado las plantas registraron valores de crecimiento absoluto (longitud) entre 0.03 y 0.63 cm/día (tabla 7). Los valores positivos indican crecimiento de las plantas en agua potable, lo que parece indicar condiciones favorables para el desarrollo de la planta en ausencia de contaminantes provenientes del lixiviado. Sin embargo, se evidenció un aumento en el número de hojas y brotes en las plantas en todos los tratamientos. Lo que parece indicar, dado que las plantas utilizadas eran adultas, a que esto favorece la reproducción en el aumento en longitud. Según Rezania et al., 2015, en concentraciones bajas de lixiviados, el Jacinto de agua crece bien, aumentando su biomasa, mientras que, si las concentraciones en lixiviados son de moderada a altas, el crecimiento longitudinal se reduce y puede afectar la fotosíntesis y reducción en las raíces. Los resultados obtenidos en este experimento apoyan lo reportado por Rezania et al., (2015), ya que las plantas sobrevivieron en todas las concentraciones evaluadas, pero presentaron un menor crecimiento en los tratamientos con mayores concentraciones de lixiviado en comparación con el tratamiento 0 % de lixiviado. Esto sugiere que, aunque el Jacinto de agua puede adaptarse a ambientes contaminados, concentraciones elevadas de lixiviado pueden limitar su crecimiento, pero no afecta su reproducción. Según Odum (2024) y Hunt (1990), los valores negativos en crecimiento absoluto indican pérdida de biomasa o reducción estructural de la planta debido a condiciones ambientales desfavorables, como el exceso de nutrientes posiblemente de la exposición a los lixiviados. A pesar de estas disminuciones del crecimiento absoluto de las plantas, estas aumentaron el número de hojas y brotes durante el período de estudio (tablas 10 y 11).

Según Gopal, (1987), las raíces son sensibles a la presencia de nutrientes y contaminantes ya que permanecen en contacto directo con los compuestos presentes en el agua. La disminución en el crecimiento absoluto de la raíces obtenida en este estudio, en algunos de los tratamientos con lixiviados, contrasta con otros estudios previos que indican que el Jacinto de agua incrementa el desarrollo de su sistema radicular en presencia de nutrientes, como nitrógeno y fósforo, presentes en lixiviados, lo que mejora su capacidad de absorción y fitorremediación; sin embargo, concentraciones elevadas pueden provocar estrés fisiológico y reducir el crecimiento de las raíces (Reddy & Tucker, 1988; Rezania et al., 2015). Bajo las condiciones de nuestro estudio, a pesar de que algunos tratamientos presentaron valores positivos (0.10 cm/día), la tendencia general fue que las altas concentraciones de lixiviado afectaron negativamente el desarrollo de las raíces. Estudios previos han demostrado que, aunque el Jacinto de agua posee tolerancia a ambientes contaminados, concentraciones elevadas de contaminantes pueden afectar su metabolismo y reducir su crecimiento (Reddy & Tucker, 1988). En estudios futuros, donde se evalúe la capacidad fitoremediadora del Jacinto de agua, se recomienda monitorear también la salud del sistema radicular, para verificar el efecto de los lixiviados en este, ya que este sistema puede limitar la capacidad de la planta para absorber nutrientes esenciales y realizar procesos de fitorremediación.

El aumento en el número de hojas y brotes sugiere que la planta aprovechó parte de los nutrientes presentes en el lixiviado para mantener crecimiento vegetativo. Sin embargo, al comparar estos resultados con el crecimiento absoluto y el desarrollo radicular, se evidencia que altas concentraciones de lixiviado también generaron efectos negativos sobre otras estructuras de la planta. Por lo que los resultados indican que el

Jacinto de agua tiene capacidad de adaptación y respuesta fisiológica frente a ambientes contaminados, aunque el exceso de lixiviados puede afectar parcialmente su desarrollo integral (Reddy & Tucker, 1988; Rezania et al., 2015).

El Jacinto de agua presentó incrementos en el número de brotes, entre uno a cuatro brotes en los tratamientos de 0%, 50% y 100% de lixiviado. El Jacinto de agua se reproduce principalmente de forma vegetativa mediante la formación de brotes, proceso que depende de la disponibilidad de nutrientes y de las condiciones ambientales (Gopal, 1987). Estudios previos han demostrado que el Jacinto de agua responde rápidamente a ambientes ricos en nutrientes aumentando su biomasa y capacidad reproductiva (Reddy & Tucker, 1988). A pesar de que algunos tratamientos mostraron resultados negativos en crecimiento absoluto y desarrollo radicular, la formación de brotes indica que la planta mantuvo actividad y capacidad de propagación. Esto evidencia una respuesta adaptativa del Jacinto de agua frente a condiciones ambientales estresantes (Gopal, 1987). El aumento en la producción de brotes, a pesar de la reducción en la altura de la planta, puede explicarse por el ciclo de vida y la estrategia de reproducción vegetativa del Jacinto de agua. Esta especie posee una alta capacidad de adaptación a condiciones adversas y bajo estrés ambiental, prioriza la reproducción asexual mediante estolones y la formación de plantas hijas, en lugar del crecimiento vertical. Cuando existe contaminación por lixiviados, pueden afectarse procesos fisiológicos como la fotosíntesis, la absorción de nutrientes y el desarrollo de raíces, lo que limita el crecimiento en altura. Sin embargo, la planta mantiene su estrategia de supervivencia mediante la reproducción vegetativa para asegurar la continuidad de la población (Gopal, 1987; Rezania et al., 2015)

Los valores de pH obtenidos durante este estudio se encontraron dentro de los estándares requeridos por la Junta de Calidad Ambiental (Departamento de Recursos Naturales y Ambientales, 2025) para descarga en agua naturales el alcantarillado y cuerpos de agua. Los valores de pH de las soluciones de lixiviado de este estudio también son comparables con los reportados por Crespo-Medina y Tolaymat, (2022), donde el pH de los lixiviados recogidos en diferentes días en el Relleno Sanitario de Hormigueros que se encontraron en un rango de 6.39 y 7.70. Según Gopal (1987), el Jacinto de agua puede desarrollarse eficientemente en aguas con pH entre 6 y 8.5, con alta tolerancia a variaciones moderadas de acidez y alcalinidad. Los resultados obtenidos en este estudio se mantuvieron dentro de ese intervalo. Las variaciones observadas en el pH también pueden estar relacionadas con procesos de fotosíntesis y absorción de nutrientes. Durante la fotosíntesis, las plantas consumen dióxido de carbono, lo que puede modificar el equilibrio químico del agua y alterar ligeramente el pH (Reddy & Tucker, 1988), y la descomposición de material orgánica también puede alterar el pH.

La turbidez en los tratamientos, incluyendo en el agua no cumplen con los estándares de calidad de agua requeridos para descargas en cuerpos de agua (Departamento de Recursos Naturales y Ambientales, 2025) y son mayores a los reportados por Crespo-Medina y Tolaymat, 2022, quienes encontraron un rango de turbidez entre 0.48 y 11.7 NTU. Estos resultados de turbidez en los tratamientos con lixiviados indican una acumulación de partículas suspendidas en el agua. Este incremento podría estar relacionado con la liberación de materia orgánica, y acumulación de partículas derivadas de procesos biológicos dentro del sistema experimental. Estudios previos han demostrado que esta especie tiene capacidad para remover sólidos

suspendidos y materia orgánica de sistemas acuáticos contaminados (Reddy & Tucker, 1988), sin embargo, esto no se corroboró en nuestro experimento. El incremento en turbidez en los tratamientos con la planta Jacinto de agua, puede deberse al deterioro de raíces y tejidos vegetales que puede contribuir a la liberación de material particulado al medio acuático. Según Odum (2004), sistemas con elevada carga orgánica pueden experimentar incrementos de turbidez debido a procesos de descomposición biológica y proliferación microbiana.

Los resultados de nitrito (NO_2^-) en el sistema experimental con Jacinto de agua muestran cambios en la concentración del nutriente a lo largo del tiempo (días 1 y 30) con plantas expuestas a diferentes concentraciones de lixiviado.

Los datos de la concentración de nitrito (NO_2^-) sugieren que el Jacinto de agua posee una posible capacidad de remoción de nitrito (NO_2^-) cuando fueron expuestos a los lixiviados del Relleno Sanitario de Hormigueros, que contenían menos de 0.12 mg/l de nitrito (NO_2^-). El nitrito es un compuesto intermedio del ciclo del nitrógeno, y su disminución en sistemas acuáticos suele asociarse con procesos de absorción biológica o transformación microbiana (Reddy & Tucker, 1988). La reducción en la concentración de nitritos puede ser ocasionada por la absorción directa del nutriente por la planta y por la actividad microbiana asociada a las raíces, donde ocurren procesos de transformación del nitrógeno (Gopal, 1987).

El fosfato (PO_4^{3-}) es un nutriente esencial para el crecimiento vegetal, pero en exceso puede contribuir a la eutrofización de cuerpos de agua (Reddy & Tucker, 1988). La reducción en la concentración del fosfato (PO_4^{3-}) puede explicarse por la capacidad del Jacinto de agua para absorber nutrientes a través de sus raíces, así como por la

actividad microbiana asociada a la rizosfera. Estudios han demostrado que esta especie es altamente eficiente en la remoción de fósforo en sistemas acuáticos contaminados (Gopal, 1987).

Los resultados de la concentración de nitrato (NO_3^-) no permiten concluir sobre el efecto de la presencia de este nutriente en el crecimiento de la planta. Este comportamiento del nitrato refleja la complejidad de los procesos del ciclo del nitrógeno en sistemas acuáticos con carga orgánica. El Jacinto de agua puede absorber nitratos como fuente de nitrógeno para su crecimiento, pero también pueden ocurrir procesos de transformación microbiana como nitrificación y desnitrificación, los cuales alteran las concentraciones en el tiempo (Gopal, 1987).

Según Odum (2004), en sistemas ecológicos con alta carga de nutrientes es común observar fluctuaciones en los compuestos nitrogenados debido a la interacción entre procesos biológicos, químicos y físicos. Esto podría explicar por qué en algunos casos el nitrato (NO_3^-) disminuye y en otros aumenta durante el mismo experimento.

Los resultados de nuestro estudio son comparables con los presentados por Cabrera en 2019, quienes utilizaron el Jacinto de agua para remover contaminantes del agua con 50% de lixiviados del Relleno Sanitario de Moca, al noroeste de la isla. Cabrera reportó remoción de nitrato (NO_3^-) y fosfato (PO_4^{3-}) de más de 80%, cuando utilizaron la planta Jacinto de agua para remover contaminantes de los lixiviados del Relleno Sanitario de Moca. Al igual que Cabrera (2019), nuestra investigación mostró reducción de nutrientes en presencia de la planta Jacinto de agua en mezclas de lixiviados del Relleno Sanitario de Hormigueros.

Conclusión

Este estudio mostró la capacidad de sobrevivir de la planta Jacinto de agua cuando es expuesta a lixiviados procedentes del Relleno Sanitario de Hormigueros en Puerto Rico. Resultados muestran reducción en la concentración de algunos de los nutrientes estudiados, en presencia de la planta Jacinto de agua en mezclas de lixiviados del Relleno Sanitario de Hormigueros.

A partir de los hallazgos de este estudio se recomienda que futuras investigaciones consideren el uso de sistemas de mayor escala (estanques) que permitan el flujo de las mezclas, así como la inclusión de parámetros adicionales como demanda bioquímica de oxígeno (DBO), demanda química de oxígeno (DQO), conductividad, salinidad, temperatura y amonía (NH_3), y otras especies vegetales con potencial fitorremediador.

Finalmente, la especie *Eichhornia crassipes* (Jacinto de agua) se perfila como una alternativa viable y eficiente para la remoción de nutrientes como nitrito (NO_2^-) y fosfato (PO_4^{3-}) en lixiviados, particularmente en diluciones de 50% provenientes del Relleno Sanitario de Hormigueros, Puerto Rico, ubicado en la ecozona Laderas del Sur de la isla.

Referencias

- Abbas, Z., Arooj, F., Ali, S., Zaheer, I. E., Rizwan, M., & Riaz, M. A. (2019). Phytoremediation of landfill leachate waste contaminants through floating bed technique using water hyacinth and water lettuce. *International Journal of Phytoremediation*, 21(12), 1169–1178.
<https://doi.org/10.1080/15226514.2019.1633259>
- Abichou, T., Del'Angel, J. M., Koloushani, M., Stamatiou, K., Belhadj Ali, N., & Green, R. (2023). Estimation of total landfill surface methane emissions using geospatial approach combined with measured surface ambient air methane concentrations. *Journal of the Air & Waste Management Association*, 73(12), 902–913.
<https://doi.org/10.1080/10962247.2023.2271431>
- Agency for Toxic Substances and Disease Registry (ATSDR). 2017. Toxicological profile for Nitrate and Nitrite. Atlanta, GA: U.S. Department of Health and Human Services, Public Health Service.
<https://www.atsdr.cdc.gov/toxprofiles/tp204.pdf>
- Amador, P. (2023). La contaminación ambiental en Puerto Rico. *El Vocero de Puerto Rico*. 8/julio/2023.
- American Public Health Association (APHA). AWWA, & WEF. (2017). *Standard methods for the examination of water and wastewater* (23rd ed., Methods 4500A). American Public Health Association.
- American Public Health Association (APHA), AWWA, & WEF. (2005). *Standard methods for the examination of water and wastewater* (21st ed., Methods 5220 y 5310). American Public Health Association.

- Bindal, N., Ramesh, S. (2024). Treatment of Wastewater with Phytoremediation Using Water Hyacinth—A Review. In: Reddy, K.R., Ravichandran, P.T., Ayothiraman, R., Joseph, A. (eds) Recent Advances in Civil Engineering. ICC IDEA 2023. Lecture Notes in Civil Engineering, vol 398. Springer, Singapore.
https://doi.org/10.1007/978-981-99-6229-7_21
- Cabrera, J., Cardona, A., Cruz, G., Meléndez, F., & Pérez, A. (2019). *Mejoras al Sistema de Relleno Sanitario Municipal de Moca*. Civil and Environmental Engineering, and Land Surveying Department, Polytechnic University of Puerto Rico.
<https://www.pupr.edu/wp-content/uploads/2013/08/Mejoras-al-Sistema-de-Relleno-Sanitario-Municipal-de-Moca.pdf>
- Cárdenas, A., Restrepo, I., & Marín, J. (2020). Caracterización de lixiviados generados en rellenos sanitarios. *Revista de Ingeniería Ambiental*, 15(2), 45–58.
- Crespo-Medina, M. & Tolaymat, T. (2022). Puerto Rico Municipal Landfill Leachate Quality Characterization.
https://cfpub.epa.gov/si/si_public_record_report.cfm?Lab=CESER&dirEntryId=360787
- Delgadillo-López, A. E., González-Ramírez, C. A., Prieto-García, F., Villagómez-Ibarra, J. R., & Acevedo-Sandoval, O. (2011). Fitorremediación: Una alternativa para eliminar la contaminación. *Tropical and Subtropical Agroecosystems*, 14(2), 597–612.
- Departamento de Recursos Naturales y Ambientales. (2020). *Reglamento para los sistemas de relleno sanitarios*. <https://www.drna.pr.gov/wp->

content/uploads/2020/10/Borrador-Reglamento-Vista-6-de-noviembre-de-2020.pdf

Departamento de Recursos Naturales y Ambientales. (2025). Reglamento Núm. 9677:

Reglamento de estándares de calidad de agua de Puerto Rico.

<https://www.drna.pr.gov/reglamentos-es/reglamento-numero-9677-reglamento-de-estandares-de-calidad-de-agua-de-puerto-rico/>

Garbisu, C., & Alkorta, I. (2024). Enhanced phytoremediation of metal contaminated soils aimed at decreasing the risk of antibiotic resistance dissemination. *Frontiers in Environmental Science*, 12, Article 1307631.

<https://doi.org/10.3389/fenvs.2024.1307631>

Gopal, B. (1987). *Water hyacinth*. Elsevier Science Publishers.

Hach Company. (2019). *Nitrite, LR: Diazotization method (Method 8507)*

https://cdn.hach.com/7FYZVWYB/as/tttmpsm9fpnqwmqvvs8rf6/Nitrite_Diazotization_LR_Method_8507_Powder_Pillows_or_AccuVac_Ampuls_DOC3165301074

Hach Company. (2003). *Phosphorus, reactive (orthophosphate): Ascorbic acid method (Method 8048, DR/4000)*

https://cdn.hach.com/7FYZVWYB/at/4jxnkrmcvp37q7twwmfpx9f/DR_4000_Phosphorus_Reactive_Orthophosphate_Method_8048.pdf

Hach Company. (2019b). *Nitrate, HR: Cadmium reduction method (Method 8039) (DOC316.53.01066)*.

https://cdn.hach.com/7FYZVWYB/as/2mh73gk3pw5jcb395km3zp9/Nitrate_HR

Cadmium Reduction Method 8039 Powder Pillows or AccuVac Ampuls D
OC3165301066

Hunt, H. W., Ingham, E. R., Coleman, D. C., Elliott, E. T., & Reid, C. P. P. (1990).

Nitrogen limitation of production and decomposition in prairie, mountain meadow, and pine forest. *Ecology*, 71(5), 1009–1016.

<https://doi.org/10.2307/1937360>

Kjeldsen, P., Barlaz, M. A., Rooker, A. P., Baun, A., Ledin, A., & Christensen, T. H.

(2002). Present and long-term composition of MSW landfill leachate: A review. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, 32(4), 297–336.

McCleary, E., Abichou, T., & Rock, S. (2022). Diseño, implementación y aprobación de cubiertas de evapotranspiración en Puerto Rico: Documento guía. Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (U.S. EPA).

Mena Ayala, A. (2021). Properties of *Eichhornia crassipes* (Jacinto de agua), *Schoenoplectus colifornicus* (junco), and *Phragmites australis* (carricillo). Revista del Instituto de investigación de la Facultad de minas, metalurgia y ciencias geográficas. Vol. 24, Núm. 47.

https://www.researchgate.net/publication/352551897_Propiedades_del_Eichhornia_crassipes_Jacinto_de_agua_Schoenoplectus_colifornicus_Junco_y_el_Phragmites_australis_Carricillo

Morales J. P., Goitia C. A., Guillen S. G., y Morales J. F. (2024). Lixiviados y desechos sólidos, Una inmersión profunda en la gestión ambiental. [Pontifical Catholic University of Ecuador] Repositorio Académico PCU. ISBN N°: 978-9942-45-683-0

https://www.researchgate.net/publication/380530147_LIXIVIADOS_Y_DESEC_HOS_SOLIDOS

- Navarrete Chévez, D. C., Zambrano Barcos, L. L., Moreira López, S. Y., & Uriña Coello, V. U. (2024). Evaluación de especies vegetales *Eichhornia crassipes* y *Lemna minor* L. para el tratamiento de lixiviados del relleno sanitario del cantón Santa Lucía-Guayas. *Pro Sciences: Revista de Producción, Ciencias e Investigación*, 8(51). <https://journalprosciences.com/index.php/ps/article/view/689>
- Odum, E. P. (2004). *Fundamentals of ecology* (5th ed.). Thomson Brooks/Cole
- Parida, T., Riyazuddin, S., Kolli, S.K., Chakraborty, A., Srinivas, N., Kundu, P., Bhattacharya, S., Shekhar Seth, C. & Kumar Biswas, J. (2024). Phytoremediation of heavy metal(loid)s with integral involvement of the endogenous metal-chelators: present state-of-the-art and future prospect. *Discov Environ* 2, 139. <https://doi.org/10.1007/s44274-024-00170-x>
- Perevochtchikova, M. (2013). La evaluación del impacto ambiental y la importancia de los indicadores ambientales. *Gestión y Política Pública*, 22(2), 283–312.
- Poma Llantoy, V., & Valderrama Negrón, A. (2014). Study of physicochemical parameters for cadmium (II) and mercury (II) phytoremediation using the species *Eichhornia crassipes* (water hyacinth). *Rev Soc Quím Perú*. 80 (3) 2014. <https://pdfs.semanticscholar.org/c1f2/0ac59171d051bb6c818fa583c02aac8b9b73.pdf>
- Reddy, K. R., & Tucker, J. C. (1988). Productivity and nutrient uptake of water hyacinth (*Eichhornia crassipes*). *Aquatic Botany*, 35(1–4), 23–45.

- Rezania, S., Ponraj, M., Talaiekhosani, A., Mohamad, S. E., Taib, S. M., Din, M. F. M., & Kamyab, H. (2015). Perspectives of phytoremediation using water hyacinth for wastewater treatment. *Applied Water Science*, 5, 105–113.
<https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2015.08.018>
- Robey, N. M., Liu, Y., Crespo-Medina, M., Bowden, J. A., Solo-Gabriele, H. M., Townsend, T. G., & Tolaymat, T. M. (2024). Characterization of per- and polyfluoroalkyl substances (PFAS) and other constituents in MSW landfill leachate from Puerto Rico. *Chemosphere*, 358, 142141.
<https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2024.142141>
- Ropero Portillo, S. (2020). *Lixiviados: Definición, ejemplos y tratamiento*. Ecología Verde. <https://www.ecologiaverde.com/lixiviados-definicion-ejemplos-y-tratamiento-2713.html>
- Sáez, A., & Urdaneta G., J. A. (2014). Manejo de residuos sólidos en América Latina y el Caribe. *Omnia*, 20(3), 121–135.
- Sayago, U. F. C., Gómez-Caicedo, M. I., & Mercado Suárez, Á. L. (2024). Design of a sustainable system for wastewater treatment and generation of biofuels based on the biomass of the aquatic plant *Eichhornia crassipes*. *Scientific Reports*, 14(1), 11068. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-61239-4>
- Singh, N., Balomajumder, C. Phytoremediation potential of water hyacinth (*Eichhornia crassipes*) for phenol and cyanide elimination from synthetic/simulated wastewater. *Appl Water Sci* 11, 144 (2021). <https://doi.org/10.1007/s13201-021-01472-8>

- Tamma, A. A., Lejcuś, K., Fiałkiewicz, W., & Marczak, D. (2025). Advancing phytoremediation: A review of soil amendments for heavy metal contamination management. *Sustainability*, 17(13), 5688. <https://doi.org/10.3390/su17135688>
- Tchobanoglous, G., Theisen, H., & Vigil, S. (1993). *Integrated solid waste management: Engineering principles and management issues*. McGraw-Hill.
- Telwesa. (2022). ¿Qué es un lixiviado? <https://telwesa.com/que-es-un-lixiviado/>
- Teng, C., Zhou, K., Peng, C., & Chen, W. (2021). Characterization and treatment of landfill leachate: A review. *Water Research*, 203, 117525. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2021.117525>
- Torres-Lozada, P., Barba-Ho, L., Ojeda C., J., Martínez, J., & Castaño, Y. (2014). Influencia de la edad de lixiviados sobre su composición fisicoquímica y su potencial de toxicidad. *Revista U.D.C.A Actualidad & Divulgación Científica* 17 (1): 245 - 255 <http://www.scielo.org.co/pdf/rudca/v17n1/v17n1a27.pdf>
- United States Army Corps of Engineers. (2018, January 11). USACE exceeds halfway mark in debris mission after collecting 2 million cubic yards in Puerto Rico. <https://www.usace.army.mil/Media/News-Releases/News-Release-Article-View/Article/1414381/usace-exceeds-halfway-mark-in-debris-mission-after-collecting-2-million-cubic-y/>
- United States Environmental Protection Agency. (2018). *Puerto Rico landfill status*. <https://www.epa.gov/pr/puerto-rico-landfills>
- United States Environmental Protection Agency. (2020). *Municipal solid waste landfills*. <https://www.epa.gov/landfills/municipal-solid-waste-landfills>

- United States Environmental Protection Agency. (2021). *Sustainable materials management: Facts and figures* https://www.epa.gov/facts-and-figures-about-materials-waste-and-recycling/guide-facts-and-figures-report-about#Materials_and_Products
- United States Environmental Protection Agency. (2023). *Landfills effluent guidelines*. EPA. [EPA Landfills Effluent Guidelines](#)
- United States Environmental Protection Agency. (2026). Municipal solid waste landfills. <https://www.epa.gov/landfills/municipal-solid-waste-landfills#:~:text=Location%20restrictions%E2%80%94ensure%20that%20landfills,with%20several%20inches%20of%20soil>
- Zhao, Y. (2018). Leachate generation and characteristics. En *Pollution control technology for leachate from municipal solid waste* (pp. 1–30). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-815813-5.00001-2>
- Zúñiga Ruiz, P., Amaro-Espejo, I. A., Pérez-Landa, I. D., & Martínez-Santiago, G. E. (2024). Common water-hyacinth (*Eichhornia crassipes*) and water lettuce (*Pistia stratiotes*) used to treat leachate: Phytoremediation of leachate. *Agro Productividad*. <https://doi.org/10.32854/agrop.v17i8.2822>