



SECRETARÍA DE EDUCACIÓN PÚBLICA
TECNOLÓGICO NACIONAL DE MÉXICO

INSTITUTO TECNOLÓGICO DE BOCA DEL RÍO
DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO E INVESTIGACIÓN

“EVALUACIÓN DE LA FITORREMEDIACIÓN DE LIXIVIADOS DE
RELLENO SANITARIO UTILIZANDO *Pistia stratiotes*”

TESIS

QUE COMO REQUISITO PARA OBTENER EL GRADO DE MAESTRO EN
CIENCIAS EN INGENIERÍA AMBIENTAL

PRESENTA

MVZ. CECILIA AUREA HERNÁNDEZ VIDAL

DIRECTOR DE TESIS:

DRA. PAULA ZUÑIGA RUIZ

CODIRECTOR DE TESIS

DRA. FABIOLA LANGO REYNOSO

ASESORES

DR. JESÚS MONTOYA MENDOZA

DRA. ROCÍO DE GUADALUPE BERNAL RAMÍREZ

JUNIO 2021; BOCA DEL RÍO, VERACRUZ, MÉXICO



ACTA DE REVISIÓN DE TESIS

Número Registro: A-0908-060919

En la ciudad de Boca del Río, Ver., siendo las 10:00 horas del día 10 del mes de mayo de 2021 se reunieron los miembros de la Comisión Revisora de Tesis designada por el Consejo del Posgrado de la Maestría en Ciencias en Ingeniería Ambiental del ITBOCA, para examinar la Tesis de Grado titulada:

"EVALUACIÓN DE LA FITORREMEDIACIÓN DE LIXIVIADO DE RELLENO SANITARIO UTILIZANDO PISTIA STRATIOTOTES"

Que presenta el (la) alumno(a):

CECILIA AUREA HERNANDEZ VIDAL

Aspirante al Grado de:

Maestro en Ciencias en Ingeniería Ambiental

Después de escuchar las opiniones sobre el documento escrito e intercambiar puntos de vista, los miembros de la Comisión manifestaron **SU APROBACIÓN**, en virtud de que satisface los requisitos señalados por las disposiciones reglamentarias vigentes para su defensa ante el jurado correspondiente.

LA COMISIÓN REVISORA:

DRA. PAULA ZUÑIGA RUIZ
Director

DRA. FABIOLA LANGO REYNOSO
Co-Director

DR. JESUS MONTOYA MENDOZA
Asesor

DRA. ROCIO DE GUADALUPE BERNAL RAMIREZ
Asesor





EDUCACIÓN
SECRETARÍA DE EDUCACIÓN PÚBLICA



TECNOLÓGICO
NACIONAL DE MÉXICO

Instituto Tecnológico de Boca del Río
Departamento de División de Estudios de Posgrado e Investigación

Boca del Río, Ver **3/JUNIO/2021**

ASUNTO: AUTORIZACIÓN DE IMPRESIÓN

**CECILIA AUREA HERNANDEZ VIDAL
PASANTE DEL PROGRAMA MAESTRÍA EN
CIENCIAS EN INGENIERÍA AMBIENTAL
PRESENTE**

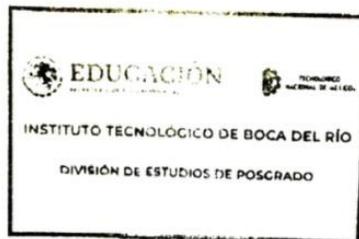
De acuerdo con el fallo emitido por los integrantes del Comité Revisor de la TESIS PARA OBTENCIÓN DE GRADO, desarrollada por usted cuyo título es:

“EVALUACIÓN DE LA FITORREMEDIACIÓN DE LIXIVIADO DE RELLENO SANITARIO UTILIZANDO PISTIA STRATIOTES”

Esta División de Estudios de Posgrado e Investigación le concede AUTORIZACIÓN para que proceda a su impresión.

ATENTAMENTE
*Excelencia en Educación Tecnológica®
Por nuestros mares responderemos*

M.C. ANA LETICIA PLATAS PINOS
JEFA DE LA DIVISION DE ESTUDIOS DE
POSGRADO E INVESTIGACIÓN



c.c.p. Coordinación del Programa MCIAMB
c.c.p. Expediente



Km. 12 Carr. Veracruz-Córdoba, Boca del Río, Ver.
C.P. 94290. Tel. (229) 690 5010 ext. 102
dir01_bdelrio@tecnm.mx
tecnm.mx | bdelrio.tecnm.mx



RESUMEN

El objetivo de esta investigación fue evaluar la eficiencia de remoción de contaminantes a través de la fitorremediación con *Pistia* (*Pistia stratiotes*) en lixiviados de un relleno sanitario. Se utilizaron muestras de lixiviado obtenidas del relleno sanitario “El Guayabo”, ubicado en Medellín, Veracruz, México; estos lixiviados fueron caracterizados fisicoquímicamente en tres temporadas climáticas: estiaje, lluvias y nortes. Luego de la caracterización, se realizaron pruebas de tolerancia de *Pistia* a diferentes concentraciones de lixiviado, monitoreando las condiciones medioambientales, para poder obtener la concentración adecuada de lixiviado para las pruebas de fitorremediación. Las pruebas de fitorremediación se realizaron durante 15 días, determinando los porcentajes de remoción de DQO, DBO₅, nitratos, nitritos, fósforo, sólidos totales, sólidos volátiles totales, sólidos disueltos totales, turbidez y conductividad eléctrica. Los resultados de la caracterización permitieron clasificar a los lixiviados en una edad intermedia muy cercana a una edad madura. Con las condiciones utilizadas *P. stratiotes* fue capaz de tolerar una concentración del 15% de lixiviado con base en su índice de color verde e índice de supervivencia después de 21 días. Los resultados de la fitorremediación mostraron una remoción importante de turbidez (63%), DBO₅ (15%), DQO (15%) y nutrientes como fósforo y nitrógeno inorgánico, por encima del 70%. Con base en lo anterior, se concluye que *Pistia stratiotes* posee gran potencial en la eliminación de contaminantes de lixiviados y podría coadyuvar de manera sustentable a los tratamientos convencionales en los vertederos que existen hoy en día en México.

(Palabras claves: *Pistia stratiotes*, fitorremediación, fitotoxicidad, lixiviado, relleno sanitario)

ABSTRACT

The objective of this research was to evaluate the efficiency of pollutant removal through phytoremediation with Pistia (*Pistia stratiotes*) in leachate from a sanitary landfill. Leachate samples were obtained from the “El Guayabo” sanitary landfill, located in Medellín, Veracruz, Mexico; these leachates were characterized physicochemically in three climatic seasons: low water, rainy, and windy. After characterization, tolerance tests of Pistia were carried out at different concentrations of leachate, monitoring environmental conditions, in order to obtain the appropriate concentration of leachate for phytoremediation tests. The phytoremediation tests were carried out for 15 days, determining the removal percentages of COD, BOD₅, nitrates, nitrites, phosphorus, total solids, total volatile solids, total dissolved solids, turbidity, and electrical conductivity. The results of the characterization allowed classifying the leachates in an intermediate age very close to a mature age. With the conditions used, *P. stratiotes* was able to tolerate a 15% concentration of leachate based on its green color index and survival index after 21 days. The results of the phytoremediation showed an important removal of turbidity (63%), BOD₅ (15%), COD (15%), and nutrients such as phosphorus and inorganic nitrogen, above 70%. Based on the above, it is concluded that *Pistia stratiotes* has great potential in the elimination of contaminants from leachates and could contribute in a sustainable way to conventional treatments in landfills that exist today in Mexico.

(Keywords: *Pistia stratiotes*, phytoremediation, phytotoxicity, leachate, landfill)

DEDICATORIA

A Dios, por guiarme en cada momento, porque en cada día de mi vida sé que me acompaña, me protege y me ilumina para tomar el camino más indicado. Por brindarme la oportunidad de tener una familia tan unida y amorosa, gracias a ello lucho por superarme y ser una mejor persona todos los días.

A mis padres **Teresa Vidal Castizo y Virgilio Hernández Sánchez** por siempre estar conmigo y apoyarme en cada peldaño que emprendo para superarme. Siempre han sido mi mayor ejemplo de constancia, esfuerzo, esmero y responsabilidad, son valores que atesoraré con mucho cariño. Gracias por todo su amor, siempre los llevo en mi corazón.

A mi esposo **Irving David Pérez Landa** por ser mi soporte y guía durante todo este camino para obtener un logro profesional más. Gracias por creer en mí y por haberme brindado tu apoyo, tus consejos, tu paciencia y tu amor en todo momento. Tú más que nadie sabe el esfuerzo que hice para lograr esta meta. Tienes mi amor para siempre.

A mis hijos **Elías David y Matías Uriel** porque siempre serán mi mayor motivo para seguir aprendiendo, quiero ser ejemplo para ustedes de que cuando te propones alcanzar una meta, por muy difícil que sea el camino, con dedicación, esfuerzo y empeño lo puedes lograr. Los amo mis niños.

A mis hermanos **María de la Luz Hernández Vidal y Víctor Virgilio Hernández Vidal** y mis sobrinos **Luz Alejandra Meza Hernández y Luis Rene Meza Hernández** por alegrar mi vida en todo momento. Por escucharme, comprenderme y apoyarme en esas largas tardes de estudio. Los quiero mucho.

AGRADECIMIENTOS

Al **Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT)** por el apoyo brindado para realizar este trabajo de investigación y por impulsar a la comunidad estudiantil a desarrollar proyectos que aporten nuevos conocimientos en ciencia y tecnología.

Al **Tecnológico Nacional de México, Instituto Tecnológico de Boca del Río** por abrirme las puertas de su prestigiosa casa de estudios para desarrollar esta Maestría en Ciencias en Ingeniería Ambiental.

A mi directora de tesis la **Dra. Paula Zúñiga Ruiz**, por la paciencia que me brindó durante las asesorías a lo largo de esta investigación, por sus consejos profesionales y por el apoyo en todo momento.

A mi comité tutorial **Dra. Fabiola Lango Reynoso, Dra. Rocío de Guadalupe Bernal Ramírez y al Dr. Jesús Montoya Mendoza**, porque en cada uno de ellos encontré una guía para desarrollar esta investigación, por su apoyo gracias.

Al personal del **Laboratorio de Investigación en Recursos Acuáticos (LIRA)** por las facilidades y capacitaciones brindadas para poder realizar las determinaciones físico-químicas.

ÍNDICE

RESUMEN	i
ABSTRACT.....	ii
DEDICATORIA.....	iii
AGRADECIMIENTOS	iv
ÍNDICE	v
ÍNDICE DE TABLAS	vii
ÍNDICE DE FIGURAS	viii
1. INTRODUCCIÓN.....	1
2. ANTECEDENTES	3
2.1 Residuos sólidos urbanos	3
2.2 Rellenos sanitarios.....	4
2.3 Lixiviados	5
2.4 Tipos de tratamiento para lixiviados.....	9
2.4.1 Tratamientos convencionales	11
2.4.2 Tecnologías alternativas	13
2.5 Fitorremediación con macrófitas acuáticas	16
2.6 Macrófitas acuáticas	17
2.7 <i>Pistia stratiotes</i>	19
2.7.1 Clasificación taxonómica.....	21
2.7.2 Antecedentes de fitorremediación utilizando <i>P. stratiotes</i>	21
3. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	24
4. JUSTIFICACIÓN.....	25
5. PREGUNTA DE INVESTIGACIÓN.....	26
6. HIPÓTESIS	26
7. OBJETIVOS.....	27
7.1 General.....	27
7.2 Específicos.....	27
8. MATERIALES Y MÉTODOS.....	28
8.1 Ubicación de la zona de muestreo	28
8.2 Características del sitio de muestreo	28
8.3 Estrategia de muestreo.....	29

8.4 Análisis fisicoquímicos para caracterización del lixiviado	30
8.4.1 Turbidez	30
8.4.2 Demanda Bioquímica de Oxígeno	31
8.4.3 Demanda Química de Oxígeno	32
8.4.4 Fósforo total	32
8.4.5 Nitratos	33
8.4.6 Nitritos	33
8.4.7 Sólidos totales	35
8.4.8 Sólidos Volátiles Totales	35
8.4.9 pH, temperatura, conductividad eléctrica y sólidos disueltos totales	36
8.4 Recolección, preparación y adaptación de <i>Pistia stratiotes</i>	37
8.5 Tolerancia de <i>P. stratiotes</i> a diferentes diluciones de lixiviado	37
8.6 Pruebas de fitorremediación	40
8.7 Análisis estadístico	41
9. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	42
9.1 Caracterización del lixiviado	42
9.2 Pruebas de tolerancia de <i>P. stratiotes</i> a lixiviados	45
9.3 Pruebas de fitorremediación	48
10. CONCLUSIONES	53
11. LITERATURA CITADA	54
ANEXOS	67

ÍNDICE DE TABLAS

	Página
Tabla 1. Características de los lixiviados a diferentes edades del relleno sanitario.....	7
Tabla 2. Ventajas y desventajas de la fitorremediación.....	16
Tabla 3. Resultados de la caracterización de lixiviado de relleno sanitario en tres temporadas (estiaje, lluvias y norte)	42
Tabla 4. Comparación de características fisicoquímicas de lixiviados en diferentes reportes científicos	44
Tabla 5. Índice de supervivencia de <i>P. stratiotes</i> en función de las concentraciones de lixiviado al inicio y final del experimento.....	48
Tabla 6. Remoción de contaminantes en lixiviados de relleno sanitario utilizando <i>P. stratiotes</i>	49
Tabla 7. Comparación del presente trabajo con otras investigaciones sobre fitorremediación de lixiviados con <i>P. stratiotes</i>	52

ÍNDICE DE FIGURAS

	Página
Figura 1. Esquema estructural de un relleno sanitario	5
Figura 2. Fases de degradación de los residuos	8
Figura 3. Tipos de tratamientos o tecnologías aplicadas a los lixiviados	11
Figura 4. Tipos de macrófitas: Flotantes libres; b) flotantes enraizadas; c) sumergidas; d) emergentes	18
Figura 5. Tipos de contaminantes que pueden eliminar las plantas acuáticas	18
Figura 6. <i>P. stratiotes</i>	19
Figura 7. Distribución de <i>P. stratiotes</i> en el Estado de Veracruz	20
Figura 8. Mapa de localización	28
Figura 9. Localización del Relleno Sanitario “El Guayabo”	29
Figura 10. Recolección de muestras de lixiviados	30
Figura 11. Medición de turbidez	31
Figura 12. Análisis de Demanda Bioquímica de Oxígeno	31
Figura 13. Análisis de Demanda Química de Oxígeno	32
Figura 14. Determinación de Fósforo Total	33
Figura 15. Determinación de Nitratos por método de brucina	34
Figura 16. Determinación de Nitritos	35
Figura 17. Determinación de sólidos	36
Figura 18. Medición de pH, temperatura, conductividad y solidos suspendidos totales <i>in situ</i>	36
Figura 19. Recolección de <i>P. stratiotes</i>	37
Figura 20. Pruebas preliminares para determinación de tolerancia	38
Figura 21. Pruebas definitivas para determinación de tolerancia	39
Figura 22. Pruebas de fitorremediación	40
Figura 23. Resultados del monitoreo de condiciones ambientales	45
Figura 24. Evolución de los tratamientos durante las pruebas de tolerancia	46
Figura A1. Curva de calibración para determinación de DQO	67
Figura A2. Curva de calibración para determinación de Nitratos	67
Figura A3. Curva de calibración para determinación de Nitritos	68
Figura A4. Curva de calibración para determinación de Fósforo	68

1. INTRODUCCIÓN

Actualmente, las afectaciones al medio ambiente son motivo de preocupación de la humanidad debido a los impactos directos que estas ejercen sobre su salud y calidad de vida, generados en múltiples ocasiones por las diversas actividades antropogénicas desarrolladas a lo largo de los años. Entre varios de esos impactos, tenemos el de los residuos sólidos urbanos (RSU), tomando en cuenta que los niveles actuales de generación a escala global rondan en promedio de 7 a 10 mil millones de toneladas al año (SEMARNAT 2018).

Cada año, producimos al menos 10 por ciento más residuos que el anterior. En el caso de México, para el año 2012 se estimaba una generación de 42.1 millones de toneladas, lo que equivale a una producción diaria que rebasa las 115 mil toneladas. La generación per cápita diaria creció de 300 gramos en 1950, a 990 gramos en 2012, es decir, cada mexicano arroja 361 kilogramos de basura al año. A esta acelerada y gigantesca producción de residuos han contribuido el aumento poblacional, su creciente urbanización (actualmente más de la mitad de la población mundial vive en ciudades), el desarrollo industrial, los cambios tecnológicos y la modificación en los patrones de consumo de la población (SEMARNAT 2015). Por lo tanto, un caso particular a tratar es el de la disposición y tratamiento de dichos residuos.

En México, en comparación con otros países uno de los procedimientos más utilizados y aceptados para la disposición final de los RSU es su depósito en los rellenos sanitarios. Sin embargo, no siempre puede accederse a confinamientos de este tipo por ser insuficientes los que hay en el país frente al volumen de residuos que produce una población calculada en 118 millones de habitantes (SEMARNAT 2019).

Tan solo en 2012, en el registro de volumen de RSU producidos por entidad federativa, cinco estados concentraron el 45.7% del total nacional: el Estado de México (6.7 millones de t; 16.1% del total nacional), el Distrito Federal (4.9 millones de t; 11.8%), Jalisco (3.1 millones de t; 7.2%), Veracruz (2.3 millones de t; 5.5%) y Nuevo León (2.2 millones de t; 5.1%) (SEMARNAT 2016). Desde la perspectiva ambiental y de salud pública, la disposición de residuos tiene una relevancia fundamental. Cuando no se recolectan pueden permanecer en los sitios de generación o diseminarse, con efectos negativos. Desafortunadamente este tipo de prácticas se ha extendido en todo el territorio nacional y aparecen por doquier los tiraderos a cielo abierto (TCA).

En nuestro país el 87% de los tiraderos de basura son a cielo abierto y sólo 13% son rellenos

sanitarios, según datos del Instituto Nacional de Geografía e Informática (SEMARNAT 2019). Todas las entidades federativas, a excepción del Distrito Federal (ahora Cd. de México), cuentan con rellenos sanitarios para disponer sus residuos; siendo de los estados con un mayor número el Estado de México (28), Jalisco (27), San Luis Potosí (26), y Veracruz (18) (SEMARNAT 2016), ubicados en este último en municipios como Poza Rica, San Rafael, Veracruz, Xalapa, Nogales y Medellín, por mencionar algunos. Si bien es cierto que un relleno sanitario es una de las técnicas más aceptadas y viables para el depósito final de los RSU, debemos considerar que durante su operación se generan impactos ambientales a los cuales hay que prestarles especial atención. Entre estos impactos tenemos la generación de biogás y lixiviados, los cuales deben tener un adecuado control y tratamiento, de lo contrario pueden causar efectos nocivos, tanto al ambiente como a los seres humanos.

El presente trabajo de investigación está enfocado en los lixiviados, a los cuales, dadas las características contaminantes que poseen y a los efectos dañinos que pueden ocasionar, es necesario darles un adecuado tratamiento, sin embargo, muchos de los tratamientos involucran infraestructura y procesos complicados además de ser costosos, por lo cual, esta investigación se enfoca en utilizar la fitorremediación como una alternativa eficiente y económicamente viable. Aunado a lo anterior, al utilizar una planta considerada como invasora para algunos cuerpos de agua, como la especie que hemos estudiado en el presente trabajo (*Pistia stratiotes*), se estaría dando una solución atractiva a ambas problemáticas.

2. ANTECEDENTES

2.1 Residuos sólidos urbanos

Los residuos sólidos urbanos (RSU) constituyen uno de los tipos de residuos generados por actividades antropogénicas en mayor escala a nivel nacional, considerando que algunos aspectos relevantes como la modernización, avance tecnológico y aumento de la población mundial ha creado un aumento de la demanda de alimentos y otros productos básicos, lo cual provoca un aumento en la cantidad de residuos que se generan diariamente en cada hogar (Alam and Ahmade 2013).

Este tipo de residuos son definidos de acuerdo a lo que se establece en la Ley General para la Prevención y Gestión Integral de los Residuos (LGPGIR), como los generados en las casas habitación, que resultan de la eliminación de los materiales que utilizan en sus actividades domésticas (PROFEPA 2015), así como desechos sólidos no peligrosos de establecimientos industriales, comerciales e institucionales (Ogwueleka 2009).

En cuanto a su composición, los RSU se han modificado a un nivel considerable en a lo largo de los años en el país. Generalmente la composición está relacionada con los patrones de consumo de la población: países con bajos ingresos producen menor cantidad de residuos, predominando los de características orgánica, mientras que, en los países con altos ingresos, en su mayoría los residuos son inorgánicos a partir de productos manufacturados y con un porcentaje mayor de productos y desechos (SEMARNAT 2008).

Los residuos que se depositan en los rellenos sanitarios son de diversas características, aunque los rellenos sanitarios están diseñados para la disposición final de residuos domiciliarios y en algunos casos de manejo especial, en la realidad se depositan residuos de diferentes clasificaciones. Sin embargo, los rellenos sanitarios en ocasiones reciben mezclas de residuos con características domiciliarias, comerciales, industriales e incluso peligrosas o tóxicas, a pesar de que en la normativa ambiental regulatoria no está permitido recibir este último tipo de residuos. Esta mezcla nos conduce a un manejo inadecuado de los residuos que no solo aumenta la contaminación del medio ambiente, sino que también amenaza la salud humana a través de sus procesos de recolección, transferencia y disposición (Xiao et al. 2007).

2.2 Rellenos sanitarios

La disposición final de los residuos se refiere al depósito o confinamiento permanente de estos en sitios que permitan controlar su presencia en el ambiente, para evitar las posibles afectaciones a la salud de la población y a los ecosistemas. Por ello, se ha optado por los rellenos sanitarios, que siguen siendo el método mayormente utilizado (Sumathi et al. 2008), y ambientalmente aceptable para prevenir la contaminación (Owusu-Nimo et al. 2019). Además que, para la mayoría de los países es la alternativa de eliminación más común (Kjeldsen et al. 2002) y la medida más sencilla y económica por la descomposición natural de los residuos (Alam and Ahmade 2013). Es por lo anterior que, los rellenos sanitarios permanecen y seguirán siendo una parte integral de la mayoría de los planes de manejo de residuos sólidos (Al-Jarrah and Abu-Qdais 2006).

La NOM-083 (SEMARNAT 2004) define a un relleno sanitario como una obra de infraestructura que involucra técnicas de ingeniería para la disposición final de los residuos sólidos urbanos y de manejo especial, con la finalidad de controlar los impactos ambientales, para ello deben de cumplir con la compactación y cobertura diaria de los residuos, y con una adecuada infraestructura para el control del biogás y los lixiviados. Es por esto, que el depósito de residuos sólidos ha sido el método preferido para la eliminación de residuos sólidos debido a viabilidad técnica, facilidad de operación, supervisiones mínimas y bajo gasto operativo (Kamaruddin et al. 2015).

Por lo tanto, el relleno sanitario debe de cumplir con los requisitos establecidos por la normatividad para tener un estricto control de la disposición de los residuos y de los impactos ambientales que estos puedan producir, como es el caso de los lixiviados y el biogás que se generan, ambos por el proceso de descomposición de tales residuos. Es de gran relevancia que se cuente con los sistemas adecuados para el control de dichos impactos y que estos garanticen que no se provoque la contaminación de suelo, agua, aire y biota; que pueda a su vez afectar la salud humana.

En el país se cuenta con dos tipos de sitios de disposición final: los rellenos sanitarios y los rellenos sanitarios de tierra controlados. Los rellenos sanitarios constituyen una de las mejores soluciones para la disposición final de los residuos sólidos urbanos; este tipo de infraestructura involucra métodos y obras de ingeniería particulares que controlan básicamente la fuga de lixiviados y la generación de biogases. Por su parte los rellenos controlados de tierras, aunque comparten las especificaciones de los rellenos sanitarios en cuanto a infraestructura y operación,

no cumplen con las especificaciones de impermeabilización para el control de lixiviados (SEMARNAT 2008).

El proceso operativo que se realiza en un relleno sanitario para la disposición final de los residuos se puede observar en la Figura 1, e inicia con el traslado de los residuos domiciliarios en camiones recolectores hacia el sitio donde se encuentra establecido el relleno, una vez en el sitio deben ser pesados para registrar los datos en una bitácora, posteriormente son llevados a un espacio para su disposición denominado celda, esta celda debe contar con un sistema de captación, conducción y extracción de lixiviados y un sistema de extracción, captación, conducción y control de biogás; después de que se depositan los residuos, estos se esparcen y compactan para finalmente colocar una cobertura diaria.

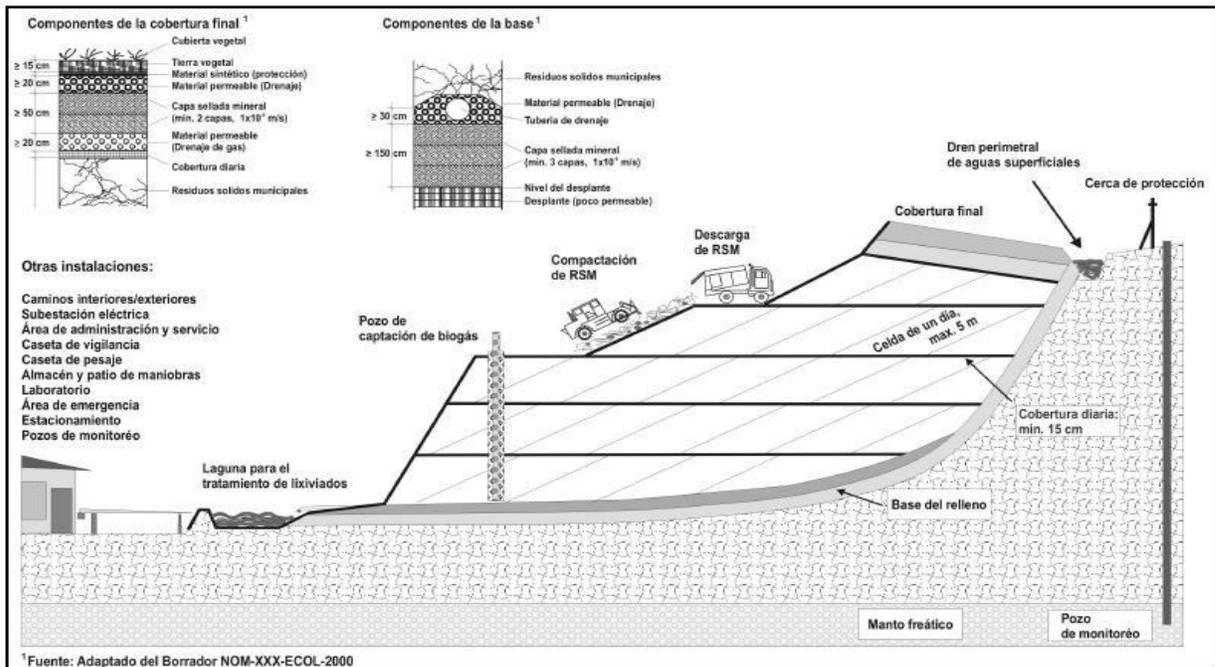


Figura 1. Esquema estructural de un relleno sanitario. Fuente: (Van Afferden et al. 2002)

2.3 Lixiviados

Las emisiones de lixiviados de los Rellenos sanitarios son una preocupación creciente, debido a su impacto tóxico y a su potencial de generarse durante muchos años después del cierre del sitio. (Jones, Williamson, and Owen 2006), de igual manera a las cantidades que se estima se producen por tonelada de desechos sólidos, lo cual asciende a un volumen de 0.2 m³ de lixiviado

(Kurniawan et al. 2010).

El lixiviado generalmente es un líquido de color oscuro, con un olor fuerte, que lleva una alta carga orgánica e inorgánica (Peng 2017), es un efluente acuoso generado como consecuencia de la filtración del agua de lluvia, la humedad de la basura y las reacciones químicas y biológicas ocurridas dentro de las celdas (Torres Lozada et al. 2014; Renou et al. 2008). Por otra parte, la cantidad de lixiviado generado está directamente relacionado con factores como precipitación, evapotranspiración, escorrentía superficial, infiltración y grado de compactación de los residuos (Costa et al. 2019).

Las características del lixiviado de un relleno sanitario generalmente pueden ser representadas por los parámetros básicos DQO, DBO, la relación DBO/DQO, pH, sólidos en suspensión (SS), nitrógeno amónico ($\text{NH}_3\text{-N}$), nitrógeno Kjeldahl total (TKN) y metales pesados (Renou et al. 2008). Sin embargo, los lixiviados se componen de una gran cantidad de contaminantes orgánicos e inorgánicos, que pueden ser clasificados en cuatro grupos: I) materia orgánica disuelta (DQO, COT, AGV, ácidos húmicos y fúlvicos); II) macrocomponentes inorgánicos (Ca, Mg, Na, K, NH_4^+ , Fe, Mn, Cl, SO_4 , HCO_3^-); III) metales pesados (Cd, Cr, Cu, Pb, Ni, Zn) y IV) compuestos xenobióticos (hidrocarburos aromáticos, fenoles, alifáticos clorados, pesticidas y plastificantes). Otros compuestos pueden estar presentes en los lixiviados (boratos, sulfuros, arsenato, selenato, Ba, Li, Hg, Co), pero en concentraciones muy bajas (Torres Lozada et al. 2014). Los lixiviados de rellenos sanitarios son considerados en la normatividad mexicana como residuos peligrosos (NOM-052-SEMARNAT-2005), por lo que es necesario realizar su caracterización para conocer el potencial contaminante en cada sitio de disposición (Robles-Martínez et al. 2011).

Se concluye que los lixiviados contienen toda característica contaminante principal, es decir, alto contenido de materia orgánica, alto contenido de nitrógeno y fósforo, presencia abundante de patógenos e igualmente de sustancias tóxicas como metales pesados y constituyentes orgánicos. Estas características son importantes pues nos indican qué es lo que toca removerle a los lixiviados durante su tratamiento (Giraldo 2014).

Existen numerosas caracterizaciones de los lixiviados en donde se hace énfasis en su alto poder contaminante; sin embargo, debemos considerar que su composición puede variar en función de la antigüedad del relleno sanitario (Kulikowska et al. 2008), y por ende, en la composición y la etapa de degradación de los RSU, así como en la técnica o tipo del relleno que se emplee.

Cada lixiviado generado en los distintos rellenos sanitarios que existan va a poseer una composición diferente, sin embargo, existen algunas clasificaciones considerando las variables fisicoquímicas presentes de acuerdo con el tiempo de operación del relleno sanitario y, particularmente, de la celda del relleno de la cual provengan (Torres Lozada et al. 2014). Pero principalmente, los parámetros de los lixiviados varían dependiendo de la edad del relleno (Kamaruddin et al. 2015), por lo tanto se han definido tres tipos de lixiviados según la edad del relleno (Renou et al. 2008) se clasifican como jóvenes, intermedio y viejo o estabilizado (Tabla 1).

Tabla 1. Características de los lixiviados a diferentes edades del relleno sanitario.

Parámetro	Joven	Intermedio	Viejo
<i>Edad (años)</i>	< 5	5 – 10	> 10
<i>pH</i>	6.5	6.5 – 7.5	> 7.5
<i>DQO (mg/l)</i>	> 10 000	4 000 – 10 000	< 4 000
<i>DBO₅/DQO</i>	> 0.3	0.1 – 0.3	< 0.1
<i>Compuestos orgánicos</i>	80% Ácidos Grasos Volátiles (AGV)	5 – 30% AGV + ácidos húmico y fúlvico	Ácidos húmico y fúlvico
<i>Metales pesados</i>	Bajo-medio	Bajo	Bajo
<i>Biodegradabilidad</i>	Importante	Media	Baja

Fuente: (Bhalla et al. 2013)

Es así como la composición del lixiviado cambia con el tiempo a medida que la degradación de los residuos se desarrolla dentro del relleno sanitario. La degradación de los residuos dentro de los rellenos sanitarios, se ha establecido que se desarrolla principalmente en las siguientes fases: fase aeróbica inicial, fase ácida anaeróbica, fase metanogénica inicial, y fase metanogénica estable (Kjeldsen et al. 2002).

Desde el inicio de la operación del relleno sanitario, justamente al depositarse los residuos al interior de la celda, surgen una serie de reacciones físicas, químicas y biológicas, las cuales se llevan a cabo por fases y son características dependiendo del tiempo en que los residuos se encuentren sometidos a los procesos de degradación. Es importante mencionar que cada una de las fases se caracteriza por el aumento o disminución de poblaciones bacterianas específicas

y la formación y utilización de ciertos productos metabólicos (Ver Figura 2) (Demirbas 2011).

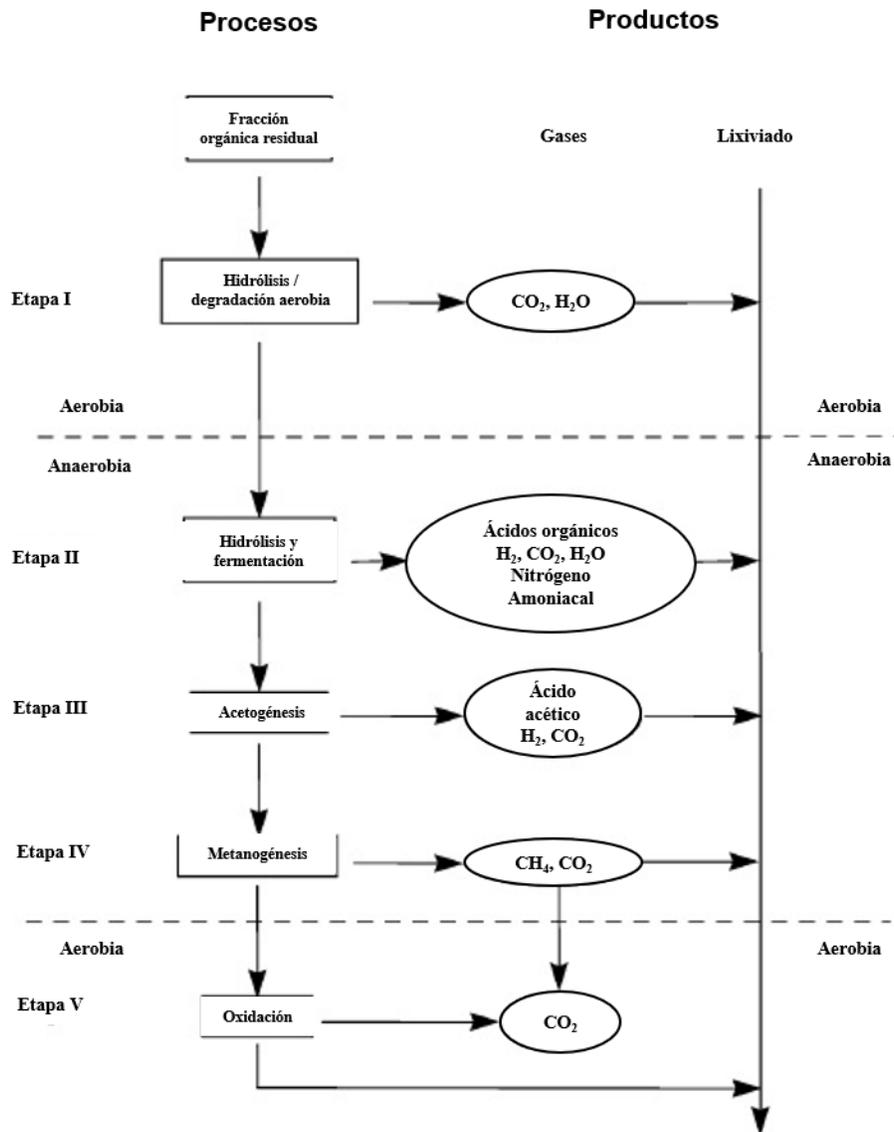


Figura 2. Fases de degradación de los residuos. Fuente: (Environmental Protection Agency 2000)

Estos procesos se desarrollan e inician con la fase aeróbica, la cual se caracteriza por la descomposición microbiana en presencia de oxígeno. Generalmente esta fase se da en un periodo de tiempo corto; en la fase ácida anaeróbica la actividad microbiana aumenta considerablemente y conduce a generar cantidades considerables de ácidos orgánicos (ácido acético y bajas concentraciones de ácido fúlvico y otros ácidos orgánicos complejos) y cantidades

menores de gas hidrógeno, lo que genera valores de pH ácidos. La duración de esta fase se da en un periodo de tres meses a tres años. Para la fase metanogénica inicial se comienza con la conversión de ácido acético y gas hidrógeno en metano y dióxido de carbono por la acción de los metanógenos, provocando que la cantidad de ácidos se reduzca significativamente, y causando que el pH llegue a valores neutrales. Finalmente, para la fase metanogénica estable, la generación de gas disminuye, la cantidad de materia orgánica biodegradable disponible se agota y solo quedan compuestos recalcitrantes muy difíciles de biodegradar (Ghosh et al. 2010).

Generalmente, en los rellenos sanitarios más jóvenes, el lixiviado producido durante su fase inicial se caracteriza por la presencia de abundantes cantidades de ácidos volátiles, un pH ácido, altas concentraciones de materia orgánica, como resultado de la fase ácida de la fermentación. En vertederos maduros, se observa una baja producción de metano, el pH del lixiviado es neutral, la materia orgánica está presente como húmica y fracciones fúlvicas (Kulikowska et al. 2008; Costa et al. 2019).

2.4 Tipos de tratamiento para lixiviados

Debido a las características fisicoquímicas y de concentración de compuestos contaminantes que poseen los lixiviados es imprescindible que los rellenos sanitarios cuenten con sistemas de tratamiento. De acuerdo a la normatividad ambiental para el país, los sitios de disposición final de residuos deben construir un sistema de captación, conducción y extracción del lixiviado en las celdas, es a partir de este punto que los responsables de estos sitios deben de implementar algún método o tecnología que les permita que este lixiviado captado sea sometido a algún tipo de tratamiento, optando por algunas menos complejas como la recirculación a las celdas o la evaporación hasta algunas más complejas como los tratamientos biológicos o químicos, o bien ser tratados con una combinación de ambas, con la finalidad de garantizar que no exista presencia de lixiviado fuera del sitio de disposición final ni fuera de la celda de operación.

Establecer el sistema de tratamiento más adecuado para un lixiviado es complejo, ya que se trata de residuos líquidos con gran contenido de elementos, tanto orgánicos como inorgánicos. Existen múltiples investigaciones que se han desarrollado en la búsqueda de los tratamientos más adecuados para los lixiviados; sin embargo, debido a la variabilidad en su composición y a las características particulares de cada lixiviado y del relleno que lo produce, no se pueden transferir las técnicas y los resultados obtenidos con tratamientos de un lixiviado a otro, sin antes analizar

esas particularidades (Kurniawan et al. 2010). Por lo tanto, cada lixiviado procedente de un relleno sanitario debe ser examinado individualmente y sujeto a pruebas de tratabilidad para encontrar el sistema de tratamiento más idóneo para su manejo (Novelo et al. 2009).

En la actualidad existen diferentes alternativas para el tratamiento de los lixiviados, las cuales pueden tener tanto ventajas como desventajas. Estas se relacionan con el tipo de tecnología que se emplee, pues algunas necesitan que el lixiviado cumpla con ciertas condiciones para poder ser tratado; otras que están relacionadas con el espacio disponible, la infraestructura, el equipo y la complejidad, entre otras.

Hay que considerar dentro del tipo de tecnología a emplear, que los lixiviados pueden estar compuestos por una amplia gama de contaminantes, por lo que siempre es necesario realizar una caracterización para conocer su potencial tóxico, pues constituyen un factor de riesgo sanitario, ya que pueden contaminar suelos, aguas superficiales y/o subterráneas (Robles-Martínez et al. 2011); además, dicha caracterización es útil para elegir algún tratamiento adecuado que conlleve a disminuir sus impactos negativos.

Para Renou y colaboradores la estrategia para establecer el tipo de tratamiento adecuado depende de ciertos criterios como la calidad inicial del lixiviado, de acuerdo con características claves como DQO, relación DBO/DQO y edad del relleno (Renou et al. 2008). Es importante mencionar que los tratamientos aplicados al tratamiento de aguas residuales han sido probados también para el tratamiento de los lixiviados, por lo tanto, es importante hacer una breve descripción de las principales tecnologías que existen (Giraldo 2001).

Existen tratamientos con tecnologías convencionales y alternativas (Figura 3). Los tratamientos que emplean tecnologías convencionales se pueden clasificar en tres grupos: biológicos, físico químicos y los integrados (físicos, químicos y biológicos) (Wiszniewski et al. 2006) y como tecnologías alternativas tenemos los sistemas naturales, evaporación y recirculación.

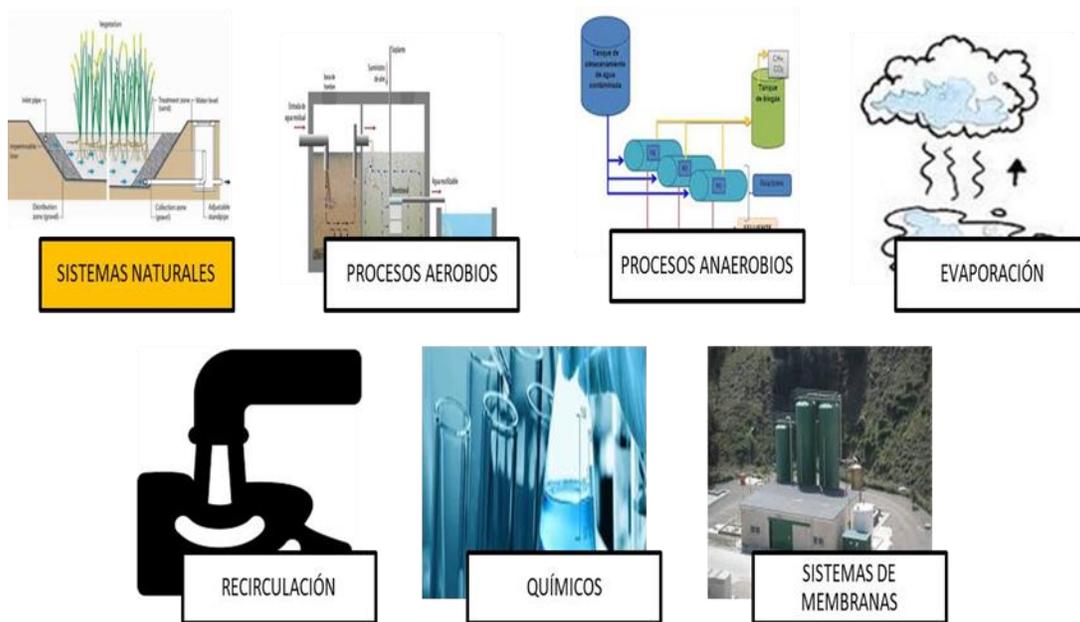


Figura 3. Tipos de tratamientos o tecnologías aplicadas a los lixiviados.

2.4.1 Tratamientos convencionales

2.4.1.1 Tratamientos biológicos

Este tipo de tecnologías han sido las más comúnmente empleadas en todo el mundo para el tratamiento de los lixiviados (Dahlan 2019). Pero por los mismos procesos que involucran han sido sugeridos para lixiviados jóvenes, que generalmente presentan altas concentraciones de ácidos grasos volátiles (AGV) y cuya relación de la demanda bioquímica de oxígeno (DBO_5/DQO) es mayor a 0.4, lo cual indica alta biodegradabilidad. De acuerdo a las características del lixiviado y de las necesidades del operador se opta por un tratamiento biológico aerobio o anaerobio (Giraldo 2014). Básicamente estos procesos consisten en controlar el entorno requerido para un óptimo crecimiento de los microorganismos implicados (Wiszniewski et al. 2006).

Tratamiento aerobio: este tipo de tratamiento consiste en la depuración de los compuestos orgánicos presentes en el lixiviado por microorganismos en presencia de oxígeno y agitación, para evitar condiciones de anaerobiosis dentro de los tanques de depuración. Estos sistemas requieren de ciertas condiciones estables de funcionamiento, carga orgánica, concentración de nutrientes, de pH, etc. Se puede llegar a aplicar un tratamiento aerobio mediante el uso de lagunas aireadas, sistemas de lodos activados, contactores biológicos (biodiscos), filtros percoladores, etc. (Dahlan 2019).

Tratamiento anaerobio: este proceso involucra la descomposición biológica de materia orgánica e inorgánica en ausencia de oxígeno molecular (Wiszniewski et al. 2006), utilizando una población bacteriana, lo cual ayuda a generar menor volumen de lodos.

Para la aplicación de este tratamiento, se deben tomar en consideración durante la operación, los altos contenidos de amoníaco, emplear cargas de trabajo reducidas dado las limitaciones en la actividad microbiana por toxicidad y la acumulación de material inorgánico precipitado dentro de los reactores que limitan el volumen de este, limitan la actividad de los lodos y taponan los sistemas de conducción de los reactores, lo cual genera un colapso del sistema de tratamiento (Martinez-López et al. 2014).

2.4.1.2 Tratamiento fisicoquímico

Estos tipos de tratamiento son aplicados generalmente en lixiviados viejos, en los cuales el índice de biodegradabilidad (DBO_5/DQO) es bajo, pero este tipo de tratamientos tienen el inconveniente del costo de reactivos químicos y generación de lodos de difícil disposición (Novelo et al. 2009). Los tratamientos fisicoquímicos más empleados son coagulación-floculación, flotación, adsorción y oxidación Fenton. Consisten en la eliminación de las partículas suspendidas y disueltas del líquido por la acción de sustancias denominadas coagulantes (sales metálicas y/o polielectrolitos) (Méndez et al. 2004).

Procesos de oxidación avanzada (POA)

Los POA se han propuesto como una alternativa eficaz para la mineralización de orgánicos recalcitrantes en los lixiviados (Wiszniewski et al. 2006) son procesos fisicoquímicos que involucran la generación y uso de especies transitorias altamente reactivas, principalmente el radical hidroxilo (HO^{\bullet}) que poseen alta efectividad para la oxidación de la materia orgánica. Este radical puede ser generado por los medios fotoquímicos (incluida la luz solar) o por otras formas de energía, suministrando un incremento en la velocidad de reacción en el tratamiento del agua contaminada (Martinez-López et al. 2014). Generalmente, para estos procesos de oxidación se utilizan sustancias químicas, principalmente cloro, ozono, permanganato de potasio e hidróxido de calcio (Kamaruddin et al. 2015).

Los POA se pueden dividir en métodos no fotoquímicos generan radicales libres sin energía luminosa como: la Ozonización (O_3) a pH elevado (> 8.5), Ozono + peróxido de hidrógeno ($O_3 /$

H₂O₂), Ozono + catalizador (O₃ / catalizador), Proceso Fenton (H₂O₂ / Fe²⁺) y los Métodos fotoquímicos, que generan radicales libres mediante luz artificial y natural como: O₃ / UV, H₂O₂ / UV, O₃ / H₂O₂ / UV , Foto-Fenton y Fotocatálisis (UV / TiO₂) (Wiszniewski et al. 2006).

Sistemas de membranas

Los procesos de membrana tratan de separar dos soluciones con diferentes concentraciones mediante una membrana semipermeable. En este proceso, se agrega presión a la solución más concentrada, lo que obliga al agua a fluir de la concentración más alta a la concentración más baja (Wiszniewski et al. 2006). Es decir, que crea una fina barrera capaz de resistir selectivamente el movimiento de diferentes constituyentes de un fluido, afectando su separación (Gao et al. 2014). Se pueden encontrar aplicaciones como la microfiltración, ultrafiltración, nanofiltración, osmosis inversa, osmosis directa e inclusive la pervaporación, bien sea de manera directa o acoplada a otro tipo de proceso de tratamiento (Martinez-López et al. 2014).

2.4.2 Tecnologías alternativas

2.4.2.1 Evaporación

En este sistema de tratamiento el lixiviado se evapora por calentamiento, generalmente utilizando energía térmica del gas producido por relleno sanitario (Ranzi et al. 2009). Esta tecnología, implica el aprovechamiento del biogás que genera el relleno para generar energía eléctrica, además de utilizarlo para el tratamiento del lixiviado y a diferencia de las que existen, esta ayuda a darle solución a dos problemas recurrentes generados por los rellenos sanitarios, la emisión de biogás y lixiviados (Martinez-López et al. 2014).

2.4.2.2 Recirculación

Se le conoce como la tecnología del rellenado del biorreactor, la cual consiste en simular que el relleno sanitario es como un gran reactor anaerobio de tal manera que dentro del mismo relleno se logre la conversión a metano de los ácidos grasos presente en el lixiviado (Giraldo 2014). Esto genera el aumento del contenido de humedad, lo que a su vez incrementa la tasa de degradación biológica en los residuos, la estabilidad biológica y la tasa de recuperación del metano producido en el relleno (Martinez-López et al. 2014).

2.4.2.3 Sistemas naturales

Los sistemas naturales implican el uso de plantas en dos tipos de elementos como el agua y el suelo (Pazoki et al. 2014). Estos sistemas pueden ser lagunas, humedales artificiales, sistemas de infiltración (Arias and Brix 2003), los cuales son tecnologías que emplean eventos que ocurren naturalmente en el ambiente y por lo tanto resultan ambientalmente favorables. Entre las ventajas que ofrecen estas tecnologías esta la simplicidad en su operación, y la posibilidad de lograr diferentes niveles de tratamiento, desde un pretratamiento hasta un tratamiento terciario en caso de necesitarse (Giraldo 2014). La combinación de las lagunas y los humedales pueden manejar adecuadamente muchos de los problemas que en otras tecnologías aparecen como son la acumulación de precipitados, la formación de espumas, la toxicidad a los microorganismos y las variaciones en cargas hidráulicas y orgánicas (Martinez-López et al. 2014).

Fitorremediación

Las tecnologías tratamiento de lixiviados fisicoquímicos y biológicos requieren presupuesto continuo y suministro de energía y capacidades técnicas suficientes para el operación y mantenimiento de los equipos, por lo tanto, se requieren tecnologías estratégicas de tratamiento de lixiviados que sean sostenibles con viabilidad económica y técnica (Prasanna et al. 2017).

La fitorremediación se puede considerar incluida en los sistemas de tratamiento naturales que está tomando más interés actualmente, al encontrarse entre las soluciones más atractivas y amigables con el medio ambiente, por ser tratamiento que imitan los fenómenos que suceden espontáneamente en la naturaleza (Arias et al. 2003).

Desde finales del siglo XX, diversas tecnologías han sido desarrolladas con el fin de mitigar el riesgo de contaminación con metales pesados o para sanear las aguas y suelos contaminados. Muchas de estas son costosas y de moderada eficacia, a la vez que exigen prolongados periodos de desarrollo e investigación, por lo que se ha trabajado intensamente en la búsqueda de alternativas nuevas y mejoradas que sustituyan a las estrategias de saneamiento. En este sentido, resalta la fitorremediación como una técnica económica y con gran potencial en el saneamiento y recuperación de distintas matrices. Por lo tanto, el aumento de los costos y la limitada eficacia de los tratamientos fisicoquímicos han estimulado el desarrollo de nuevas tecnologías (Marrero-Coto et al. 2012).

La fitorremediación es un conjunto de tecnologías que reducen *in situ* o *ex situ* la concentración de diversos contaminantes a partir de procesos bioquímicos realizados por las plantas y microorganismos asociados a ellas (Delgadillo-López et al. 2011). Esta tecnología emergente emplea plantas y microorganismos para eliminar, transformar, degradar e inactivar contaminantes potencialmente tóxicos en los lixiviados (Kalčíková et al. 2012).

Así es que, las plantas poseen una eficiente capacidad de remoción y de tratamiento de una amplia variedad de contaminantes como metales, pesticidas, solventes clorados, petróleo crudo, hidrocarburos aromáticos policíclicos, bifenilos policlorados, lixiviados de rellenos sanitarios, municiones y radionúclidos (Dhir 2013).

Sus orígenes datan del siglo XVIII. Joseph Priestley, Karl Scheele y Antoine Lavoisier demostraron que, en presencia de luz, las plantas son capaces de descontaminar la atmósfera. Para 1885, el botánico alemán Baumann, encontró altas concentraciones de zinc en las hojas de algunas plantas que crecían en lugares conteniendo cantidades elevadas de este metal. (Barceló and Poschenrieder 2003) Sin embargo, no fue hasta los años 70 que se reconoció la habilidad de las plantas de limpiar aguas y suelos contaminados. Así, en los años 90 surgió el concepto de fitorremediación (León-Romero 2017).

Tabla 2. Ventajas y desventajas de la fitorremediación.

Ventajas	Desventajas
Las plantas pueden ser utilizadas como bombas extractoras para depurar suelos y aguas contaminadas.	El proceso se limita a la profundidad de penetración de las raíces o a aguas poco profundas.
La fitorremediación es método apropiado para descontaminar superficies grandes o para finalizar la descontaminación de áreas restringidas en plazos largos.	La fitotoxicidad es un limitante en áreas fuertemente contaminadas. Riesgo para la cadena alimenticia, si se eligen especies utilizadas como fuente de alimento.
La fitorremediación es una metodología con buena aceptación pública.	Los tiempos del proceso pueden ser muy prolongados.
La fitorremediación genera menos residuos secundarios.	Se requiere comprender mejor la naturaleza de los productos de degradación (fitodegradación).
Las plantas emplean energía solar. El tratamiento es <i>in situ</i> .	No todas las plantas son resistentes para crecer en presencia de contaminantes.

Fuente: (Velásquez 2017).

Existen métodos diferentes por medio de los cuales las plantas conducen a la degradación eliminación (por acumulación o disipación) o inmovilización de los contaminantes (Dhir 2013):

- 1) Degradación (destrucción y alteración de los contaminantes orgánicos) por medio de la rizodegradación y fitodegradación.
- 2) Acumulación (eliminación de contaminantes orgánicos y/o metálicos) por medio de la fitoextracción y rizofiltración.
- 3) Disipación (eliminación de contaminantes orgánicos y/o inorgánicos a la atmosfera) por medio de la fitovolatilización.
- 4) Inmovilización (Contención de contaminantes orgánicos y/o inorgánicos) por medio de la fitoestabilización.

2.5 Fitorremediación con macrófitas acuáticas

Son distintas las plantas que se utilizan para la fitorremediación dependiendo de la matriz a la que se le necesita remover los contaminantes, para el caso de efluentes líquidos se ha optado por emplear plantas vasculares acuáticas, las cuales han sido consideradas una plaga en sistemas enriquecidos con nutrientes. Su rápido crecimiento puede dificultar las actividades acuáticas y amenazar el equilibrio de la biota en los ecosistemas acuáticos. Actualmente se considera que estas plantas manejadas adecuadamente pueden volverse útiles, debido a su capacidad para remover y acumular diversos tipos de contaminantes. Una ventaja más de esta tecnología que emplea este tipo de plantas, es que la biomasa generada puede ser aprovechada como fuente de energía, forraje y fibra (Núñez López et al. 2018).

Debido a la habilidad que tiene las macrófitas acuáticas para asimilar hasta cierto punto, todos los constituyentes del agua considerados como contaminantes, estas se han empleado en la detección y remoción de sustancias en efluentes de aguas residuales domésticas e industriales. Han demostrado ser eficientes en la remoción de una amplia gama de nutrientes, materia orgánica, sustancias tóxicas y metales pesados (Martelo and Borrero 2012; Celis Hidalgo, Junod Montano, and Sandoval Estrada 2005).

La elección de la macrófita a ser usada es un punto importante en el diseño de los sistemas de tratamiento, porque además de participar en la remoción de contaminantes, deben sobrevivir a los efectos tóxicos del efluente y su alta variabilidad. (Sánchez et al. 2013). Como ejemplos de

éxito podemos mencionar a las especies *Eichhornia crassipes* y *Pistia stratiotes*, mismas que son macrófitas con capacidad de bioretención, las cuales han sido empleadas en sistemas de purificación biológica, principalmente para remover metales pesados y materia orgánica (Velasco Quino et al. 2015; Mendoza, I.Pérez, and Galindo 2018).

2.6 Macrófitas acuáticas

Las macrófitas acuáticas son plantas que se desarrollan en ambientes acuáticos e inundables. Su distribución depende de factores como topografía, la geología, el clima, además de eficaces mecanismos para dispersar sus semillas (Ramos Montaña, Cárdenas-Avella, and Herrera Martínez 2013).

Las macrófitas acuáticas se distribuyen en cuatro divisiones taxonómicas: Charophyta, Bryophyta, Pteridophyta y Spermatophyta. Estas pueden clasificarse de acuerdo con el hábito de crecimiento, en cuatro grupos: sumergidas, flotantes enraizadas, emergentes y flotantes libres (Ramos Montaña, Cárdenas-Avella, and Herrera Martínez 2013).

Las macrófitas sumergidas alcanzan el máximo nivel de adaptación acuática al desarrollar órganos fotosintéticos y reproductivos bajo la columna de agua, incluso bajo condiciones limitadas de luz; en las flotantes enraizadas, las hojas y estructura floral reposan sobre la superficie del agua y las raíces se encuentran adheridas al sedimento; las emergentes presentan las porciones basales bajo la superficiales del agua y desarrollan sus estructuras reproductivas en fase aérea; y las macrófitas de hábito flotante desarrollan sus hojas en la superficie y las raíces cuelgan libremente en la columna de agua. (Ramos-Montaña et al. 2013).

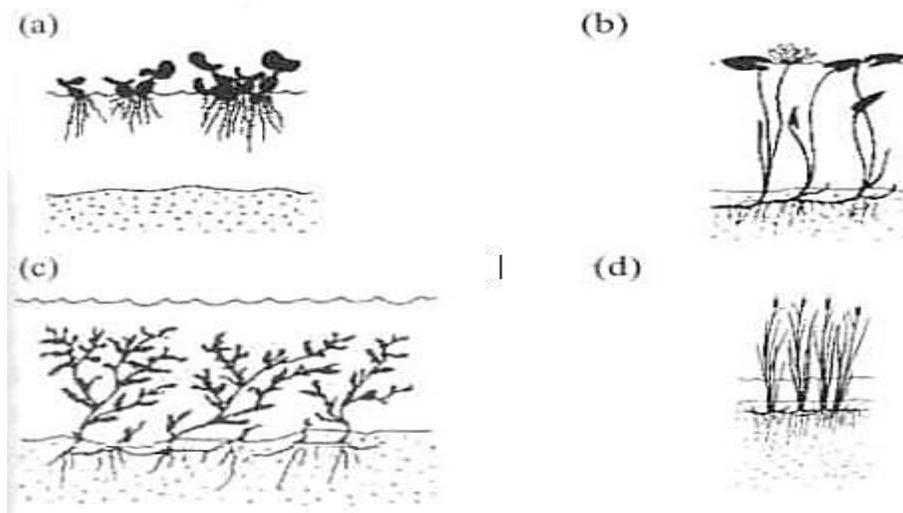


Figura 4. Tipos de macrófitas: Flotantes libres; b) flotantes enraizadas; c) sumergidas; d) emergentes. (Arias et al. 2003)

Estas plantas acuáticas tienen la capacidad de eliminar diferentes categorías de contaminantes (orgánicos, inorgánicos y otros) (Ver Figura 5).

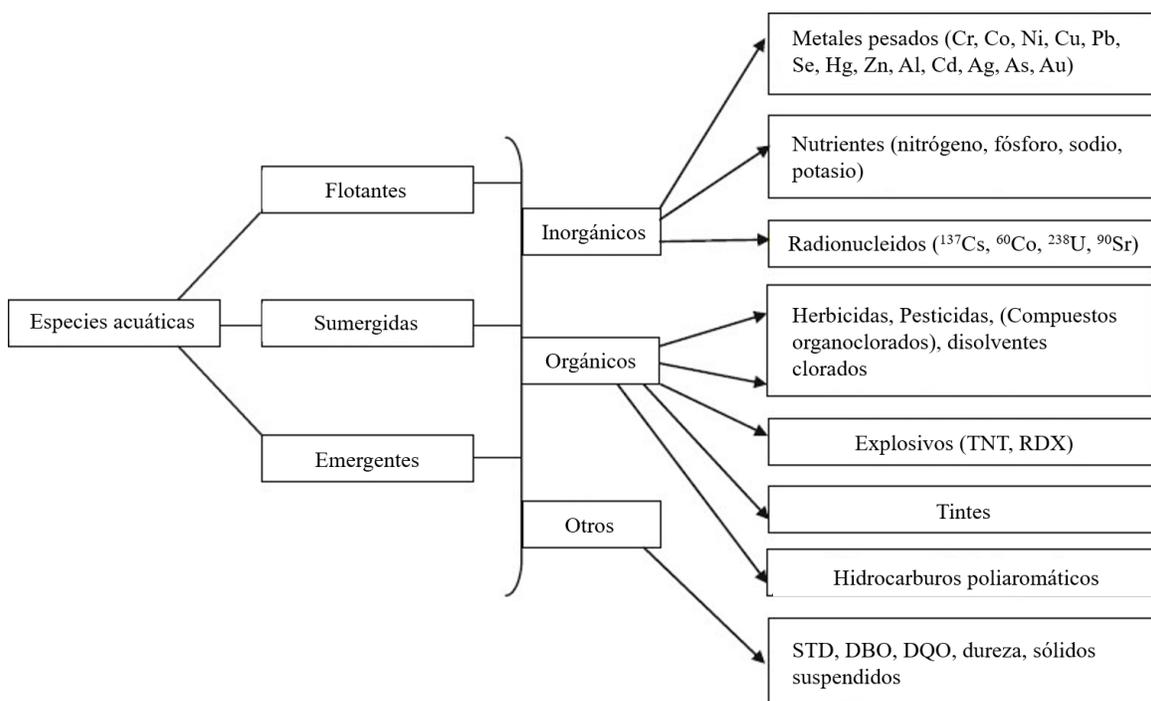


Figura 5. Tipos de contaminantes que pueden eliminar las plantas acuáticas (Dhir 2013).

2.7 *Pistia stratiotes*

P. stratiotes es una planta macrófita acuática flotante perenne, en forma arrosetada de hojas obovadas a espatuladas de color verde pálido de 10 - 20 cm de largo (Khan et al. 2014). Se caracteriza por ser una planta clonal que forma pequeñas colonias con plantas hijas unidas a la planta madre a través de estolones (Ver Figura 6). La dispersión se mejora mediante el desprendimiento de plantas hijas que forman nuevas colonias. Poseen grandes sistemas de raíces plumosas que cuelgan libremente en el agua (Organization 2017).

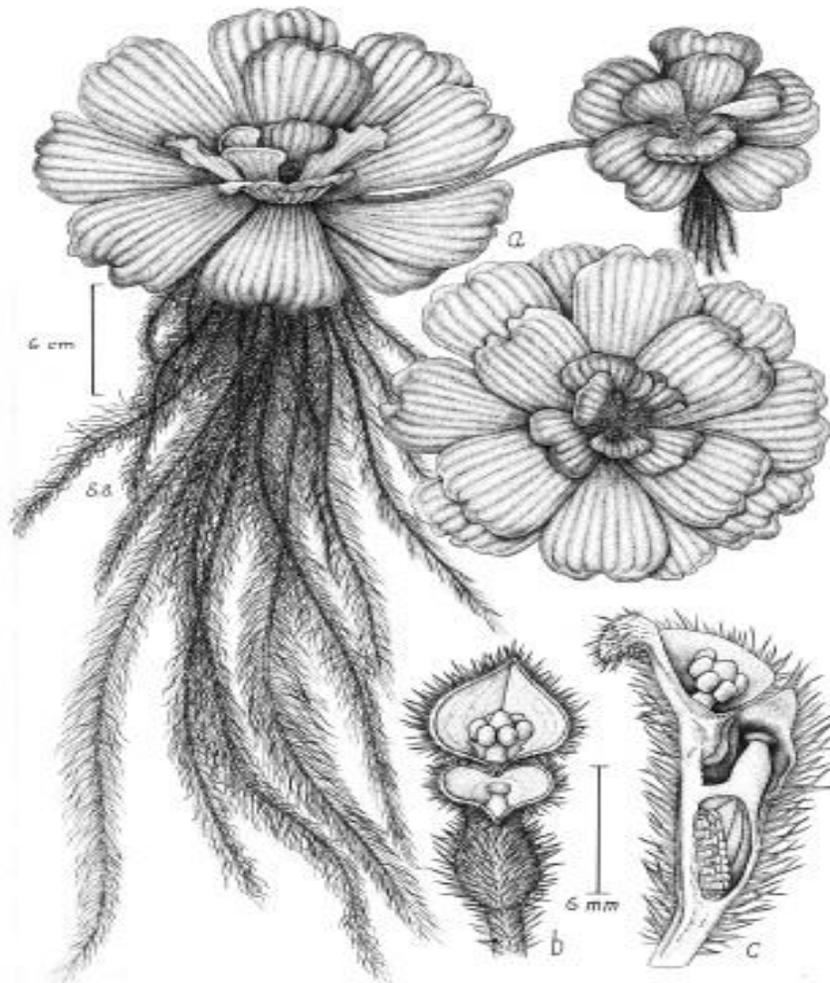


Figura 6. *Pistia stratiotes* (Castillo-campos et al. 2015)

Crece en una amplia variedad de ambientes acuáticos, requiere un hábitat húmedo, pero se puede encontrar en lagos y ríos, sin embargo, prefiere aguas relativamente estancadas. Se adapta mejor a temperaturas de 15 a 35 °C y tiene baja tolerancia a la salinidad (Khan et al. 2014).



Figura 7. Distribución de *P. stratiotes* en el Estado de Veracruz (Castillo-campos et al. 2015)

P. stratiotes se ha reportado como especie invasora en México (Bonilla-barbosa et al. 2014), es considerada como una maleza para el medio acuático, donde puede impactar directamente a las plantas nativas sumergidas y reducir la biodiversidad al impedir el paso de luz solar y el intercambio de oxígeno. También dificulta actividades como la navegación y la pesca. (CONABIO 2014) Sin embargo, *P. stratiotes* se ha considerado una planta prometedora para la remediación de aguas contaminadas (Khan et al. 2014) debido a los cambios que provoca tanto en las características fisicoquímicas como biológicas de los cuerpos de agua. (Martínez-Jiménez 2018), es considerada como un filtro biológico que regulan las concentraciones de nutrientes y sólidos suspendidos totales en la columna de agua (Peralta-Peláez et al. 2009).

2.7.1 Clasificación taxonómica

Reino:	Plantae
Phylum:	Magnoliophyta
Clase:	Liliopsida
Orden:	Arales
Familia:	Araceae
Género:	<i>Pistia</i>
Especie:	<i>Pistia stratiotes</i> L., 1753
Nombre común:	helecho flotador gigante, lechuga de agua.

Fuente: (CONABIO 2014)

2.7.2 Antecedentes de fitorremediación utilizando *P. stratiotes*

La macrófita *P. stratiotes*, ha sido ampliamente utilizada para el tratamiento de aguas residuales sintéticas (Bolaños-Benitez et al.2008; Paris et al. 2005; Farnese et al. 2014), municipales (Mendoza et al. 2018; Shah et al. 2014), superficiales (Olguín et al. 2017; Robles-Pliego et al. 2015; Xiao et al. 2013) e industriales, por ejemplo de la industria de fundición del acero (Aurangzeb et al. 2014) y efluentes de acuicultura en piscifactoría (Akinbile et al. 2012) alcanzando significativos porcentajes de remoción de contaminantes. No obstante, son escasas las investigaciones realizadas sobre la fitorremediación de lixiviados utilizando a esta especie.

En 2015 se realizó un trabajo en Rumania (Malschi et al. 2015) para evaluar la bioacumulación de metales pesados en muestras (sin diluir y diluidas al 50%) de la laguna de lixiviados de un relleno sanitario. La evaluación incluyó a *Pistia stratiotes* y a otras cinco especies de macrófitas (*Lemna minor*, *Eichhornia crassipes*, *Vallisneria spiralis*, *Hydrilla verticillata* y *Cladophora glomerata*), logrando considerables remociones de Cu, Pb, Ni, Fe, Zn, Cr y Cd en tan solo dos semanas. En este mismo año, otro grupo de investigación en Brasil (Preussler et al. 2015) publicó los resultados de un estudio llevado a cabo durante dos años utiizando humedales naturales. En dichos humedales se utilizó *Pistia stratiotes* en combinación con *Echnochloa polystachya*, *Eichhornia crassipes* y *Alternanthera philoxeroides*, alcanzando juntas una eficiencia de remoción del 75% para DBO, 63% para DQO, 84% de N amoniacal, 89% para N total y 70% de fósforo.

Por otra parte, una Tesis de Licenciatura (Placencia 2016) realizada en la Universidad Nacional de Loja, ubicada en Zamora, Ecuador, se enfocó en la evaluación del potencial fitorremediador de *Pistia stratiotes* y *Limnobium laevigatum* R. Para ello, utilizaron muestras de lixiviados producidos en el relleno sanitario del Cantón Centinela del Cóndor, provincia de Zamora Chinchipe. Entre sus resultados se puede destacar la pronunciada disminución en los valores de la demanda química y bioquímica de oxígeno (DQO y DBO), así como también de sólidos suspendidos totales con ambas especies. En este mismo año, también se realizó una evaluación de parámetros fisicoquímicos y metales pesados en lixiviados en Kinkinau, Nigeria (Ugya et al. 2016) con resultados bastante promisorios para *Pistia*.

Más tarde en 2018, el mismo grupo de investigación de Rumania (Malschi et al. 2018) publicó los resultados de un nuevo trabajo que ahora incluyó en sus análisis a otros atributos contaminantes (N amoniacal, conductividad eléctrica, sólidos disueltos totales, etc.), además de los metales pesados anteriormente evaluados. Un año después, en 2019, un grupo de investigación Pakistání (Abbas et al. 2019) comparó la efectividad de *Pistia* y de jacinto de agua para fitorremediar lixiviado en un periodo de 15 días. Los autores observaron una reducción significativa de pH, sólidos disueltos totales, DQO, DBO y metales como Zn, Pb, Fe, Cu y Ni con ambas especies. Este trabajo fue realizado con diferentes concentraciones de lixiviado, con lo que se concluye que la concentración de lixiviado a tratar es un factor determinante para el éxito del proceso.

Es así como finalmente, otro grupo de investigación de Brasil (Kurscheidt et al. 2020), evaluó la tolerancia de *Pistia stratiotes* y *Eichhornia crassipes* a lixiviados de relleno sanitario pretratados. En este estudio, realizado en condiciones semi-exteriores de invernadero, se concluyó que *Pistia* fue capaz de tolerar y crecer en un lixiviado con una concentración máxima del 20% (diluido con agua), siendo la DQO, DBO, N total y el fósforo presente en el lixiviado, los factores de mayor limitación para el desarrollo de las especies vegetales.

Todos los trabajos anteriores son aportaciones importantes a tomar en cuenta en el campo de la fitorremediación de lixiviados con *Pistia*. Es de notar la falta de trabajos al respecto en México, lo que nos puede llevar a pensar que los tratamientos que se dan en nuestro país a este tipo de residuos (si es que están siendo tratados, en el mejor de los casos) siguen siendo únicamente tratamientos convencionales y hay una falta de transferencia de biotecnologías que coadyuven

al cuidado del medio ambiente. Es este tenor, la investigación sobre la fitorremediación de lixiviados para los rellenos sanitarios en nuestro país tiene una gran área de oportunidad.

3. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Particularmente, en el caso de los sitios de disposición final de residuos sólidos urbanos denominados Rellenos Sanitarios, que ofrecen sus servicios para el depósito de los residuos generados por distintas actividades de la población, han registrado una creciente demanda de sus servicios. Esta creciente demanda trae consigo un incremento en el ingreso de residuos al sitio y por consiguiente un aumento en la generación de los lixiviados, los cuales debido a las características que poseen deben ser captados y tratados para impedir que contaminen el suelo, las aguas superficiales y los mantos acuíferos o que se conviertan en fuente de enfermedades potenciales a la población, entre otros.

Actualmente, los rellenos sanitarios utilizan distintas técnicas para el tratamiento de lixiviados, pero en ocasiones no lo hacen o las técnicas que implementan son muy costosas, difíciles de implementar y de dar seguimiento o que pudiesen no ser suficientes para disminuir los niveles altos de contaminantes presentes en los mismos, además de no ser métodos que remuevan componentes como metales pesados, por ejemplo. Por lo que existe la necesidad de buscar alternativas sustentables, como la fitorremediación, para el tratamiento de lixiviados, y así ser implementados en el corto o mediano plazo por los responsables del sitio.

4. JUSTIFICACIÓN

En la actualidad, dentro de la infraestructura con la que cuentan la mayoría de los rellenos sanitarios está el sistema de captación de lixiviados que consta de la recolección y conducción de estos desde la celda hacia una laguna acondicionada con geomembrana para contener los lixiviados. Posterior a esta contención utilizan como técnicas para el tratamiento de lixiviados la recirculación y la evaporación, las cuales pudiesen no ser suficientes para disminuir los niveles altos de contaminantes presentes en los mismos. Dichos tratamientos son utilizados solo para controlar los niveles de lixiviados captados en la laguna, en particular durante la temporada de lluvias. Por otro lado, actualmente existe una creciente demanda para la disposición de los residuos en este relleno lo que trae consigo un incremento en el ingreso de residuos al sitio y por consiguiente un aumento en la generación de los lixiviados. Así, es oportuno mencionar la necesidad que se tiene por parte de los operadores del relleno de implementar un tratamiento que lleve a cabo la remoción de contaminantes. Hoy en día, es posible utilizar diversos tipos de tecnologías para el tratamiento de lixiviados de rellenos sanitarios, sin embargo, varios de ellos requieren equipos o métodos costosos, que son complicados y requieren infraestructura muy equipada. Por lo tanto, existe la necesidad de buscar alternativas sustentables, eficientes, de bajo costo y amigables con el entorno, como la fitorremediación, que de acuerdo con la literatura, es una tecnología económica, simple, sustentable, compatible con el ambiente y estéticamente más agradable que las tecnologías convencionales, ofreciendo además un mayor número de ventajas y, por ende, en los países desarrollados ha dejado de ser una opción potencial de tratamiento para convertirse en una tecnología aplicable y eficiente para remover, transformar o degradar diversos tipos de contaminantes (Núñez-López et al. 2018). Dentro de los medios contaminantes que se pueden tratar con esta alternativa están los lixiviados, para lo cual se ha encontrado que en diversos trabajos de investigación se está optando por la fitorremediación a través de diversas macrófitas acuáticas como *Pistia stratiotes*, la cual para el presente trabajo tiene varias ventajas como el ser considerada una planta acuática de rápida reproducción, de amplia distribución en el estado de Veracruz y que tiene la particularidad de actuar como filtro biológico, regulando las concentraciones de nutrientes y sólidos suspendidos totales (Peralta-Peláez and Moreno-Casasola 2009). Tomando como base lo anterior se pretende conocer las características que poseen los lixiviados sujetos de estudio, así como elegir una metodología adecuada para evaluar los porcentajes de remoción de contaminantes, esto con la finalidad de reunir los elementos necesarios para evaluar a la fitorremediación como tratamiento alternativo y así contribuir a que en los rellenos sanitarios se considere la implementación de esta tecnología.

5. PREGUNTA DE INVESTIGACIÓN

¿Cuál es la eficacia de remoción de las concentraciones de contaminantes utilizando fitorremediación con *Pistia stratiotes* en lixiviado de relleno sanitario?

6. HIPÓTESIS

La fitorremediación aplicada a los lixiviados de relleno sanitario con *Pistia stratiotes*, logrará una eficiente reducción de concentraciones de contaminantes.

7. OBJETIVOS

7.1 General

Evaluar la eficiencia de remoción de la concentración de contaminantes a través de la fitorremediación con *Pistia stratiotes* en lixiviados de relleno sanitario.

7.2 Específicos

- Caracterizar los lixiviados, determinando parámetros como pH, DBO, DQO, conductividad eléctrica, sólidos, nitrógeno inorgánico, fósforo y turbidez durante temporada de estiaje, lluvias y nortes.
- Determinar experimentalmente la tolerancia de *Pistia stratiotes* a diferentes concentraciones de lixiviados.
- Implementar un sistema de tratamiento con *Pistia stratiotes* escala laboratorio con/sin aireación) utilizando la concentración de lixiviado seleccionada.
- Evaluar la fitorremediación con base en los porcentajes de remoción de contaminantes utilizando *Pistia stratiotes*.

8. MATERIALES Y MÉTODOS

8.1 Ubicación de la zona de muestreo

El área de muestreo se encuentra en el Municipio de Medellín del estado de Veracruz que se ubica entre los paralelos $18^{\circ} 50'$ y $19^{\circ} 09'$ de latitud norte; los meridianos $96^{\circ} 02'$ y $96^{\circ} 16'$ de longitud oeste; altitud entre 5 y 60 m, colindando al norte con los municipios de Veracruz, Boca del Rio y Alvarado; al este con los municipios de Alvarado y Tlaxicoyan, al sur con los municipios de Tlaxicoyan y Cotaxtla; al oeste con los Municipios de Cotaxtla, Jamapa, Manlio Fabio Altamirano (Figura 8). El clima predominante es cálido subhúmedo con lluvias en verano, de mayor humedad (69%) y cálido subhúmedo con lluvias en verano, de humedad media (31%) con un rango de temperatura $24- 28^{\circ}$ y un rango de precipitación de 1100 – 1600 mm (INEGI: Prontuario de información geográfica municipal de los Estados Unidos Mexicanos) (SEFIPLAN 2016).

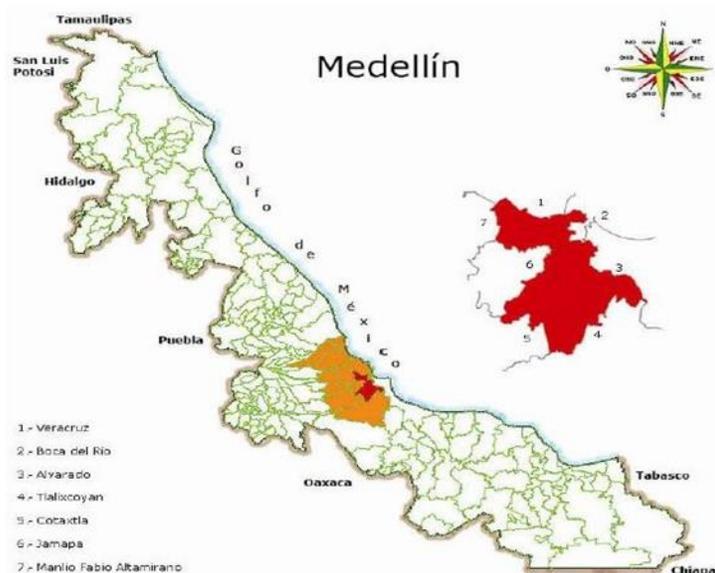


Figura 8. Mapa de localización.
Fuente: SIM-SEFIPLAN, 2016.

8.2 Características del sitio de muestreo

Para las corridas experimentales se utilizó lixiviado obtenido del relleno sanitario “El Guayabo” ubicado en domicilio conocido en la Ex Hacienda El continente, localidad del guayabo en el

municipio de Medellín, Veracruz de Ignacio de la Llave (Figura 9), donde se captan residuos sólidos urbanos provenientes de municipios como Medellín, Boca del Río y Veracruz. Este relleno se ubica en el municipio de Medellín, Veracruz, situado en N 18° 89' 13.74" W 96° 13' 61.81" (México). El relleno tiene un sistema de captación de lixiviados, el cual consiste en dirigirlos desde la celda de disposición de los residuos, a través de una red de conductos internos, hacia una laguna de contención artificial recubierta con geomembrana, con capacidad para contener un volumen total de 18 952.34 m³ y que opera desde aproximadamente 9 años.



Figura 9. Localización del Relleno Sanitario “El Guayabo”

8.3 Estrategia de muestreo

Las muestras de lixiviado se tomaron de cuatro puntos de la laguna, seccionándola en cuatro cuadrantes como puntos de muestreo (C1-C4) (Figura 10). Las muestras se recolectaron del estanque de lixiviados en tres temporadas distintas durante 2020: marzo (estiaje), julio (lluvias) y diciembre (nortes), se guardaron en recipientes de polietileno de alta densidad (HDPE) de 1 L, y posteriormente se trasladaron al laboratorio (LIRA) del ITBOCA, donde fueron almacenados en cámara frigorífica a 4 ± 1 °C de temperatura hasta la realización del análisis posterior.



Figura 10. Recolección de muestras de lixiviados.

8.4 Análisis fisicoquímicos para caracterización del lixiviado

El lixiviado se caracterizó en cada temporada de muestreo de acuerdo con su temperatura, pH, nitrato, nitrito, fósforo, DQO, DBO₅, sólidos totales, sólidos volátiles totales, sólidos disueltos totales, turbidez y conductividad eléctrica. Los valores de los parámetros obtenidos se compararon con los datos publicados por investigadores anteriores y algunas normas aplicables en otros países debido a la falta una normativa oficial mexicana para lixiviados. La temperatura, SDT y el pH se registraron en el sitio en el momento del muestreo con la ayuda de un equipo digital portátil.

8.4.1 Turbidez

Se utilizó un turbidímetro portátil (marca OAKTON, modelo TN-100/T-100) a través de la técnica nefelométrica. Las determinaciones se hicieron por duplicado a cada muestra,

obteniendo el resultado en unidades nefelométricas de turbidez (UNT) (SECOFI 2001c).



Figura 11. Medición de turbidez

8.4.2 Demanda Bioquímica de Oxígeno

Se determinó utilizando un equipo de DBO respirométrico (marca HACH, modelo Bod Track II) en mg/L. se utilizaron botellas de vidrio marrón de 492 mL, dentro de las cuales se colocaron las muestras de lixiviado junto con un agitador magnético. Adicionalmente se agregó una almohadilla con nutrientes, se colocó un tapón hermético y dos comprimidos de hidróxido de potasio. El equipo se mantuvo funcionando durante cinco días a 20 ± 2 °C. Al término de los cinco días transcurridos se tomó la lectura para cada una de las muestras (SECOFI 2001a).

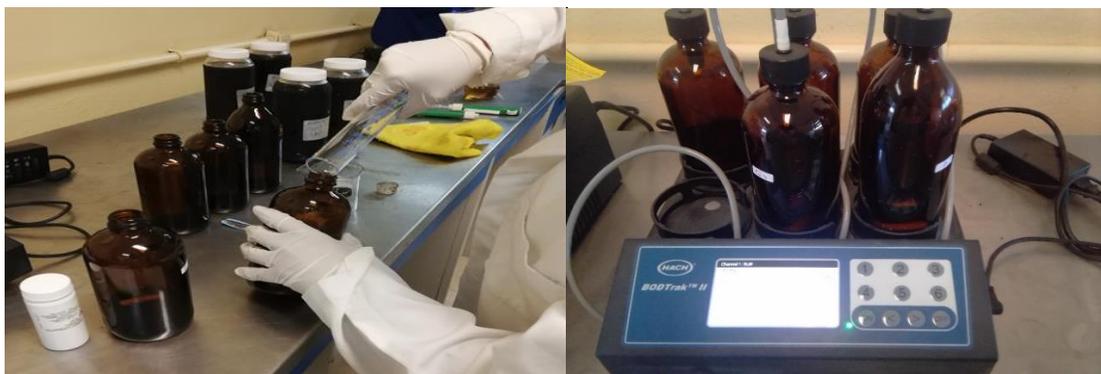


Figura 12. Análisis de Demanda Bioquímica de Oxígeno

8.4.3 Demanda Química de Oxígeno

La determinación consistió en colocar 2 mL de muestra diluida de lixiviado (1:25) en tubos de vidrio con taparrosca, se añadió 1 mL de solución digestora y 2 mL de solución de ácido sulfúrico, se colocaron en una placa digestora a 150 °C durante 2 h. Posteriormente, se realizó una lectura espectrofotométrica a una longitud de 620 nm a temperatura ambiente. El cálculo se hizo con ayuda de una curva de calibración construida utilizando biftalato de potasio (SECOFI 2011).



Figura 13. Análisis de Demanda Química de Oxígeno

8.4.4 Fósforo total

Se determinó usando 50 mL de muestra de lixiviado bien mezclada. Se adicionó una gota de fenolftaleína a cada muestra. Posteriormente se adicionó 1 mL de disolución de ácido fuerte (mezcla de sulfúrico y nítrico) y 0.5 g persulfato de potasio. La muestra se colocó en una placa de calentamiento hasta ebullición, hasta que se alcanzó un volumen de 10 mL. Se enfrió y diluyó a 30 mL con agua, se adicionó una gota de fenolftaleína (sin viraje a color rosado). Se aforó a 100 mL con agua destilada. Se colocaron 25 mL de cada muestra (previa digestión con persulfato de potasio) en un matraz volumétrico de 50 mL y se agregaron 10 mL de la disolución reactivo vanado-molibdato y se aforó con agua destilada para finalmente medir la absorbancia a 470 nm. Para la determinación se construyó una curva de calibración con una solución estándar de fósforo (SECOFI 2001b).



Figura 14. Determinación de Fósforo total

8.4.5 Nitratos

Se utilizó el método espectrofotométrico de brucina. Se adicionó a la muestra una gota de arsenito de sodio. Posteriormente se filtraron 20 mL de cada muestra y se diluyó con agua destilada (relación 1:1). Se colocaron 10 mL de muestra filtrada diluida en tubos de ensayo en una gradilla junto con los tubos para los patrones y blanco. Estando en un baño de agua fría, a cada tubo se agregaron 2.0 mL de cloruro de sodio, 10 mL de disolución de ácido sulfúrico y 0.5 mL del reactivo brucina-ácido sulfanílico. Posteriormente se colocaron en un baño de agua en ebullición, durante 20 minutos, se sacaron y se sumergieron en agua fría. La absorbancia fue medida a 410 nm a temperatura ambiente. Para la determinación, se construyó una curva de calibración empleando una disolución estándar intermedia de N-NO_3 (SECOFI 2001d).

8.4.6 Nitritos

La muestra fue filtrada y neutralizada con NaOH 1N. Luego se colocaron 50 mL de la muestra diluida en un matraz, donde se le agregó 1 mL de la solución de sulfanilamida y se agitó vigorosamente 7 min. Posteriormente se agregó 1 mL de una disolución de diclorhidrato de N-(1- naftil) etilendiamina, se dejó reposar 10 min y se midió la absorbancia a 543 nm (SECOFI 2006).

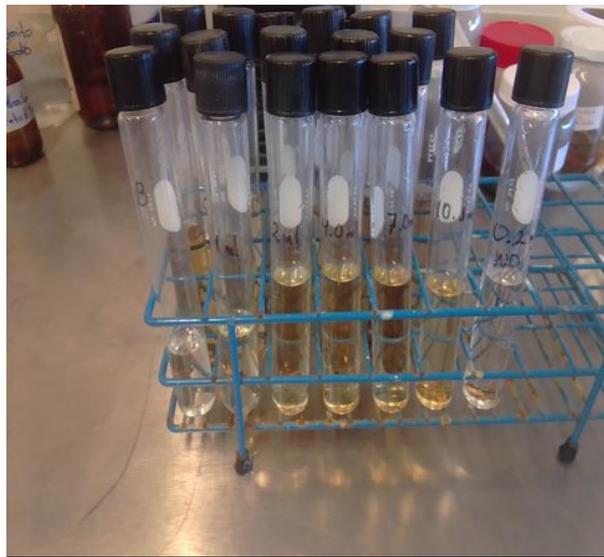


Figura 15. Determinación de Nitratos por método de brucina.



Figura 16. Determinación de Nitritos

8.4.7 Sólidos totales

La determinación se realizó agregando 40 mL (V) de la muestra de lixiviado en cápsulas de porcelana (previamente llevadas a peso constante, registrándose como peso G). Posteriormente se sometieron a un proceso de evaporación y secado dentro de una estufa a 105 °C, en donde permanecieron hasta peso constante. Finalmente, se dejaron enfriar dentro de un desecador para ser pesadas nuevamente registrándose como peso G1. El cálculo se realizó mediante la fórmula (SECOFI 2001e):

$$ST = (G1 - G) * 1000 / V.$$

8.4.8 Sólidos Volátiles Totales

La determinación se realizó agregando 40 mL (V) de la muestra de lixiviado en cápsulas de porcelana (previamente llevadas a peso constante registrando su peso como G). Posteriormente se sometieron a un proceso de evaporación y secado dentro de una estufa a 105 °C, en donde permanecieron hasta peso constante (registrándose como peso G1). Posteriormente se llevaron a una mufla a 550 ± 50 °C, se enfriaron en desecador y se transfirieron a la estufa nuevamente a 105 °C. Finalmente, se dejaron enfriar dentro de un desecador para ser pesadas nuevamente (registrándose como peso G2). El cálculo se realizó mediante la fórmula (SECOFI 2001e):

$$SVT = (G1 - G2) * 1\ 000 / V.$$



Figura 17. Determinación de sólidos

8.4.9 pH, temperatura, conductividad eléctrica y sólidos disueltos totales.

Las mediciones de pH, temperatura, CE y SDT se realizaron por duplicado a cada muestra con un potenciómetro portátil (marca HANNA modelo HI9811-5). Estas determinaciones se realizaron *in situ*, durante el muestreo, en un contenedor en el cual se recolectó lixiviado, introduciendo el electrodo medidor, obteniendo así las lecturas (SECOFI 2016; 2017).



Figura 18. Medición de pH, temperatura, conductividad y sólidos suspendidos totales *in situ*

8.4 Recolección, preparación y adaptación de *Pistia stratiotes*

Se recolectaron plantas sanas de *Pistia stratiotes* de un humedal tropical natural (Figura. 19) durante agosto de 2020 en Manlio Fabio Altamirano Veracruz, México (N 19°11'39.62" O 96°19'54.53"). Después de ser transportadas a un área abierta del LIRA en la ciudad de Boca del Río, las plantas se lavaron con agua del grifo para eliminar suciedad adherida. El biopesticida Hortimec® (Abamectina 1.8% m/v) se roció sobre las hojas durante tres días consecutivos para eliminar las plagas que las plantas habían adquirido del sitio de recolección. Para la aclimatación a las nuevas condiciones ambientales, se instaló un medio de cultivo de lagunas plásticas de 310 L (120 cm de largo, 78 cm de ancho 47 cm de altura), XX m² de superficie, con un volumen de trabajo de 180 L y una columna de agua de 30 cm cada una. Para estimular su crecimiento, se agregaron fertilizantes de grado comercial Tricel® (0.665 g L⁻¹) y Urea (0.02125 g L⁻¹) al agua de cultivo (Olguín et al. 2017). Cada dos semanas, los nuevos brotes de *P. stratiotes* se trasladaron a tinas con agua limpia y solución nutritiva, además de realizar el cambio de dicho medio a las tinas del cultivo inicial, removiendo así sólidos orgánicos en descomposición.



Figura 19. Recolección de *P. stratiotes*

8.5 Tolerancia de *P. stratiotes* a diferentes diluciones de lixiviado

Se establecieron cinco tratamientos, por triplicado, en recipientes de vidrio con dimensiones

de 0.515 x 0.265 x 0.3 m y una capacidad de 35 L, totalizando 15 recipientes envueltos con papel de aluminio, con el fin de evitar la incidencia de la luz y su interferencia en la degradación natural de los compuestos presentes en el lixiviado. Los tratamientos considerados después de hacer pruebas preliminares para descartar concentraciones superiores de lixiviado fueron: 1) 0% Control 1 (plantas con 20 L de agua del grifo), 2) 0% Control 2 (plantas con 20 L de agua del grifo + nutrientes), 3) 15% (3 L de lixiviados de vertedero + 17 L de agua del grifo), 4) 20% (4 L de lixiviados de vertedero + 16 L de agua del grifo), y 5) 25% (5 L de lixiviados de vertedero + 15 L de agua del grifo).



Figura 20. Pruebas preliminares para determinación de tolerancia

Para determinar el rango de concentraciones definitivo en los ensayos preliminares se realizaron pruebas inicialmente con una dilución del 0 (100% de lixiviado) y 50%. Posteriormente, se definieron nuevos factores de dilución: 15, 30 y 45 % de lixiviado en agua. En el último intento, se determinaron nuevas diluciones: 15, 20 y 25% de lixiviado, todos con un volumen final de 20 L en cada recipiente.

Para el establecimiento de los experimentos definitivos se utilizaron 4 plantas de *P. stratiotes* por cada recipiente, totalizando 60 plantas. Se consideró esta cantidad debido al tamaño de las plantas y, principalmente, al espacio disponible en cada recipiente para su crecimiento y

desarrollo. El período experimental, realizado en condiciones exteriores monitoreadas, fue de 21 días, con una temperatura promedio dentro de los recipientes de 28.3 ° C. Las plantas fueron seleccionadas en su edad madura, con un peso fresco promedio de 100 g, longitud promedio de hojas de 12 cm y longitud promedio de raíz de 20 cm, mismas que fueron agregadas a los microcosmos arreglados en un diseño experimental al azar para evitar efectos posicionales durante 21 días, ya que este tipo de macrófita requiere solo de quince días para llevar a cabo la remediación (Abbas et al. 2019). La pérdida y la ganancia de agua se registraron diariamente para mantener constante el volumen de agua en los recipientes individuales.



Figura 21. Pruebas definitivas para determinación de tolerancia

Durante todo el periodo experimental, se monitorearon las condiciones ambientales. La temperatura ambiental (T_{amb}) y la humedad relativa (HR) se midieron con un equipo digital (STEREN, Ter-150), la iluminancia (IL) con un luxómetro (Fydun, AS803) y la irradiancia (I) con un medidor de luz UV (GENERAL Tools, UV513AB). Asimismo, la temperatura al interior (T_{in}) de los recipientes conteniendo a los tratamientos y el pH, fueron medidos con un equipo portátil (HANNA, HI98107), mientras que el índice de color verde (ICV) en las hojas de las plantas fue determinado con un medidor de clorofila (Spectrum Technologies, FIELD SCOUT cm 1000). Luego de cumplirse el periodo experimental, la cuantificación del número de plantas

al final de cada ensayo permitió medir su índice de supervivencia (IS) (Kurscheidt et al. 2020).

8.6 Pruebas de fitorremediación

Luego de las pruebas de tolerancia, se determinó la concentración a utilizar en las pruebas de fitorremediación de lixiviados. En esta concentración, se agregaron plantas maduras de *Pistia* con el mismo tamaño y peso de las ocupadas previamente. Se estableció un tratamiento de control sin plantas conteniendo 20 L de lixiviado diluido a la misma concentración, y un tratamiento testigo en agua con nutrientes. Paralelamente, tres tratamientos análogos se establecieron paralelamente con un sistema de aireación, suministrando aire a razón de 1 L/min (ELITE 802) en cada una de las tres réplicas con el objetivo de evaluar si el suministro de aire podría aumentar la eficiencia de remoción de contaminantes.



Figura 22. Pruebas de fitorremediación

La pérdida y la ganancia de agua se registraron diariamente para mantener constante el volumen de agua en los recipientes individuales. La duración del estudio completo fue de 15 días. El experimento se presentó en un diseño completamente aleatorio con tres réplicas de cada tratamiento en el ambiente natural. El lixiviado de vertedero de cada tratamiento se caracterizó en términos de DQO, DBO₅, nitrato, nitrito, fósforo, sólidos totales, sólidos volátiles totales, sólidos disueltos totales, turbidez y conductividad eléctrica para la estimación y eliminación de la carga contaminante al final del tiempo de estudio de 15 días, la eficiencia de

remoción de ambas plantas acuáticas cultivadas en el lixiviado de vertedero se calculó mediante la ecuación dada:

$$R = (C_i - C_f) / C_i \times 100$$

Donde R es la remoción de contaminante (%), C_i es la concentración inicial de contaminante, y C_f es la concentración final.

8.7 Análisis estadístico

Los datos de ICV fueron sometidos a un ajuste de mínimos cuadrados para obtener las ecuaciones de los modelos lineales que describen su tendencia con el software Microsoft Excel 365. Además, con ayuda del software Minitab (versión 16) se aplicó la prueba t para analizar la significancia cuando se compararon diferentes parámetros antes y al final de la fitorremediación. La significancia fue definida por $p < 0.05$. Todos los resultados obtenidos fueron el promedio de tres lecturas y se estimó la desviación estándar para el porcentaje de remoción de contaminante.

9. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

9.1 Caracterización del lixiviado

Los resultados de la caracterización de los lixiviados en las diferentes temporadas consideradas en este trabajo se encuentran en la Tabla 3. Todos los valores determinados se encuentran dentro del rango que se ha reportado en otras investigaciones (Ver Tabla 3). En general, el lixiviado presentó un color marrón oscuro característico y valores de pH, nitrato y nitrito dentro de los límites permitidos en la Ley de Calidad Ambiental de 1974 (Akinbile et al. 2012). Los valores de conductividad eléctrica se encontraron por arriba del límite establecido por la FAO (Madera-Parra 2016).

Tabla 3. Resultados de la caracterización de lixiviado de relleno sanitario en tres temporadas (estiaje, lluvias y nortes).

Parámetro	Estiaje	Lluvias	Nortes
T (°C)	29.5 ± 1	26.2 ± 0.5	27.1 ± 1
pH	8.27 ± 0.2	8.23 ± 0.05	8.16 ± 0.3
t (UNT)	385.37 ± 31.3	261.75 ± 89.3	287.6 ± 1.05
CE (mS/cm)	6.22 ± 0.99	5.00 ± 1.50	10.93 ± 0.85
DBO ₅ (mg/l)	1 375 ± 324.68	2 025 ± 86.60	723.3 ± 42.9
DQO (mg/l)	7 712.5 ± 2992.4	3 946.66 ± 424.26	4 248.88 ± 1074.17
DBO/DQO	0.17	0.51	0.17
P (mg/l)	ND	8 ± 2.15	10.16 ± 1.8
NO ₃ (mg/l)	ND	6.57 ± 2.76	37.93 ± 1.8
NO ₂ (mg/l)	ND	0.22 ± 0.13	1.37 ± 0.02
ST (mg/l)	15 330.6 ± 1831.3	4 660.6 ± 1605.2	7 799.88 ± 186.61
SVT (mg/l)	3 456.2 ± 1063	1 415 ± 436.4	2 844.26 ± 418.41
SDT (mg/l)	3 100 ± 625.5	2 477.5 ± 739.02	5 400 ± 412.5

ND: No determinado.

Valores promedio ± desviación estándar (n = 4)

Las diferencias en los valores para un mismo parámetro entre temporadas corresponden con un comportamiento de dilución en temporada de lluvias (Espinosa et al. 2001) a excepción de la DBO₅, lo que puede deberse a una gran carga de materia orgánica susceptible de biodegradación, la cual es altamente soluble (Giraldo 2014) y puede estar siendo arrastrada por el agua pluvial.

De acuerdo con los resultados obtenidos en la caracterización, el pH del lixiviado es, de manera general, ligeramente alcalino. A pesar de que en México no existe una norma que establezca los límites aceptables de las características fisicoquímicas de los lixiviados, para la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO, por sus siglas en inglés), el pH del lixiviado debe encontrarse en un rango de valores entre 6.5 y 8.4 (Madera-Parra 2016), por lo que nuestro lixiviado de estudio lo cumple. Asimismo, los valores de DQO y DBO₅ están por encima de los límites que establece la legislación de Eslovenia (Kalčíková et al. 2012), la temperatura se encontró dentro de los límites permitidos en el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible de Colombia (≤ 40) (Madera-Parra 2016) y los SDT rebasaron, solo en la temporada de nortes, los límites permitidos por los Estándares Nacionales de Calidad Ambiental de Pakistán (Daud et al. 2018).

El valor de la relación DBO₅/DQO obtenido en el presente trabajo fue de 0.17 (estiaje y nortes) a 0.51 (lluvias); sin embargo, los resultados que pueden tener una mayor ponderación al decidir el tipo de tratamiento a implementar son los obtenidos durante el estiaje y nortes, ya que son los climas predominantes en la zona de ubicación del relleno sanitario. Tomando en cuenta lo anterior, y los niveles de DQO y DBO₅ obtenidos en el presente trabajo, es posible clasificar al lixiviado estudiado en una edad intermedia muy cercana a la edad madura o vieja (Gao et al. 2014; Torres Lozada et al. 2014), lo cual es consistente con el tiempo de operación del relleno sanitario. Por otra parte, es bien conocido que los lixiviados con una alta relación DBO/DQO (>0.6), un alto contenido de amonio y un pH bajo, son considerados jóvenes (se encuentran en una fase acídica fuerte), y no se pueden tratar con éxito mediante tratamientos alternativos como la fitorremediación, lo cual no es el caso del lixiviado analizado en este trabajo.

Tabla 4. Comparación de características fisicoquímicas de lixiviados en diferentes reportes científicos

(Referencia) País	pH	t UNT	CE mS/cm	DBO mg/L	DQO mg/L	DBO/ DQO	P mg/L	NO ₃ mg/L	NO ₂ mg/L	ST mg/L	SVT mg/L	SDT mg/L
(Presente trabajo, 2020) ¹	8.27	385.37	6.22	1 375	7 712.5	0.17	ND	ND	ND	15 330.6	3 456.2	3 100
México	8.26	261.75	5.00	2 025	3 946.6	0.51	8	6.57	0.22	4660.6	1 415	2 477.5
(Abbas et al. 2019)	8.16	287.6	10.93	723.3	4 248.8	0.17	10.16	37.93	1.37	7 799.8	2 844.2	5400
Pakistán	8.7	ND	ND	925	1560	0.59	ND	ND	ND	ND	ND	117.3
(Silvestrini et al. 2019)	8.4	ND	23.8	837	3 023	0.27	ND	12.5	2 497	ND	ND	ND
Argentina	7.9	ND	ND	889	1 899	0.46	ND	ND	ND	ND	ND	1695
(Daud et al. 2018)	8.02	ND	ND	75	2 255	0.03	22	0.57	ND	6 315	1 548	ND
Pakistán	7.21	927	ND	3 493	8 217	0.42	ND	59.5	0.28	9250	ND	ND
(Lavagnolo et al. 2016)	8.0	ND	ND	<5	117	<0.1	ND	5	0.4	ND	ND	ND
Italia	7.1	ND	ND	214	2 924	0.07	ND	37	3.1	ND	ND	ND
(López Guerrero and Sánchez Ortiz 2015)	7.7	ND	ND	1253	2355	0.53	ND	ND	2.13	ND	ND	ND
Colombia	8.10	289.10	8.80	902	2 011	0.45	68.5	0.36	0.23	ND	1 293	6 202
(Kalčíková et al. 2012)	7.93	138.78	7.54	776	1 188	0.65	8.82	0.01	0.02	ND	1 969	4 652
Eslovenia												
(Söğüt et al. 2005)												
Turquía												
(Espinosa et al. 2001)*												
Cuba												

ND: No determinado

¹ Los valores en orden descendente corresponden a temporada de estiaje, lluvias y nortes, respectivamente.

² Los valores superiores corresponden a temporada de estiaje y los inferiores a temporada de lluvias.

Adicionalmente, existen reportes científicos donde se han fitorremediado lixiviados con características fisicoquímicas similares con éxito, tal es el caso de Daud y colaboradores (2018), quienes trataron con *Lemna minor* un lixiviado con una relación DBO/DQO en 0.46; Silvestrini y colaboradores (2019) quienes trataron con *Typha domingensis*, *Scirpus californicus* e *Iris pseudacorus* un lixiviado con DQO de 3 023 mg/L y una relación DBO/DQO de 0.28; Söğüt y colaboradores (Söğüt et al. 2005), quienes trataron con *Pennisetum clandestinum* un lixiviado con DBO de 1 253 mg/L y DQO de 2 355 mg/L, así como también el trabajo reciente de Abbas y colaboradores (Abbas et al. 2019), quienes utilizaron *Eichhornia crassipes* y *Pistia stratiotes* para tratar un lixiviado con relación DBO/DQO en 0.59. Por todo lo anterior podemos inferir que el lixiviado objeto de estudio del presente trabajo podría tratarse con éxito mediante fitorremediación.

9.2 Pruebas de tolerancia de *P. stratiotes* a lixiviados

Los cambios temporales de temperatura (T), humedad relativa (RH) intensidad de luz (LI), e irradiancia (I) se presentan en la Figura 23. Durante el periodo evaluado, los valores promedio registrados fueron: T de 25.8 °C, RH de 69.3 %, LI de 3253 lux e I de 1 526.4 mW/m². Las temperaturas altas registradas en la zona donde se realizaron los experimentos son adecuadas para el desarrollo de macrófitas, acelerando sus reacciones químicas metabólicas (Kurscheidt et al. 2020).

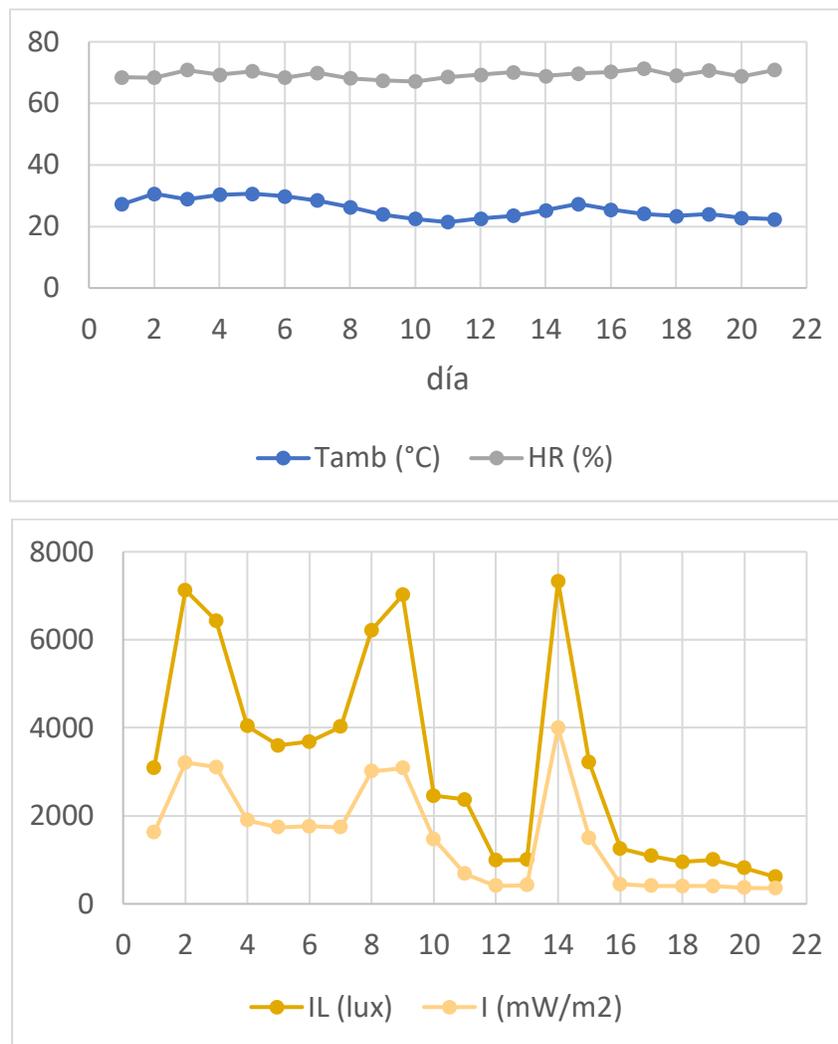


Figura 23. Resultados del monitoreo de condiciones ambientales.

La evolución de la temperatura y pH en los diferentes tratamientos, así como el índice de color verde de las plantas de *P. stratiotes* se muestran en la Figura 24. La temperatura al interior de

las peceras se mantuvo en 22.9 ± 2.5 °C, esta temperatura se redujo con respecto a la ambiental debido a la presencia de macrófitas que crean un sombreado de la superficie y menor absorción de los rayos solares por el agua. Para las macrófitas estudiadas, hubo pocas variaciones de temperatura, posiblemente debido a que el sistema se envolvió con papel de aluminio para mantener el contenido libre de intensidad de luz (Kurscheidt et al. 2020). El pH a lo largo del periodo experimental tendió a una ligera acidificación, misma que se explicará más adelante en la sección de las pruebas de fitorremediación.

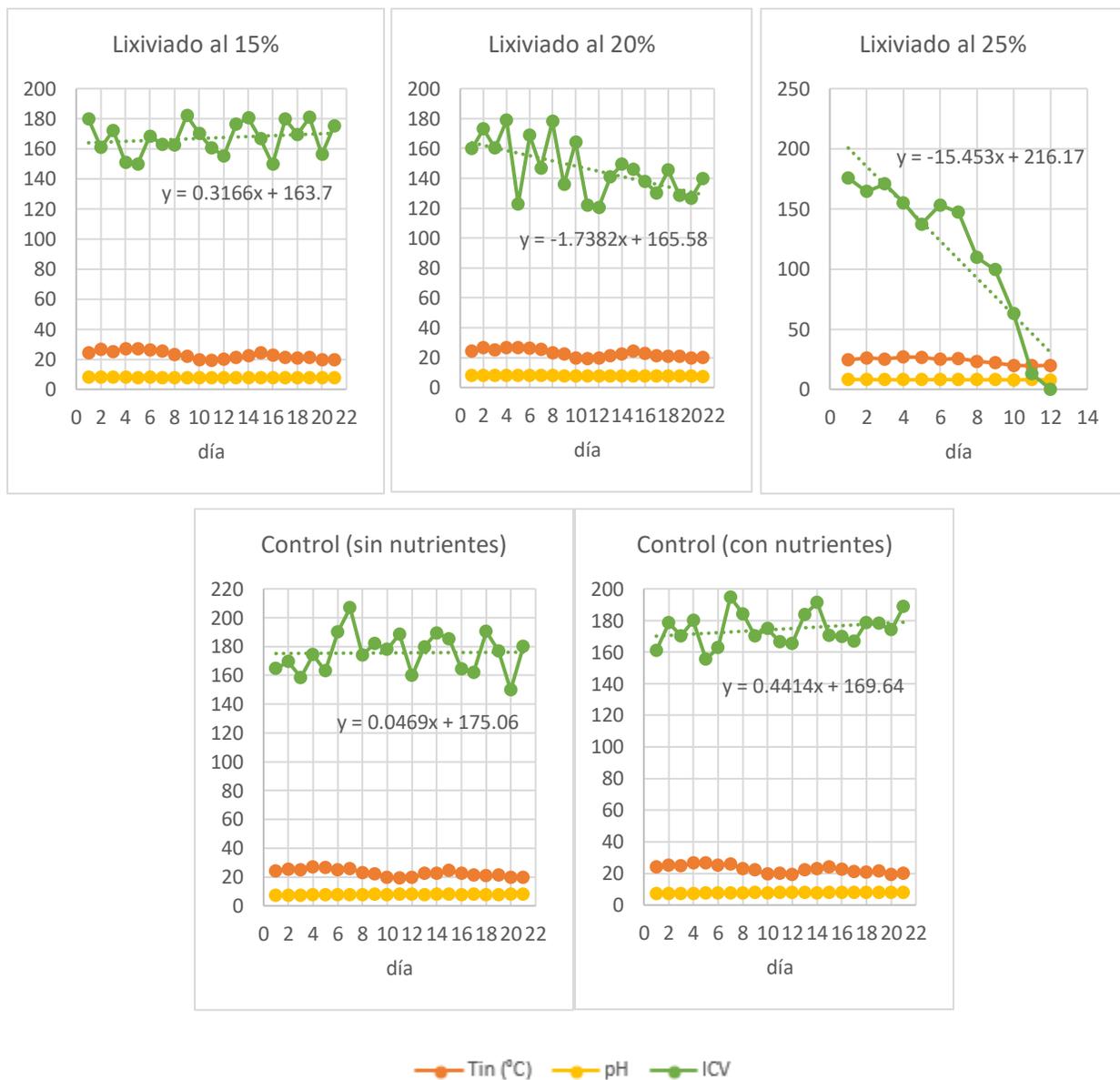


Figura 24. Evolución de los tratamientos durante las pruebas de tolerancia

Como puede apreciarse en las gráficas de los tratamientos control, la mayor estabilidad de la clorofila en las plantas, relacionado a una salud mayormente estable se encontró en el tratamiento con solución nutritiva, en concordancia con lo reportado previamente por Akinbile y colaboradores (Akinbile et al. 2012). *P. stratiotes* fue sensible a las más altas concentraciones de 20 y 25% de lixiviado, lo cual podemos determinar por las pendientes negativas de la tendencia del ICV en las hojas de las plantas.

A una concentración de 15% las plantas mostraron mayor tolerancia, siendo la pendiente de la recta de ajuste lineal, parecida a la pendiente de los datos de ICV en el tratamiento de control con nutrientes. En el tratamiento con la mayor concentración (25%), se presentaron síntomas de clorosis en hojas en los primeros 5 días de iniciar el experimento, registrándose la muerte de todas las plantas en dos de las tres réplicas antes de finalizar el periodo de estudio.

El índice de supervivencia (IS) en 21 días de los tratamientos se presenta en la Tabla 5. Como puede apreciarse, el tratamiento con el lixiviado al 15% fue el que mostró un mejor IS, bastante similar al tratamiento con nutrientes, registrándose un desarrollo estable y hasta la reproducción de las plantas luego de 21 días. Esta concentración es la que se seleccionó para las pruebas de fitorremediación. Cabe mencionar que la elección de la concentración de los lixiviados es fundamental para el éxito de los experimentos subsecuentes de fitorremediación.

En este sentido, aunque en diversos trabajos de investigación ha sido factible tratar lixiviados sin diluir con *P. stratiotes* (Preussler et al. 2015; Abbas et al. 2019), en otros ha sido necesario recurrir a diferentes diluciones, las cuales estriban en la edad y características fisicoquímicas de estos. Algunas de las concentraciones reportadas son al 50% (Malschi et al. 2018), al 20% (Kurscheidt et al. 2020) y 10% (Silvestrini et al. 2019).

A pesar de su gran capacidad de supervivencia, las macrófitas acuáticas tienen límites de tolerancia según las características de las aguas residuales, especialmente si presentan altas concentraciones de fósforo, amonio, metales pesados, entre otros. Siendo *Pistia stratiotes* una macrófita, esta requiere de nutrientes que los contaminantes ponen a disposición, pero cuando exceden los límites de tolerancia de cada especie, su desarrollo se ve comprometido. No obstante, es de destacar que las plantas utilizadas en el presente trabajo han logrado tolerar una concentración de 15% de lixiviado sin pretratamiento, mientras que en el trabajo de Kurscheidt y colaboradores (Kurscheidt et al. 2020) solo toleraron un lixiviado pretratado al 20%.

Tabla 5. Índice de supervivencia de *P. stratiotes* en función de las concentraciones de lixiviado al inicio y final del experimento.

	Tratamiento														
	Control SN			Control CN			Lixiviado al 15%			Lixiviado al 20%			Lixiviado al 25%		
Réplica	A	b	c	a	b	c	a	b	c	a	b	c	a	b	c
	Número de plantas														
Día 0	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4
Día 21	6	7	5	10	7	7	8	7	10	8	0	9	0	0	2
IS	150	175	125	250	175	175	200	175	250	200	0	225	0	0	50
IS promedio ± DE	150 ± 25			200 ± 43.3			208.3 ± 38.2			141.7 ± 123.3			16.7 ± 28.9		

SN: sin nutrientes; CN: con nutrientes; IS: índice de supervivencia; DE: desviación estándar

9.3 Pruebas de fitorremediación

Las pruebas de fitorremediación se llevaron a cabo durante 15 días iniciando en el mes de diciembre de 2020, con las siguientes condiciones ambientales promedio: Temperatura de 25.2 °C, humedad relativa de 60.7 %, intensidad de la luz de 1418 lux e irradiancia de 1 563.2 mW/m². Se observó una reducción significativa en siete de los once parámetros fisicoquímicos después de la fitorremediación de aguas residuales lixiviadas. Esto se muestra en la Tabla 6. En primer lugar, es importante destacar la reducción en el valor del pH, desde un valor inicial de 8.14, hasta un valor de 7.5. Un comportamiento similar ha sido reportado previamente en la fitorremediación con *Pistia stratiotes* de lixiviados crudos (sin pretratamiento) (Ugya et al. 2016; Malschi et al. 2018; Abbas et al. 2019). Por otra parte, la disminución de los sólidos no fue significativa. En este tenor, Abbas y colaboradores (2019) obtuvieron una reducción del 18% en SDT en lixiviados al 25% de concentración en agua, mientras que al 100% de lixiviado la reducción fue superior al 46%, con lo que se podría inferir que los bajos porcentajes de remoción de SDT en este trabajo se deben a la baja concentración de lixiviados que se utilizó en el tratamiento de fitorremediación.

Asimismo, la escasa remoción de sólidos utilizando *Pistia*, puede estar asociada a las partículas sólidas que la misma planta va desprendiendo con el envejecimiento de sus raíces, lo cual fue observado durante el periodo experimental. Lo anterior, está en concordancia con los resultados presentados por Malschi y colaboradores (2018). Sin embargo, hay evidencia de que el fenómeno de fitorremediación remueve significativamente la turbidez en el lixiviado, lo que significa que la planta está absorbiendo de manera adecuada las partículas del residuo líquido, tal como lo reportado por Ugya y Priatamby (2016). La efectividad para la remoción de turbidez en aguas residuales ya había sido reportada previamente (Velasco-Quino et al. 2015). Ahora bien, la conductividad eléctrica refleja la concentración de iones disueltos, estando principalmente asociados a la presencia de macronutrientes. A pesar del tratamiento de fitorremediación, en este trabajo se presentó una pobre reducción en este parámetro, tal como lo reportado por Kurscheidt y colaboradores (2020). Una pobre disminución en la conductividad, o un aumento de la misma, también resulta de la liberación de nutrientes durante el proceso de descomposición de la planta (Martins et al. 2005; Malschi et al. 2018).

Tabla 6. Remoción de contaminantes en lixiviados de relleno sanitario utilizando *P. stratiotes*.

Parámetro	Inicial	Control	Final	Remoción o disminución (%)
pH	8.16 ± 0.3	8 ± 0.17	7.5 ± 0.1	8.08
t (NTU)	24.1 ± 0.26	22.67 ± 0.48	8.89 ± 1.28	63.11
CE (mS/cm)	1.64 ± 0.08	1.51 ± .01	1.61 ± 0.18	1.83
DBO ₅ (mg/L)	108.49 ± 19.7	106.49 ± 15	92.21 ± 13.1	15
DQO (mg/L)	637.33 ± 111.12	609 ± 33.1	384 ± 47.14	39.74
P (mg/L)	1.52 ± 1.25	1.19 ± 0.3	0.45 ± 0.25	70.05
NO ₃ (mg/L)	5.69 ± 0.27	5.23 ± 0.27	3.98 ± 0.49	69.94
NO ₂ (mg/L)	0.208 ± 0.002	0.212 ± 0.014	0.025 ± 0.005	87.98
ST (mg/L)	1169.98 ± 27.9	1166.6 ± 28.4	1156.6 ± 16.6	1.14
SVT (mg/L)	426.64 ± 62.7	427.23 ± 54.1	419.22 ± 22.9	1.73
SDT (mg/L)	810 ± 24.3	746.7 ± 0.48	806.66 ± 30.73	0.41

Valores promedio ± desviación estándar (n =3)

La significativa remoción de DQO (39.74%) y un tanto menos acentuada de la DBO5 (15%) también es sinónimo de una disminución de la materia orgánica susceptible a degradación, siendo menos acentuada la materia biodegradable justo por lo comentado anteriormente de la liberación de materia orgánica por las raíces de la planta, la cual, a pesar de la filtración previa a los análisis, podría estar disuelta en el medio líquido. Este fenómeno de mayor remoción de DQO (19.48%) más acentuado en comparación con la remoción de DBO (7.14%) ya ha sido previamente reportado para lixiviados en una concentración de 25% (Abbas et al. 2019).

Nuestro resultado de remoción de DQO son superiores a los obtenidos en el tratamiento de aguas residuales de una planta procesadora de caucho crudo (11.4%) (Owamah et al. 2014), no obstante nuestra remoción de DBO5 fue menor a la que ellos lograron (24.3%). Resultados análogos han sido reportados previamente para aguas residuales municipales (Shah et al. 2014). No obstante, mayores remociones de ambos parámetros se han obtenido en el tratamiento de estiércol anaeróbicamente digerido (Sooknah et al. 2004) y en aguas con menor carga contaminante donde *Pistia stratiotes* no presenta dificultades de supervivencia por toxicidad, tales como aguas residuales acuícolas (Akinbile et al. 2012), aguas residuales industriales (Victor et al. 2016), urbanas (Zimmels et al. 2009; Mendoza et al. 2018) y agua contaminada de río (Xiao et al. 2013; Robles-Pliego et al. 2015).

Con respecto a la remoción de nutrientes, es de destacar que los porcentajes de remoción de fósforo total, nitratos y nitritos fueron los más altos, con respecto a los de los demás contaminantes. Esto puede deberse a que este tipo de componentes le sirve de alimento a *Pistia*, ocupándolo en sus procesos de crecimiento y reproducción. La remoción obtenida de fósforo total en el lixiviado fue superior a lo reportado con esta especie vegetal en aguas residuales urbanas, donde ha obtenido una remoción del 25% (Zimmels et al. 2009), así como en el tratamiento de estiércol anaeróbicamente digerido, con una remoción del 64% (Sooknah et al. 2004), lo que podría llevar a pensar que los medios con una mayor carga de fósforo resultan en un mayor aprovechamiento de la especie vegetal.

Si los lixiviados con altas concentraciones de nitrógeno llegaran a cuerpos de agua receptores se podrían generar condiciones de anoxia, disminuyendo los niveles de oxígeno y afectando a la fauna en esos sitios (Jerez et al. 2016). La eficiencia de *Pistia stratiotes* en la disminución de nitratos y nitritos la convierte en una especie promisoría para evitar estos problemas. Como puede observarse en la Tabla 6, el tratamiento de control (sin plantas) también sufrió una reducción en

la DQO, DBO5 y nitratos, tal como ha sido reportado para el tratamiento de aguas residuales urbanas con *Pistia* (Mendoza et al. 2018; Zimmels et al. 2009), lo cual puede atribuirse a una degradación natural con el paso del tiempo en el lixiviado. Asimismo, se presentó un ligero aumento de nitritos en el tratamiento de control, lo que significa que aún hay conversión de nitritos a nitratos en el lixiviado, siendo mayor la tasa de remoción de estos que dicho proceso de nitrificación (Akinbile et al. 2012).

El experimento con aireación falló, pues las plantas murieron a los 4-5 días de iniciar el experimento. De acuerdo con Zimmels y colaboradores (2009), quienes probaron dos velocidades de aireación (0.2 y 0.4 L/min) en el tratamiento de aguas residuales urbanas, los procesos de aireación aceleran el proceso de absorción de contaminantes en las plantas, por lo que en el presente trabajo la carga contaminante del lixiviado tratado pudo ser muy agresiva para la planta al suministrar aireación a 1 L/min, llevando a una muerte súbita al material vegetal. El tratamiento testigo en donde se colocaron las plantas en agua con nutrientes sin lixiviado, con el mismo suministro de aire, evidenció que las plantas no murieron a causa del aire en sí, lo que sostiene la teoría de la absorción acelerada de nutrientes en presencia de lixiviado como la causa de muerte. Para encontrar la velocidad de aire que podría favorecer la eficiencia de remoción de contaminantes deberían realizarse más estudios al respecto. Pero eso sale del alcance de este trabajo.

En la Tabla 7 se muestra una tabla comparativa de los resultados obtenidos en este trabajo y algunas de las escasas investigaciones que han estudiado la evolución de *Pistia stratiotes*. En lixiviados de relleno sanitario. Algo que también es importante analizar es la gran diferencia en tamaño y en el estado final de las plantas al final del tratamiento, pues a diferencia de los otros trabajos, en el presente trabajo las plantas no presentaron severos rasgos de senescencia, quizás debido al tamaño y peso que alcanzan estas plantas en nuestra área de estudio.

Tabla 7. Comparación del presente trabajo con otras investigaciones sobre fitorremediación de lixiviados con *P. stratiotes*.

Referencia	Tipo de lixiviado	Datos experimentales	Imágenes
Presente trabajo	Lixiviado crudo (sin pretratar)	T de 25.8 °C, RH de 69.3 %, LI de 3253 lux e I de 1 526.4 mW/m ² . 2 semanas 4 plantas maduras por pecera Peso fresco: 100 g Long. de hojas: 12 cm Long. de raíz: 20 cm	<p>Inicio</p>  <p>Fin</p> 
(Kurscheidt et al. 2020)	Lixiviado pretratado convencionalmente	Condiciones ambientales no reportadas. $T_{lix} = 23.5$ °C. 4 semanas 10 plantas pequeñas por pecera	<p>Inicio</p>  <p>Fin</p> 
(Abbas et al. 2019)	Lixiviado crudo (sin pretratar)	Condiciones ambientales no reportadas. 2 semanas 30 g de plantas jóvenes por pecera	No disponibles
(Malschi et al. 2018)	Lixiviado crudo (sin pretratar)	Solo reportan experimento c/16 h de luz. 2 semanas Sin datos de plantas, solo que crecieron en invernadero.	<p>Inicio</p>  <p>Fin</p> 

10. CONCLUSIONES

Los resultados de la caracterización permitieron clasificar a los lixiviados en una edad intermedia muy cercana a una edad madura. Esta etapa es característica de una fase metanogénica conteniendo compuestos recalcitrantes producto de la degradación microbiana, los cuales permanecen en los vertederos porque los microorganismos no pueden degradarlos más (baja biodegradabilidad).

Bajo las condiciones utilizadas y las características del lixiviado, *P. stratiotes* fue capaz de tolerar una concentración del 15% de lixiviado con una adecuada integridad física y reproducción, lo que permitió continuar con los experimentos de fitorremediación.

Este estudio ha establecido que la capacidad de *Pistia stratiotes* en la eliminación de contaminantes del lixiviado del relleno sanitario El Guayabo es muy buena y factible. La fitorremediación de lixiviados del relleno sanitario “El Guayabo” al 15% permitió una remoción importante de turbidez (63%), DBO5 (15%), DQO (15%) y nutrientes como fósforo y nitrógeno inorgánico, por encima del 70%.

Se requiere de mayor investigación para poder implementar la aireación como co-tratamiento a la fitorremediación, para así encontrar las condiciones de operación adecuadas (flujo de aire, cantidad de biomasa, volumen y concentración de lixiviado, entre otros).

La caracterización y fitorremediación de los lixiviados de rellenos sanitarios que operan en México es de vital importancia para contribuir en la utilización de alternativas de tratamiento sustentables, y menos agresivas con el medio ambiente.

11. LITERATURA CITADA

- Abbas, Zohaib, Fariha Arooj, Shafaqat Ali, Ihsan Elahi Zaheer, Muhammad Rizwan, and Muhammad Ahsan Riaz. 2019. "Phytoremediation of landfill leachate waste contaminants through floating bed technique using water hyacinth and water lettuce." *International Journal of Phytoremediation* 21 (13): 1356–67. <https://doi.org/10.1080/15226514.2019.1633259>.
- Afferden, Manfred Van, Anne Hansen, Orlando Quintero, Luis Angel Barrera Morteo, Petkova Verguinia, Mintcho Lliev, Sandra Spies, and Günther Wehenpohl. 2002. *Alternativas de Rellenos Sanitarios- Guía de Toma de Decisión-*.
- Akinbile, C. O., and Mohd S. Yusoff. 2012. "Assessing water hyacinth (*Eichhornia crassipes*) and lettuce (*Pistia stratiotes*) Effectiveness in aquaculture wastewater treatment." *International Journal of Phytoremediation* 14 (3): 201–11. <https://doi.org/10.1080/15226514.2011.587482>.
- Akinbile, Christopher O., Mohd Suffian Yusoff, and Mei Shian Lee. 2012. "Leachate characterization and phytoremediation using water hyacinth (*Eichornia crassipes*) in Pulau Burung, Malaysia." *Bioremediation Journal* 16 (1): 9–18. <https://doi.org/10.1080/10889868.2011.628350>.
- Al-Jarrah, Omar, and Hani Abu-Qdais. 2006. "Municipal solid waste landfill siting using intelligent system." *Waste Management* 26 (3): 299–306. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2005.01.026>.
- Alam, Pervez, and Kafeel Ahmade. 2013. "Impact of solid waste on health and the environment." *International Journal of Sustainable Development and Green Economics*. 2 (1): 165–68.
- Arias, Carlos, and Hans Brix. 2003. "Humedales artificiales para el tratamiento de aguas residuales". *Ciencia e Ingeniería en Neogranadina*, no. 13: 17–24.
- Aurangzeb, N., S. Nisa, Y. Bibi, F. Javed, and F. Hussain. 2014. "Phytoremediation potential

- of aquatic herbs from steel foundry effluent." *Brazilian Journal of Chemical Engineering* 31 (4): 881–86. <https://doi.org/10.1590/0104-6632.20140314s00002734>.
- Barceló, Joan, and Charlotte Poschenrieder. 2003. "Phytoremediation: Principles and perspectives." *Contributions to Science* 2 (3): 333–44. <https://doi.org/10.2436/cs.v0i0.310>.
- Bhalla, Barjinder, M.S. Saini, and M.K. Jha. 2013. "Effect of age and seasonal variations on leachate characteristics of municipal solid waste landfill." *International Journal of Research in Engineering and Technology* 02 (08): 223–32. <https://doi.org/10.15623/ijret.2013.0208037>.
- Bolaños Benitez, Sandra Viviana, Juan Carlos Casas Zapata, and Néstor Jaime Aguirre Ramírez. 2008. "Análisis comparativo de la remoción de un sustrato orgánico por las macrófitas *Pistia stratiotes* y *Egeria densa* en un sistema batch." *Gestión y Ambiente* 11 (2): 39–48.
- Bonilla-barbosa, J.R., and B. Santamaría. 2014. "Plantas acuáticas exóticas y traslocads invasoras en México." *Comisión Nacional Para El Conocimiento y Uso de La Biodiversidad* 1 (January): 223–47. <https://doi.org/10.13140/2.1.2050.8967>.
- Castillo-campos, Gonzalo, Sergio Avendaño Reyes, María Teresa Mejía-Saulés, Arturo Gómez-Pompa y Lorin I Nevling. 2015. "Flora de Veracruz." In *Instituto de Ecología A.C.*, Fascículo 1:211. Instituto de Ecología A.C.
- Celis Hidalgo, José, Julio Junod Montano, and Marco Sandoval Estrada. 2005. "Recientes aplicaciones de la depuración de aguas residuales con plantas acuáticas." *Theoria* 14 (1): 17–25.
- CONABIO. 2014. "Método de evaluación rápida de invasividad (MERI) para especies exóticas en México *Pistia Stratiotes* L., 1753."
- Costa, Alyne Moraes, Raquel Greice de Souza Marotta Alfaia, and Juacyara Carbonelli Campos. 2019. "Landfill leachate treatment in Brazil – An overview." *Journal of Environmental Management* 232: 110–16. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2018.11.006>.

- Dahlan, Irvan. 2019. "Leachate Treatment." *Waste Management*, 10: 1037–54. <https://doi.org/10.4018/978-1-7998-1210-4.ch047>.
- Daud, M. K., Shafaqat Ali, Zohaib Abbas, Ihsan Elahi Zaheer, Muhammad Ahsan Riaz, Afifa Malik, Afzal Hussain, Muhammad Rizwan, Muhammad Zia-Ur-Rehman, and Shui Jin Zhu. 2018. "Potential of Duckweed (*Lemna minor*) for the phytoremediation of landfill leachate." *Journal of Chemistry* 2018. <https://doi.org/10.1155/2018/3951540>.
- Delgadillo López, Angelica Evelín, Francisco González Ramírez, César Abelardo Prieto García, José Roberto Villagómez Ibarra, and Otilio Acevedo Sandoval. 2011. "Fitorremediación: una alternativa para eliminar la contaminación." *Tropical and Subtropical Agroecosystems* 14 (2): p. 597-612.
- Demirbas, Ayhan. 2011. "Waste management, waste resource facilities and waste conversion processes." *Energy Conversion and Management* 52 (2): 1280–87. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2010.09.025>.
- Dhir, Bhupinder. 2013. *Phytoremediation: Role of Aquatic Plants in Environmental Clean-Up*. Edited by Bhupinder Dhir. *Phytoremediation: Role of Aquatic Plants in Environmental Clean-Up*. New Delhi, India: Springer India. <https://doi.org/10.1007/978-81-322-1307-9>.
- Environmental Protection Agency. 2000. "Landfill manuals landfill site design."
- Espinosa, Carmen, Matilde López, Alexis Pellón, Marlen Robert, Susana Diaz, Aimée González, Niurka Rodríguez, and Alejandro Fernández. 2001. "Análisis del comportamiento de los lixiviados generados en un vertedero de residuos sólidos municipales de la ciudad de La Habana." *Revista Internacional de Contaminacion Ambiental* 17 (4): 313–25.
- Farnese, FS, JA Oliveira, FS Lima, GA Leão, GS Gusman, and LC Silva. 2014. "Evaluation of the potential of *Pistia stratiotes* L. (Water Lettuce) for bioindication and phytoremediation of aquatic environments contaminated with arsenic." *Brazilian Journal of Biology* 74 (3 suppl 1): S108–12. <https://doi.org/10.1590/1519-6984.01113>.

- Gao, Junling, Violet Oloibiri, Michael Chys, Wim Audenaert, Bjorge Decostere, Yanling He, Herman Van Langenhove, Kristof Demeestere, and Stijn W.H. Van Hulle. 2014. "The present status of landfill leachate treatment and its development trend from a technological point of view." *Reviews in Environmental Science and Biotechnology* 14 (1): 93–122. <https://doi.org/10.1007/s11157-014-9349-z>.
- Ghosh, Suman, and Syed E Hasan. 2010. "Sanitary Landfill." In *Engineering Geology, Environmental Geology & Mineral Economics*. Vol. III.
- Giraldo, Eugenio. 2014. "Tratamiento de lixiviados de rellenos sanitarios: avances recientes." *Revista de Ingeniería* 14: 44–45. <https://doi.org/10.16924/riua.v0i14.538>.
- Jerez Ch, José A., and Rosaura M. Romero. 2016. "Evaluation of *Cajanus cajan* (Pigeon Pea) for phytoremediation of landfill leachate containing chromium and lead." *International Journal of Phytoremediation* 18 (11): 1122–27. <https://doi.org/10.1080/15226514.2016.1186592>.
- Jones, D. L., K. L. Williamson, and A. G. Owen. 2006. "Phytoremediation of landfill leachate." *Waste Management* 26 (8): 825–37. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2005.06.014>.
- Kalčíková, Gabriela, Jana Zagorc-Končan, Marija Zupančič, and Andreja Žgajnar Gotvajn. 2012. "Variation of landfill leachate phytotoxicity due to landfill ageing." *Journal of Chemical Technology and Biotechnology* 87 (9): 1349–53. <https://doi.org/10.1002/jctb.3776>.
- Kamaruddin, Mohamad Anuar, Mohd. Suffian Yusoff, Hamidi Abdul Aziz, and Yung-Tse Hung. 2015. "Sustainable treatment of landfill leachate." *Applied Water Science* 5 (2): 113–26. <https://doi.org/10.1007/s13201-014-0177-7>.
- Khan, Muhammad Azim, Khan Bahadar Marwat, Bakhtiar Gul, Fazli Wahid, Haroon Khan, and Saima Hashim. 2014. "*Pistia stratiotes* L. (Araceae): Phytochemistry, Use in Medicines, Phytoremediation, Biogas and Management Options." *Pakistan Journal of Botany* 46 (3): 851–60.

- Kjeldsen, Peter, Morton A. Barlaz, Alix P. Rooker, Anders Baun, Anna Ledin, and Thomas H. Christensen. 2002. "Present and long-term composition of MSW landfill leachate: A Review." *Critical Reviews in Environmental Science and Technology* 32 (4): 297–336. <https://doi.org/10.1080/10643380290813462>.
- Kulikowska, Dorota, and Ewa Klimiuk. 2008. "The effect of landfill age on municipal leachate composition." *Bioresource Technology* 99 (13): 5981–85. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2007.10.015>.
- Kurniawan, Tonni Agustiono, Waihung Lo, G. Chan, and Mika E.T. Sillanpää. 2010. "Biological processes for treatment of landfill leachate." *Journal of Environmental Monitoring* 12 (11): 2032–47. <https://doi.org/10.1039/c0em00076k>.
- Kurscheidt, Elãine Cristina de Souza, Selma Aparecida Cubas, Miguel Mansur Aisse, and Leila Teresinha Maranhão. 2020. "Tolerância da *Pistia stratiotes* e *Eichhornia crassipes* ao lixiviado gerado em aterro sanitário." *Brazilian Journal of Development* 6 (3): 14909–26. <https://doi.org/10.34117/bjdv6n3-389>.
- Lavagnolo, Maria Cristina, Mario Malagoli, Francesco Garbo, Alberto Pivato, and Raffaello Cossu. 2016. "Lab-scale phytotreatment of old landfill leachate using different energy crops." *Waste Management* 55: 265–75. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2016.06.016>.
- León Romero, Jimmy Andrés. 2017. "Una mirada a la fitorremediación en latinoamérica". Tesis de grado. Especialización en Biotecnología Agraria. UNAD.
- López Guerrero, Andrés Felipe, and Iván Andrés Sánchez Ortiz. 2015. "Postratamiento en escala piloto del lixiviado del relleno sanitario Antana (Pasto-Nariño) por filtración-adsorción con arena, antracita y carbón activado." *Revista de Ingeniería* 43: 10–15. <https://doi.org/http://dx.doi.org/10.16924/riua.v0i43.840>.
- Madera-Parra, Carlos A. 2016. "Treatment of landfill leachate by polyculture constructed wetlands planted with native plants." *Ingeniería y Competitividad* 18 (2): 183–91. <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=291346311017%0AHow>.

- Malschi, Dana, Liviu Muntean, Ioan Oprea, Carmen Roba, Gabriela Popița, Lucrina Ștefănescu, Bianca Malschi Florian, and Elena Rîmba. 2018. "Research on wastewaters bioremediation with aquatic species for constructed wetlands." *Environmental Engineering and Management Journal* 17 (7): 1753–64. <https://doi.org/10.30638/eemj.2018.174>.
- Malschi, Dana, Ioan C. Oprea, Lucrina Stefanescu, Gabriela E. Popita, Dorian Ioan Brahaita, Elena Rinba, and Rozalia Kadar. 2015. "Research on wastewater phytoremediation using aquatic species for heavy metals phytoextraction and bioaccumulation." *Environmental Engineering and Management Journal* 14 (11): 2577–89. <https://doi.org/10.30638/eemj.2015.275>.
- Marrero-Coto, Jeannette, Isis Amores-Sánchez, and Orquídea Coto-Pérez. 2012. "Fitorremediación, una tecnología que involucra a plantas y microorganismos en el saneamiento ambiental." *ICIDCA : sobre los derivados de la caña de azúcar* 46 (3): 52–61.
- Martelo, Jorge, and Jaime A Lara Borrero. 2012. "Macrófitas flotantes en el tratamiento de aguas residuales: una revisión del estado." *Ingeniería y Ciencia* 8: 221–43.
- Martínez-López, A.G, W Padrón-Hernández, O.F Rodríguez Bernal, O. Chiquito-Coyotl, M.A. Escarola-Rosas, J.M. Hernández-Lara, E.A. Elvira Hernández, G.A. Méndez, J.C. Tinoco-Magaña, and J. Martínez -Castillo. 2014. "Alternativas actuales del manejo de lixiviados." *Avances En Química* 9: 37–47.
- Martínez Jiménez, Maricela. 2018. "Manual para la identificación de plantas acuáticas exóticas invasoras en México."
- Martins, A.T., and R.A. Pitelli. 2005. "Efeitos do manejo de *Eichhornia crassipes* sobre a qualidade da Água em condições de mesocosmos." *Planta Daninha* 23 (2): 233–42. <https://doi.org/10.1590/s0100-83582005000200009>.
- Méndez, Roger, Elba Castillo, María Rosa Sauri, Carlos Quintal, Germán Giacoman, and Blanca Jiménez. 2004. "Tratamiento fisicoquímico de los lixiviados de un relleno

sanitario.” *Ingeniería* 8 (2): 155–63.

Mendoza, Yoma I., Jhonny I. Pérez, and Andres A. Galindo. 2018. “Evaluación del aporte de las plantas acuáticas *Pistia stratiotes* y *Eichhornia crassipes* en el tratamiento de aguas residuales municipales.” *Información Tecnológica* 29 (2): 205–14. <https://doi.org/10.4067/s0718-07642018000200205>.

Novelo, Roger Iván Méndez, Elba René Castillo Borges, María Rosa Sauri Riancho, Carlos Alberto Quintal Franco, Germán Giacomán Vallejos, and Blanca Jiménez Cisneros. 2009. “Comparación de cuatro tratamientos fisicoquímicos de lixiviados.” *Revista Internacional de Contaminación Ambiental* 25 (3): 133–45.

Núñez López, Roberto Aurelio, Yunny Meas Vong, Raúl Ortega Borges, and Eugenia J. Olguín. 2018. “Fitorremediación: fundamentos y aplicaciones.” *Diversity* 10 (1): 69–83. <https://doi.org/10.3390/D10010016>.

Ogwueleka, T.Ch. 2009. “Municipal solid waste characteristics and management in Nigeria.” *Iran. J. Environ. Health. Sci. Eng.* 6 (4): 173–80. <https://doi.org/10.2307/1053151>.

Olguín, Eugenia J., Daniel A. García-López, Ricardo E. González-Portela, and Gloria Sánchez-Galván. 2017. “Year-round phytofiltration lagoon assessment using *Pistia stratiotes* within a pilot-plant scale biorefinery.” *Science of the Total Environment* 592: 326–33. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.03.067>.

Organization, European and Mediterranean Plant Protection. 2017. “*Pistia stratiotes* L.” *EPPO Bulletin*. Vol. 47. <https://doi.org/10.1111/epp.12429>.

Owamah, H. I., M. A. Enaboifo, and O. C. Izinyon. 2014. “Treatment of wastewater from raw rubber processing industry using water lettuce macrophyte pond and the reuse of its effluent as biofertilizer.” *Agricultural Water Management* 146: 262–69. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2014.08.015>.

Owusu-Nimo, Frederick, Sampson Oduro-Kwarteng, Hellen Essandoh, Farida Wayo, and Mohammed Shamudeen. 2019. “Characteristics and management of landfill solid waste

- in Kumasi, Ghana.” *Scientific African* 3. <https://doi.org/10.1016/j.sciaf.2019.e00052>.
- Paris, C., H. Hadad, M. A. Maine, and N. Suñe. 2005. “Eficiencia de dos macrófitas flotantes libres en la absorción de metales pesados.” *Limnetica* 24 (3–4): 237–44.
- Pazoki, Maryam, Mohammad Ali Abdoli, Abdolreza Karbassi, Naser Mehrdadi, and Kamyar Yaghmaeian. 2014. “Attenuation of municipal landfill leachate through land treatment.” *Journal of Environmental Health Science and Engineering* 12 (1): 1–8. <https://doi.org/10.1186/2052-336X-12-12>.
- Peng, Yao. 2017. “Perspectives on technology for landfill leachate treatment.” *Arabian Journal of Chemistry* 10: S2567–74. <https://doi.org/10.1016/j.arabjc.2013.09.031>.
- Peralta-Peláez, Luis Alberto, and Patricia Moreno-Casasola. 2009. “Composición florística y diversidad de la vegetación de humedales en los lagos interdunarios de Veracruz.” *Boletín de La Sociedad Botánica de México*. Vol. 85. Veracruz, México. <https://doi.org/10.17129/botsoci.2307>.
- Placencia, William Patricio Cueva. 2016. “Evaluación del potencial fitorremediador de dos especies (*Pistia stratiotes* L.) y (*Limnobium laevigatum* R.) para el tratamiento de lixiviados producidos en el relleno sanitario del Canton Centinela Del Condor, Provincia Zamora Chinchipe.” Universidad Nacional de Loja. http://dspace.unl.edu.ec:9001/jspui/bitstream/123456789/17583/1/CUEVA_PLACENCIA_WILLAM_PATRICIO_TESIS_DE_GRADO_12_12_2016.pdf.
- Prasanna, Kumarathilaka, Wijesekara Hasintha, Bolan Nanthi, Kunhikrishnan Anitha, and Vithanage Meththika. 2017. “Phytoremediation of landfill leachates.” In *Phytoremediation: Management of Environmental Contaminants, Volume 5*, edited by Abid A. Ansari, Sarvajeet Singh Gill, Ritu Gill, Guy R. Lanza, and Lee Newman, 1st ed., 1–514. Springer International Publishing. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-52381-1>.
- Preussler, K. H., C. F. Mahler, and L. T. Maranhão. 2015. “Performance of a system of natural wetlands in leachate of a posttreatment landfill.” *International Journal of Environmental Science and Technology* 12 (8): 2623–38. <https://doi.org/10.1007/s13762-014-0674-0>.

- PROFEPA. 2015. "Ley General Para La Prevención y Gestión Integral de Los Residuos. Diario Oficial de La Federación.," 1–52. <https://www.profepa.gob.mx/innovaportal/file/6633/1/nom-161-semarnat-2011.pdf>.
- Ramos Montaña, Carolina, Nancy Milena Cárdenas-Avella, and Yimy Herrera Martínez. 2013. "Caracterización de la comunidad de macrófitas acuáticas en lagunas del páramo de la Rusia (Boyacá-Colombia)." *Revista Ciencia En Desarrollo* 4 (2): 73–82.
- Ranzi, B D, A B Castilhos Junior, Almeida Duarte, and J Tavares. 2009. "Evaporation phenomenon as a sustainable solution for landfill leachate treatment." *Proceedings Sardinia Margherita Di Pula*.
- Renou, S., J. G. Givaudan, S. Poulain, F. Dirassouyan, and P. Moulin. 2008. "Landfill leachate treatment: review and opportunity." *Journal of Hazardous Materials* 150 (3): 468–93. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2007.09.077>.
- Robles-Martínez, F, Y Morales-López, AB Piña-Guzmán, O Espíndola-Serafín, LR Tovar-Gálvez, and G Valencia-del Toro. 2011. "Medición de pH y cuantificación de metales pesados en los lixiviados del relleno sanitario más grande de la zona metropolitana de la Ciudad de México." *Universidad y Ciencia* 27 (2): 121–32. <https://doi.org/10.19136/era.a27n2.117>.
- Robles-Pliego, Mariana, Eugenia J. Olguín, Javier Hernández-Landa, Ricardo E. González-Portela, Gloria Sánchez-Galván, and Flor Cuervo-López. 2015. "Dual purpose system for water treatment from a polluted river and the production of *Pistia stratiotes* biomass within a biorefinery." *Clean - Soil, Air, Water* 43 (11): 1514–21. <https://doi.org/10.1002/clen.201400222>.
- Sánchez, G C, N E Camaño Silvestrini, C I Gonzalez, M C Pedro, S E Caffaratti, H R Hadad, and M A Maine. 2013. "Rol de macrófitas en la remoción de contaminantes de un lixiviado de relleno sanitario utilizando un wetland construido subsuperficial." *AAIQ Asociación Argentina de Ingenieros Químicos - CSPQ*, 2013.

- SECOFI. 2001a. NMX-AA-028-SCFI-2001 Análisis de agua - Determinación de la Demanda Bioquímica de Oxígeno en aguas naturales, residuales (DBO₅) y residuales tratadas - Método de prueba. *Diario oficial de la federación*.
- . 2001b. “NMX-AA-029-SCFI-2001-Análisis de Aguas - Determinación de Fósforo Total en aguas naturales, residuales y residuales tratadas - Método de prueba.” *Diario oficial de la federación*.
- . 2001c. NMX-AA-038-SCFI-2001 -Determinación de Turbiedad en aguas naturales, residuales y residuales tratadas. *Diario Oficial de La Federación*.
- . 2001d. “NMX-AA-079-SCFI-2001 Análisis de Aguas - Determinación de Nitratos en aguas naturales, potables, residuales y residuales tratadas - Método de prueba.” *Diario oficial de la federación*.
- . 2001e. “NMX-AA034-SCFI-2001 Análisis de agua - Determinación de Sólidos y Sales Disueltas en aguas naturales, residuales y residuales tratadas - Método de prueba (Cancela a Las NMX-AA-020-1980 Y NMX-AA-034-1981).” *Diario Oficial de La Federación*, 18.
- . 2006. NMZ-AA-099-SCFI-2006 Análisis de agua – Determinación de Nitrógeno de Nitritos en aguas naturales y residuales – Métodos de prueba (Cancela a La NMX-AA-099-1987). *Diario Oficial de La Federación*.
- . 2011. NMX-AA-030/2-SCFI-2011 Determinación de la Demanda Química de Oxígeno en aguas naturales, residuales y residuales tratadas - Método de prueba. *Diario Oficial de La Federación*.
- . 2016. NMX- AA-008-SCFI Análisis de agua- Medición del pH en aguas naturales, residuales y residuales tratadas. *Diario Oficial de La Federación*.
- . 2017. NMX-AA-093-SCFI-2018 Análisis de agua - Medición de la Conductividad Eléctrica en aguas naturales, residuales y residuales tratadas - Método de prueba. *Diario Oficial de La Federación*.

- SEFIPLAN. 2016. *Sistema de información municipal. Cuadernillos municipales, 2016*. Secretaría de Finanzas y Planeación del Estado de Veracruz. Disponible en: <http://ceieg.veracruz.gob.mx/cuadernillos-municipales-2016/>
- SEMARNAT. 2004. NOM-083-SEMARNAT-2003, Especificaciones de protección ambiental para la selección del sitio, diseño, construcción, operación, monitoreo, clausura y obras complementarias de un sitio de disposición final de residuos sólidos urbanos y de manejo especial. México: *Diario Oficial de la Federación*.
- . 2008. “Capítulo 7. Residuos.” In *Informe de la situación del medio ambiente en México. Compendio de Estadísticas Ambientales.*, edited by Yonatan Aguilar Cruz, Mildred Castro Hernández, Miguel Chipole Ibáñez, Teresa González Ruiz, Miguel de Jesús Gutiérrez Ladrón de Guevara, and Edmundo Huerta Patricio, 1a ed., 326–57. México, DF.: Sistema Nacional de Información Ambiental y de Recursos Naturales (SNIARN). https://apps1.semarnat.gob.mx:8443/dgeia/informe_2008/00_intros/pdf.html.
- . 2015. “En un mar de residuos: El cambio necesario.” México, DF.
- . 2016. “Residuos.” In *Informe de la situación del medio ambiente en México 2015. Compendio de estadísticas ambientales, indicadores clave de desempeño ambiental y de crecimiento verde.*, 5th ed., 429–70. Cd. de México: Sistema Nacional de Información Ambiental y de Recursos Naturales (SNIARN).
- . 2018. “La mayor parte de los residuos son reutilizables y reciclables si se separan | Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales | Gobierno | Gob.Mx.” 2018. <https://www.gob.mx/semarnat/articulos/la-mayor-parte-de-los-residuos-son-reutilizables-y-reciclables-si-se-separan?idiom=es>.
- . 2019. “Tiraderos a cielo abierto dañan ambiente y salud humana | Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales | Gobierno | Gob.Mx.” 2019. <https://www.gob.mx/semarnat/es/articulos/tiraderos-a-cielo-abierto-danan-ambiente-y-salud-humana?idiom=es>.

- Shah, Mumtaz, Hashim Nisar Hashmi, Arshad Ali, and Abdul Razzaq Ghumman. 2014. "Performance assessment of aquatic macrophytes for treatment of municipal wastewater." *Journal of Environmental Health Science and Engineering* 12 (1): 1–12. <https://doi.org/10.1186/2052-336X-12-106>.
- Silvestrini, Nahuel Ernesto Camaño, Hernán Ricardo Hadad, María Alejandra Maine, Gabriela Cristina Sánchez, María del Carmen Pedro, and Sandra Ester Caffaratti. 2019. "Vertical flow wetlands and hybrid systems for the treatment of landfill leachate." *Environmental Science and Pollution Research* 26 (8): 8019–27. <https://doi.org/10.1007/s11356-019-04280-5>.
- Söğüt, Zerrin, B. Zeynep Zaimoğlu, Reyhan Erdoğan, and M. Yavuz Sucu. 2005. "Phytoremediation of landfill leachate using *Pennisetum clandestinum*." *Journal of Environmental Biology* 26 (1): 13–20.
- Sooknah, Reeta D., and Ann C. Wilkie. 2004. "Nutrient removal by floating aquatic macrophytes cultured in anaerobically digested flushed dairy manure wastewater." *Ecological Engineering* 22 (1): 27–42. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2004.01.004>.
- Sumathi, V. R., Usha Natesan, and Chinmoy Sarkar. 2008. "GIS-based approach for optimized siting of municipal solid waste landfill." *Waste Management* 28 (11): 2146–60. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2007.09.032>.
- Torres Lozada, Patricia, Luz Edith Barba Ho, César Ojeda, Jonier Martínez, and Yulieth Castaño. 2014. "Influencia de la edad de lixiviados sobre su composición físico-química y su potencial de toxicidad." *Revista U.D.C.A Actualidad & Divulgación Científica* 17 (1): 245–56. <https://doi.org/10.31910/rudca.v17.n1.2014.960>.
- Ugya, Adamu Yunusa, and Agamuthu Priatamby. 2016. "Phytoremediation of landfill leachates using *Pistia stratiotes*: A case study of Kinkinau U/Ma'azu Kaduna, Nigeria." *Journal of Chemical, Environmental and Biological Engineering* 1 (1): 7–10. <https://doi.org/10.11648/j.ajbes.20160204.16>.
- Velasco Quino, Hazel Jaqueline, Yazmín Martínez Wandestrang, Sandy León Rivera, Rosa

- Icela Orozco, Lilia Irene, Gómez Ramírez, Carmen Vázquez, et al. 2015. "Eficiencia de dos plantas acuáticas (*Eichornia crassipes* y *Pistia stratiotes*) Para el tratamiento de agua residual."
- Velásquez, Johana Andrea. 2017. "Contaminación de suelos y aguas por hidrocarburos en Colombia. Análisis de la fitorremediación como estrategia biotecnológica de recuperación." *Revista de Investigación Agraria y Ambiental* 8 (1): 151–68.
- Victor, Kouamé Kouamé, Yapoga Séka, Kouadio Kouakou Norbert, Tidou Abiba Sanogo, and Atsé Boua Celestin. 2016. "Phytoremediation of wastewater toxicity using water hyacinth (*Eichornia crassipes*) and water lettuce (*Pistia stratiotes*)." *International Journal of Phytoremediation* 18 (10): 949–55. <https://doi.org/10.1080/15226514.2016.1183567>.
- Wiszniewski, J., D. Robert, J. Surmacz-Gorska, K. Miksch, and J. V. Weber. 2006. "Landfill leachate treatment methods: a review." *Environmental Chemistry Letters* 4 (1): 51–61. <https://doi.org/10.1007/s10311-005-0016-z>.
- Xiao, Jibo, Huiming Wang, Shuyi Chu, and Ming Hung Wong. 2013. "Dynamic remediation test of polluted river water by eco-tank system." *Environmental Technology (United Kingdom)* 34 (4): 553–58. <https://doi.org/10.1080/09593330.2012.704405>.
- Xiao, Yi, Xuemei Bai, Zhiyun Ouyang, Hua Zheng, and Fangfang Xing. 2007. "The composition, trend and impact of urban solid waste in Beijing." *Environmental Monitoring and Assessment* 135 (1–3): 21–30. <https://doi.org/10.1007/s10661-007-9708-0>.
- Zimmels, Y., F. Kirzhner, and A. Kadmon. 2009. "Effect of circulation and aeration on wastewater treatment by floating aquatic plants." *Separation and Purification Technology* 66 (3): 570–77. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2009.01.019>.

ANEXOS

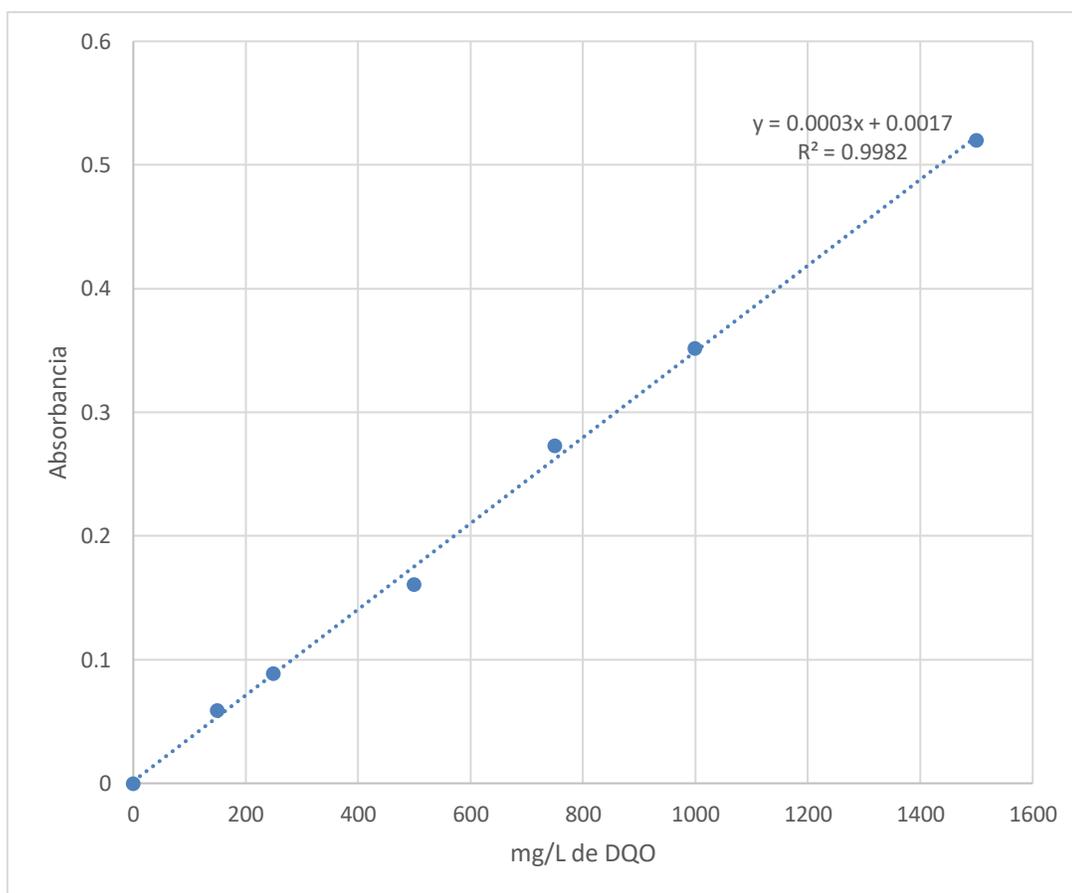


Figura A1. Curva de calibración para determinación de DQO.

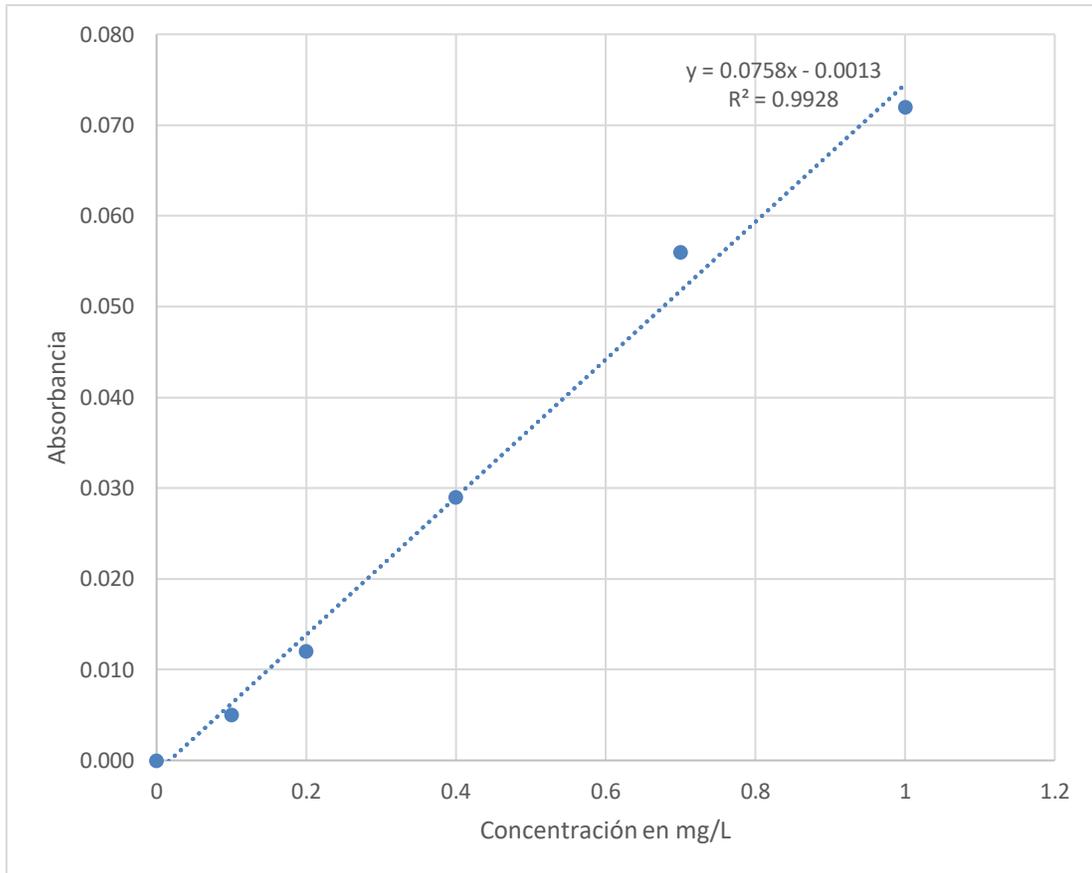


Figura A2. Curva de calibración para determinación de Nitratos.

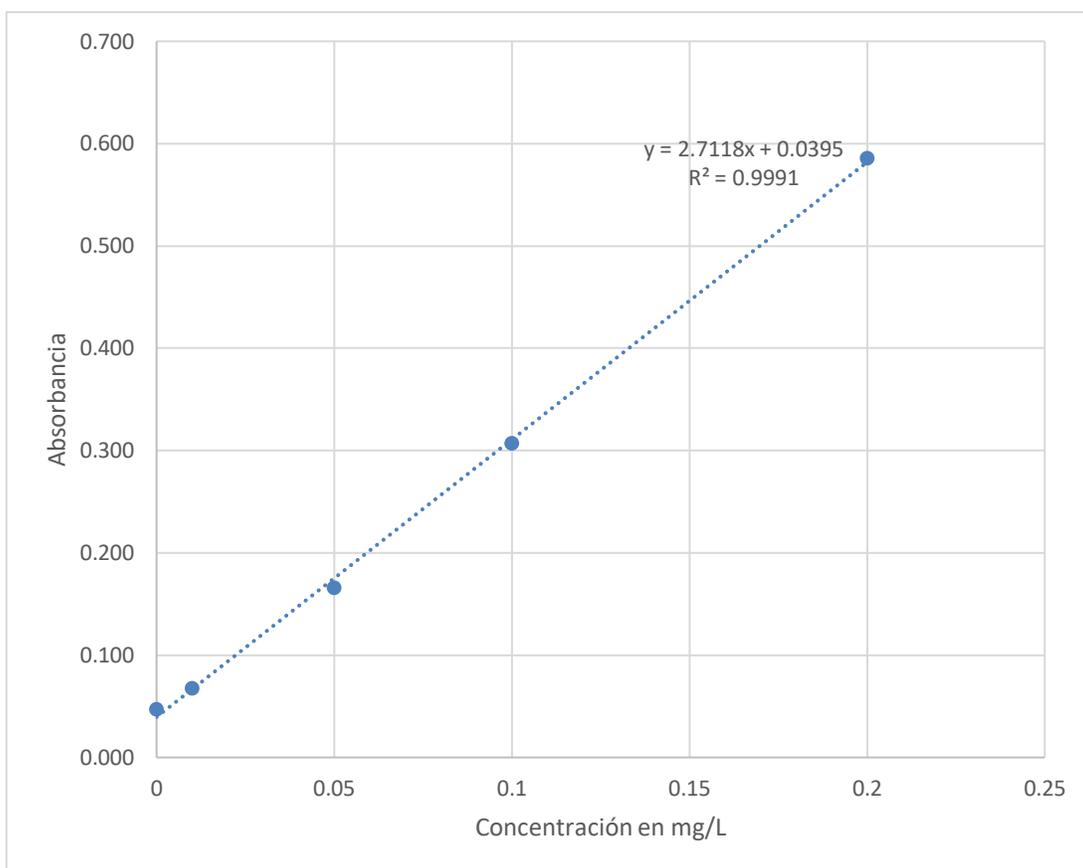


Figura A3. Curva de calibración para determinación de Nitritos.

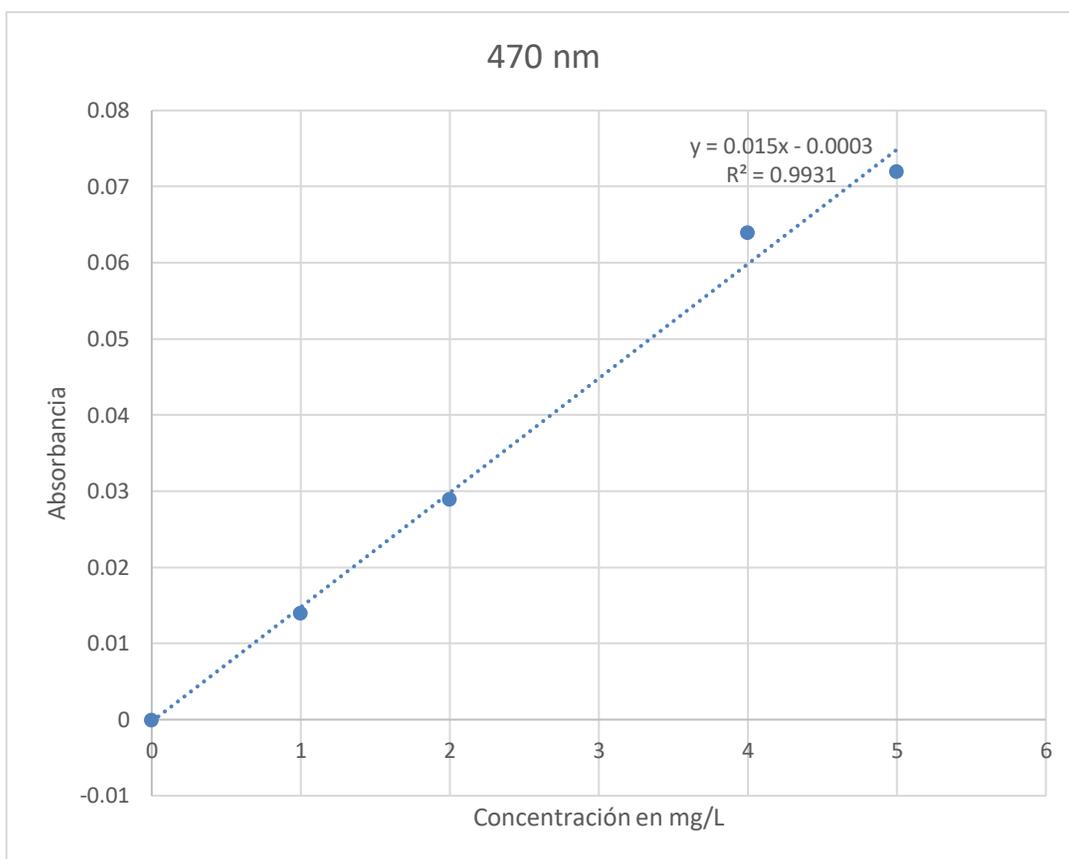


Figura A4. Curva de calibración para determinación de Fósforo.