

Efectividad del Almidón Obtenido de Desechos de Papa y Plátano Para el Tratamiento de Lixiviados Effectiveness of Starch Obtained from Potato and Banana Waste for the Treatment of Leachate

Isabel A. Amaro-Espejo^{1†} , Paula Zúñiga-Ruiz¹ , Karla L. Pérez-Torres¹ ,
Rocío G. Bernal-Ramírez¹ y Christian Reyes-Velázquez¹

¹ Tecnológico Nacional de México, Instituto Tecnológico de Boca del Río. Carretera Veracruz-Córdoba Km 12, Col. Los Pinos. 94294 Boca del Río, Veracruz, México; (I.A.A.E.), (P.Z.R.), (K.L.P.T.), (R.G.B.R.), (C.R.V.).

† Autora para correspondencia isabelamaro@bdelrio.tecnm.mx

RESUMEN

La producción de lixiviados que generan los rellenos sanitarios se ha convertido en una fuente de contaminación de cuerpos de agua. El método de coagulación-floculación se ha empleado para la remoción de contaminantes en los lixiviados con el uso de coagulantes químicos. En la búsqueda de coagulantes naturales, el almidón obtenido de los residuos de papa y plátano se han considerado como una alternativa para este proceso. El objetivo del presente estudio fue evaluar la efectividad de remoción de contaminantes presentes en lixiviados de un relleno sanitario con el uso de almidón de papa y almidón de plátano obtenidos de residuos agroindustriales. Se realizó la extracción de almidón de papa y plátano por el método de vía húmeda (VH) y vía seca (VS). Se determinó la mejor dosis de almidón y pH para obtener una mayor remoción de turbidez. Posteriormente se realizaron cuatro tratamientos T-A (Sulfato de Aluminio), T-AB (Sulfato y almidón de plátano), T-AC (Sulfato y almidón de papa) y T-BC (Almidón de papa y plátano), mediante la prueba de coagulación-floculación; este se realizó de acuerdo con la técnica estándar de ASTM International usando un equipo de jarras. Se determinó turbidez, DQO y se calculó el porcentaje de remoción de cada uno. Se realizó un análisis de varianza y una prueba de Tukey usando el programa Statistic 7. Los resultados demostraron que la acidificación previa del lixiviado a pH de 2.5, ofrece mejores resultados en la remoción de turbidez de 70.1-83.7% y una DQO de 37.8-39.6% en todos los tratamientos, y no se encontraron diferencias significativas entre estos. Se concluye que los coagulantes naturales obtenidos de los residuos de papa y plátano son más efectivos a un pH ácido, y son una alternativa para reducir el uso de coagulantes químicos y minimizar su impacto en el ambiente.

Palabras clave: coagulación-floculación, coagulante natural, remoción, residuos agroindustriales.

SUMMARY

The production of landfill leachate has become a source of water pollution. The coagulation-flocculation method has been used to remove contaminants from leachate using chemical coagulants. In the search for natural coagulants, starch obtained from potato and plantain waste has been considered as an alternative for this process. The objective of this study was to evaluate the effectiveness of contaminant removal from landfill leachate using potato and plantain starch obtained from agro-industrial waste. Potato and plantain starch were extracted using both wet and dry methods. The optimal starch dosage and pH for maximum turbidity removal were determined. Subsequently, four treatments were evaluated: T-A (aluminum



Cita recomendada:

Amaro-Espejo, I. A., Zúñiga-Ruiz, P., Pérez-Torres, K. L., Bernal-Ramírez, R. G., & Reyes-Velázquez, C. (2026). Efectividad del Almidón Obtenido de Desechos de Papa y Plátano Para el Tratamiento de Lixiviados. *Terra Latinoamericana*, 44, 1-10. e2219. <https://doi.org/10.28940/terralatinoamericana.v44i.2219>

Recibido: 28 de enero de 2025.

Aceptado: 3 de enero de 2026.

Artículo. Volumen 44.

Marzo de 2026.

Editor de Sección:

Dr. Circe Aidín Aburto-González

Editor Técnico:

Dr. José Gregorio Joya Dávila



Copyright: © 2026 by the authors.

Submitted for possible open access publication under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY NC ND) License (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>).

sulfate), T-AB (sulfate + plantain starch), T-AC (sulfate + potato starch), and T-BC (potato + plantain starch), using the coagulation-flocculation method. This analysis was performed according to ASTM International standard procedures using jar test equipment. Turbidity and chemical oxygen demand (COD) were determined, and their removal percentages were calculated. Analysis of variance and Tukey's test were performed using STATISTICA 7 software. The results showed that pre-acidification of the leachate to pH 2.5 yielded better turbidity removal (70.1–83.7%) and COD removal (37.8–39.6%) across all treatments, with no significant differences among them. It is concluded that natural coagulants obtained from potato and plantain waste are more effective under acidic pH conditions and represent an alternative to reduce the use of chemical coagulants and minimize their environmental impact.

Index words: *coagulation-flocculation, natural coagulant, removal, agro-industrial waste.*

INTRODUCCIÓN

En la actualidad existe una gran preocupación por la generación excesiva de residuos sólidos urbanos que son depositados en rellenos sanitarios y tiraderos a cielo abierto. No obstante, estos sitios de disposición final se han convertido en una de las fuentes principales de contaminación de aguas superficiales y subterráneas, ya que a través de los residuos se genera una excesiva producción de lixiviados (Singh, Raju, Gossel y Wycisk, 2016; Longe y Enekwechi, 2007). Los lixiviados son líquidos que se van generando por la liberación del agua de los componentes orgánicos y por la percolación de agua pluvial que a través de los estratos de los residuos sólidos que se encuentran en las fases de descomposición van infiltrándose (Daniel, Ekeleme, Onuigbo, Ikpeazu y Obiekezie, 2021). Debido a que los lixiviados se componen de grandes cantidades de materia orgánica disuelta, sales, iones de metales pesados y otros compuestos inorgánicos, presentan una amenaza potencial a los ecosistemas circundantes (Köfalusi y Aguilar, 2006; Abdel-Shafy, Ibrahim, Al-Sulaiman y Okasha, 2015).

No obstante, existen diferentes métodos para tratar el lixiviado producido en los rellenos sanitarios con el fin de disminuir la contaminación y el efecto negativo al medio ambiente. Uno de esos procesos es la coagulación-floculación, método más utilizado para el tratamiento de aguas residuales, en el cual los coagulantes son capaces de neutralizar las cargas electrostáticas de los coloides suspendidos, permitiendo su aglomeración hasta formar macropartículas de fácil sedimentación, esto da como resultado la remoción de materia orgánica e inorgánica, así como cambios aparentes en el aspecto del color del agua, entre otros (Aragaw y Bogale, 2023). Para este proceso se aplican coagulantes químicos como el cloruro férrico, sulfato de aluminio, polímeros orgánicos y carbonato de calcio que ayudan a desestabilizar las partículas presentes en segundos, sin embargo, algunos de estos son costosos y en otros casos han mostrado efectos adversos en el ambiente (Meza-Leones, Riaños, Mercado, Olivero y Jurado, 2018).

Actualmente las investigaciones se han dirigido en la búsqueda de alternativas para sustituir a los coagulantes químicos a través del uso de diferentes subproductos naturales que actúan de manera eficiente y sin efectos tóxicos al ambiente. La mayoría de los coagulantes naturales son de origen vegetal, ya que cuentan con agentes coagulantes activos como proteínas y carbohidratos (Trujillo *et al.*, 2014). Los coagulantes naturales usualmente muestran dos tipos de mecanismos, los cuales son adsorción, neutralización de carga, así como adsorción y formación de puentes entre partículas. Como su peso molecular es alto y contiene una estructura de cadena larga, ofrece una gran cantidad de sitios de adsorción disponibles. El uso de coagulantes naturales ha traído ventajas importantes y cambios positivos, pueden llegar a ser muy eficientes removiendo porcentajes altos como los coagulantes químicos (Carrasquero *et al.*, 2017). La utilización de almidones como coagulantes naturales ofrece ventajas sobre los coagulantes químicos ya que son biodegradables, económicos y generan menos lodos; cuando los coagulantes se combinan con los químicos promueve la disminución de los costos de adquisición y reduce el uso de coagulantes inorgánicos y por consiguiente menor impacto en el ambiente (Mohammad-Ali, Megat, Saleh, Mohd y Ibrahim, 2024).

Sin embargo, los desafíos del uso de los coagulantes naturales para el tratamiento de lixiviados se basan en la estandarización del proceso de coagulación-floculación. Por lo anterior, esta investigación se centra en el aprovechamiento de residuos agroindustriales que pueden ser utilizados como coagulantes naturales. La FAO (2015) ha reportado que en el mundo se desperdicia 1.3 mil millones de toneladas de alimentos, donde el 45% corresponden a vegetales. Muchos de los residuos no cumplen con la calidad para el consumidor y son desechados; en México se ha reportado que se desperdicia el 53.8% de plátano verde y tabasco (FAO, 2015).

Por otra parte, Khanal et al. (2024) mencionaron que la OMS en 2021 reportó una producción de 376 millones de toneladas métricas de patatas a nivel mundial y para 2030 se originarán alrededor de 8000 kilotonnes de residuos de cáscara de patata, con emisiones de gases de efecto invernadero relacionadas de 5 millones de toneladas de CO₂ equivalente. El objetivo del presente trabajo fue evaluar el uso de almidón obtenido de residuos de papa (*Solanum tuberosum*) y plátano (*Musa balbisiana*) como coagulante natural para el tratamiento de lixiviado de un relleno sanitario a través del proceso de coagulación-floculación.

MATERIALES Y MÉTODOS

Obtención de Almidón

Fueron recolectados desechos de papa (*Solanum tuberosum* L.) y plátano (*Musa paradisiaca* L.) proveniente de mercados locales en donde incluían plátano verde y papas que no cumplen con la calidad de comercialización; también se recolectaron cáscara de papa y plátano que provenían de un restaurante local. Estos se colocaron en bolsas de polietileno por separado y se transportaron al laboratorio. Se realizó la obtención del almidón por dos métodos: el método de vía seca (VS) de acuerdo Hernández, Martínez, Contreras y Pérez (2017), el cual inició con el lavado de los residuos con agua potable para retirar cualquier suciedad superficial y fueron escurridos. Posteriormente los residuos fueron cortados en trozos de 2 cm y pesados; después de esto se metieron a un primer secado a 65 °C durante 10 min y un segundo secado por 8 min a 25 °C el cual se repitió por 8 veces. Finalmente, los residuos secos se molieron hasta obtener un polvo fino, y fueron pasados por tamices de 900 y 500 micrones utilizando una Tamizadora horizontal Ro-Tap modelo RX-812. El polvo fino obtenido, se pesó y guardó en bolsas herméticas y se almacenaron en un desecador.

La obtención de almidón por el método de por vía húmeda (VH) adaptado de Mazzeo, Alzate y Marín (2008) y Cárdenas (2018¹). Las muestras fueron lavadas con agua potable, escurridas, y troceadas en tamaño de 2 cm. Los desechos se dejaron reposar por 3 minutos, y posteriormente fueron triturados con un 10% de agua destilada. Se procedió con un filtrado por cinco veces utilizando una tela fina. La suspensión obtenida se depositó en un recipiente de plástico y se dejó en reposo durante una hora, y se retiró el sobrenadante. El almidón obtenido se deshidrató a 35 °C por 14 h., el cual fue pesado y conservado en bolsas de polietileno. Para cada caso, se realizó el cálculo de rendimiento de los tratamientos de obtención de almidón por cada método, mediante la diferencia del peso inicial y peso final y el cual fue reportado en porcentaje.

Caracterización del Lixiviado

Se realizó la recolección de muestras de lixiviado de un relleno sanitario, el cual se realizó en temporada de estiaje en el mes de marzo. La muestra fue recolectada en un recipiente de polietileno con capacidad de 6 L, y posteriormente fue trasladado al laboratorio donde fue almacenado en refrigeración a 5 °C. Se determinó el pH, turbidez y DQO en el lixiviado, ya que estos datos permitirán los cálculos de remoción después del tratamiento.

Para el pH se utilizó un potenciómetro de mesa CONSORT modelo C6010. Para la medición de turbidez, se tomaron 10 mL del líquido sobrenadante utilizando un turbidímetro digital de mesa modelo WGZ-200, con intervalo de medición de 0.00-500 NTU. El análisis de la demanda química de oxígeno (DQO) se realizó con base en la norma mexicana NMX-AA-030/1-SCFI-2012 (SE, 2012) con ayuda de una curva de calibración utilizando biftalato de potasio. Se colocaron 2 mL de muestra diluida de lixiviado (1:25) en tubos de vidrio con taparrosca; posteriormente se añadió 1 mL de solución digestora y 2 mL de solución de ácido sulfúrico. El contenido de los tubos se agitó suavemente y se colocaron en una placa digestora a 150 °C durante aproximadamente 2 h. Transcurrido el tiempo, se realizó la lectura espectrofotométrica a 620 nm a temperatura ambiente.

Proceso de coagulación, Floculación y Sedimentación

El proceso de coagulación-floculación se realizó con un equipo de jarras para cinco plazas y con control de agitación en revoluciones por minuto (rpm). El proceso consistió en depositar 300 mL del lixiviado puro en vasos de precipitado con capacidad de 600 mL, y posteriormente se procedió a realizar tres etapas: 1 min a 120 rpm, 20 min a 30 rpm y sedimentación por 30 min. Esta metodología se basó en la técnica estándar para la prueba de jarras de coagulación-floculación de agua (ASTM International, 2008).

¹ Cárdenas, M. A. (2018). *Extracción de almidón a partir de residuos de banana (Musa paradisiaca) para la elaboración de un polímero. Tesis para obtener el grado de Ingeniero en Biotecnología*. Universidad politécnica salesiana. Cuenca Ecuador. Disponible en: <https://dspace.ups.edu.ec/bitstream/123456789/16241/1/UPS-CT007893.pdf>

Determinación de la Dosis, pH Óptimo y Almidón

Para determinar la dosis óptima de remoción de turbidez del coagulante natural se realizaron ensayos a 0.2 g, 0.4 g y 0.6 g. Asimismo, se identificó el pH óptimo del lixiviado para la mayor remoción de la turbidez a pH de 2.5, 4, 5.5, 7 y 9 utilizando hidróxido de sodio al 1N y ácido nítrico al 1N. Se determinó el mejor almidón obtenido por ambos métodos en la remoción de turbidez por lo que se utilizó la dosis y pH óptimo definido. Para el cálculo del porcentaje de remoción de la turbidez en el lixiviado se realizó mediante la siguiente fórmula según Antov, Šćiban y Prodanović (2012).

$$\text{Remoción de Turbidez (\%)} = \frac{(\text{Turbidez inicial} - \text{Turbidez final})}{(\text{Turbidez inicial})} * 100 \quad (1)$$

Posteriormente se realizaron diferentes tratamientos utilizando un coagulante químico el sulfato de aluminio, con el almidón de papa y plátano identificado el método de mayor remoción de turbidez y DQO utilizando la concentración y pH óptimo obtenido anteriormente (Cuadro 1).

Análisis Estadístico de Resultados

Para el análisis estadístico, se aplicó un análisis de varianza (ANOVA) para evaluar diferencias significativas entre los tratamientos de los coagulantes naturales y el coagulante químico, así como una prueba de Tukey en caso de ser significativas ($p < 0.05$); se utilizó el programa Statistic 7.0 (StatSoft, 2004).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Se determinó el porcentaje del rendimiento del almidón obtenido por los métodos de vía húmeda (VH) y vía seca (VS). Se observó que por el método de VH, se obtuvieron 15 y 11% con el almidón de papa y plátano respectivamente, mientras que por el método de VS, fue de 15 y 59% con almidón de papa y plátano respectivamente. El rendimiento de almidón de papa por ambas vías fue similar, pero en el caso del almidón de plátano fue mayor en VS en relación con la VH.

Determinación del Coagulante más Efectivo en la Remoción de Turbidez

En relación con la comparación entre los coagulantes naturales obtenidos por la vía seca (VS) y vía húmeda (VH), se determinó que la mayor remoción de la turbidez con el almidón obtenido por VH fue de 67% de papa y 77% de plátano, superior al almidón obtenido por VS de 49% con almidón de papa y 45% de plátano (Figura 1). La mayor eficiencia de remoción del almidón por el método de vía húmeda puede ser debido a que el almidón obtenido tiene mayor pureza que se observó con una coloración más clara, ya que el obtenido por la vía seca, trae consigo más residuos de la fibra de la cáscara del plátano que no se remueven en el método de vía seca observándolo con un almidón más oscuro.

Cuadro 1. Tratamientos para la Remoción de lixiviados con los almidones naturales y un coagulante químico
Table 1. Treatments for the removal of leachates with natural starches and a chemical coagulant.

Clave	Sulfato de aluminio	Almidón de papa	Almidón de plátano
	----- % -----		
T-A	100	0	0
T-AB	50	0	50
T-BC	0	50	50
T-AC	50	50	0

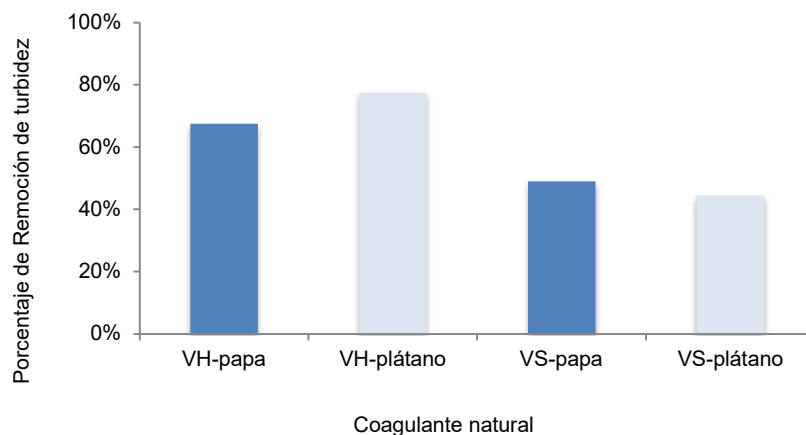


Figura 1. Porcentaje de la remoción de turbidez de los almidones obtenidos por vía seca (VS) y vía húmeda (VH).

Figure 1. Percentage of turbidity removal from starches obtained by dry method (VS) and wet method (VH).

Determinación del pH Óptimo del Lixiviado para la Remoción de la Turbidez

Los resultados demostraron que cuando el lixiviado se ajustó a un pH de 2.5, se obtuvo la turbidez más baja con 30.1 NTU, se observó que a medida que el pH era más alcalino la turbidez aumentaba, es decir, a un pH de 4 la turbidez subió hasta 289.5 NTU mientras que a un pH de 6 la turbidez fue de 187 NTU y a pH de 9 fue de 155 NTU (Figura 2). Pinedo, Riascos, Quintero y Costa (2022), reportaron que un pretratamiento con ácido sulfúrico en el lixiviado a un pH de 2.0, mejoró el proceso de remoción significativamente los componentes contaminantes. El pH es un parámetro importante en el proceso de coagulación-floculación ya que se logra cambiar la carga superficial del almidón utilizado y del contaminante presente en el lixiviado (Kukić, Šćiban, Prodanović, Tepić y Vasić, 2015).

Determinación de la Dosis Óptima del Almidón

Se determinó la dosis óptima del almidón para lograr una mejor remoción de los contaminantes en el lixiviado. Basados en los resultados previos, se consideraron los dos almidones de papa y de plátano obtenidos por el método de vía húmeda (VH) y a un pH del lixiviado de 2.5, utilizando 0.2, 0.4 y 0.6 g (Cuadro 2).

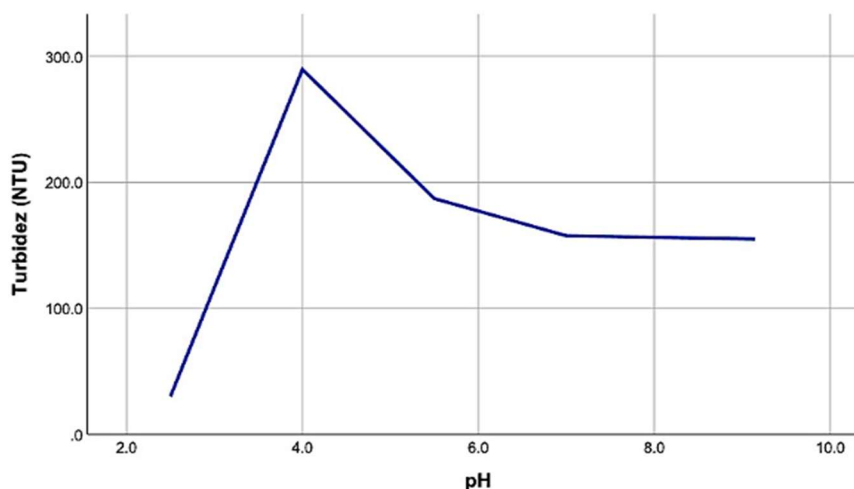


Figura 2. Variación de los valores de turbidez a diferentes pH del lixiviado.

Figure 2. Variation of turbidity values at different pH of the leachate.

Cuadro 2. Valores de remoción de la turbidez a diferentes dosis de los almidones de papa y plátano.
Table 2. Turbidity removal values at different doses of potato and banana starches.

Dosis de coagulante	pH del lixiviado	Almidón de papa	Remoción	Almidón de plátano	Remoción
		Turbidez		Turbidez	
g		NTU	%	NTU	%
0.2	2.5	55.1 ± 3.0	38.7	32.5 ± 4.0	22.8
0.4		55.1 ± 2.0	41.3	33.9 ± 2.2	23.8
0.6		55.1 ± 17	32.1	32.5 ± 2.1	22.8

Los resultados mostraron que con el almidón de papa la turbidez fue de 55.1 NTU, donde la remoción se mantuvo entre 32.1-41.3%, mientras que con el almidón de plátano tuvo una turbidez de 32.5-33.9 NTU, con una remoción de 22.8-23.8%. Los resultados indicaron que no existieron diferencias significativas ($p < 0.05$) entre las dosis aplicadas, por lo que se usaron 0.2 g para los tratamientos posteriores.

Remoción de la Turbidez por Tratamientos

Para la determinación del mejor tratamiento para el porcentaje de remoción de los contaminantes basados en la turbidez de los lixiviados, se procedió a los tratamientos utilizando los coagulantes naturales obtenidos de residuos de papa y plátano por el método de vía húmeda. El Cuadro 3, muestra los valores de turbidez y porcentaje de remoción del lixiviado al pH normal (pH = 8.4) como se encontró en la laguna de lixiviados del relleno sanitario y acidificado a pH a 2.5. Los resultados demostraron que la acidificación previa del lixiviado a 2.5, ofrece mejores resultados en la remoción de la turbidez que va desde 70-83.7% para todos los tratamientos, en comparación con los tratamientos al pH normal de 8.4 que van del 12.6-33.8%.

En relación con los tratamientos a pH de 2.5, se observó un comportamiento similar de la remoción con el uso de sulfato de aluminio (T-A) con una turbidez de 25.0 ± 0.88 NTU y una remoción del 83%, con respecto al uso del sulfato en combinación con el almidón de plátano (T-AB) con una turbidez de 24.5 ± 0.08 NTU y un 84% de remoción, así como con el uso de almidón de papa que obtuvo una turbidez de 26.4 ± 0.2 NTU y una remoción del 82%. No obstante, el uso de la combinación de los almidones de plátano y papa (T-BC), logró una turbidez de 45.1 ± 3.2 NTU y una remoción del 70%. Sin embargo, el análisis de correlación de Tukey indicó que entre los tratamientos no mostraron diferencias significativas en los valores de turbidez usando lixiviado a un pH de 2.5; pero en los resultados de remoción de turbidez se observaron diferencias significativas ($p < 0.05$) entre el tratamiento T-BC respecto a los demás tratamientos (Figura 3).

Cuadro 3. Valores de turbidez a diferentes pH y a diferentes tratamientos con coagulantes naturales y coagulante químico (T-A= Sulfato de Aluminio, T-AB= Sulfato y almidón de plátano, T-AC= Sulfato y almidón de papa, T-BC= Almidón de papa y plátano).
Table 3. Turbidity values at different pH and different treatments with natural coagulants and chemical coagulant (T-A= Aluminum Sulfate, T-AB= Sulfate and banana starch, T-AC= Sulfate and potato starch, T-BC= Potato and banana starch).

Tratamientos	Lixiviado a pH=2.5		Lixiviado normal (8.4)	
	Turbidez	Remoción de la Turbidez	Turbidez	Remoción de la Turbidez
	NTU	%	NTU	%
T-A	25.0 ± 0.88	83.3 ± 0.6	177.7 ± 4.30	12.6 ± 2.12
T-AB	24.5 ± 0.08	83.7 ± 0.05	134.6 ± 6.5	33.8 ± 3.18
T-AC	26.4 ± 0.2	82.4 ± 0.13	162.6 ± 35.4	20.0 ± 17.4
T-BC	45.1 ± 3.2	70.1 ± 2.14	146.9 ± 6.89	27.7 ± 3.4

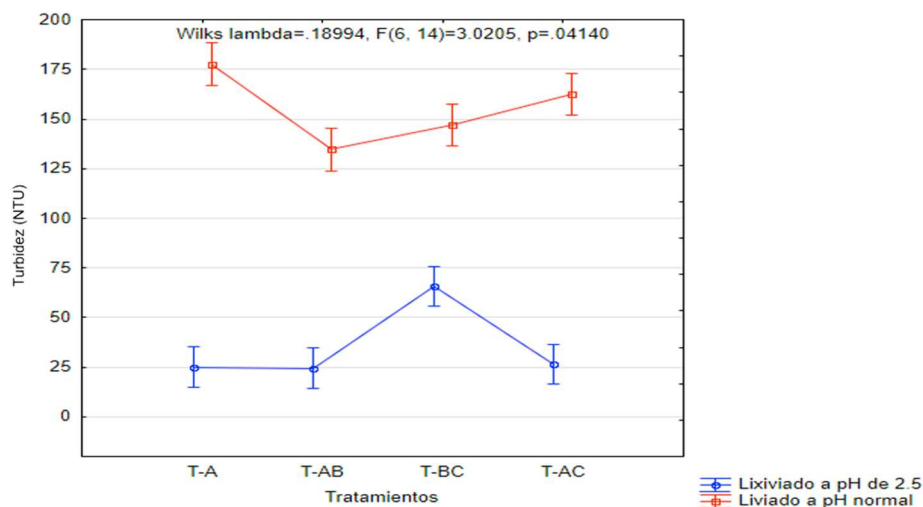


Figura 3. Comportamiento de la turbidez por tratamiento a diferentes pH.
Figure 3. Turbidity behavior by treatment at different pH.

El uso de coagulantes químicos como el sulfato de aluminio genera una oxidación química de la materia orgánica disuelta y el almidón natural remueve solamente una pequeña fracción particulada y no la fracción disuelta (Laines-Canepa, Goñi, Adams y Camacho, 2008). Algunos estudios han mostrado que el combinado del sulfato de aluminio y el almidón de plátano, logran una mayor efectividad en la remoción de la turbidez, tal como lo describe Trujillo *et al.* (2014), que obtuvieron un 98% de remoción utilizando una relación de 50:50 de sulfato de aluminio y almidón de plátano; además Ynofuente-Quispe, Flores y Vigo (2022) lograron una remoción de 90% de turbidez utilizando 50% de sulfato de aluminio y 50% de almidón de plátano para aguas residuales; Ramos-Marcos (2019²), reportó una remoción del 91.3% de remoción de turbidez utilizando 25% de almidón de plátano y 25% de sulfato de aluminio. Por otro lado, se ha reportado que el uso de almidón de papa o almidón de plátano muestran una alta remoción de turbidez en aguas residuales, tal como es mencionado por Camacho-Oviedo, Campos, Mercado, Cubillán y Castellar (2020) que utilizaron cáscaras de papa, obteniendo una remoción de 92.51% con uso de sulfato de aluminio mientras que solo con el almidón de papa obtuvo una remoción del 81.32%.

Aunque los coagulantes químicos se han utilizado eficazmente en el tratamiento de aguas residuales y lixiviados, uno de los retos actuales es disminuir su uso, debido a que causan algunas problemáticas cuando llegan al ambiente (Owodunni y Ismail, 2021). Koul *et al.* (2022) mencionaron que algunos coagulantes químicos depositan compuestos no biodegradables en los lodos de la sedimentación. Patchaiyappan y Devipriya (2022) indicaron que el uso excesivo de sulfato de aluminio en el tratamiento de aguas domésticas provoca un alto impacto en el ambiente por la residualidad en el agua tratada, causando un riesgo a los organismos vivos. No obstante, el uso de almidones como coagulantes naturales en combinación con los coagulantes químicos minimiza el impacto en el ambiente.

En relación con los resultados de DQO, se observó que los mejores valores se dieron con la acidificación del lixiviado a un pH de 2.5 en relación con los tratamientos a pH de 8.4. La remoción de la DQO con el lixiviado acidificado fue de 37.8 ± 10.4 hasta $39.6 \pm 9.2\%$, mientras que al pH de 8.4 osciló entre 21.1 ± 1.13 y $31.0 \pm 5.50\%$. Considerando que los valores iniciales de DQO fueron de 5756 mg L^{-1} , se encontró que la mayor remoción fue en el tratamiento del almidón de papa y plátano (T-BC), sin embargo, no se observaron diferencias significativas entre los tratamientos (Figura 4). Los resultados de este estudio son similares a Ramos-Marcos (2019²), quien logró una remoción de DQO de 48.4% usando cáscara de papa para la remoción de materia orgánica de aguas residuales domésticas y superiores a los reportado por Fernández-Gómez (2018³), que evaluó la efectividad del almidón de cáscaras de papa en muestras de efluentes de la industria textil obteniendo un 23.7% de DQO con una dosis de 50 mg L^{-1} de coagulante.

² Ramos-Marcos, J. M. (2019). *Eficiencia de la cáscara de papa (Solanum tuberosum) y la cáscara de yuca (Manihot esculenta) en la remoción de materia orgánica en aguas residuales domésticas del parque María Reiche*. Tesis para obtener el grado de Maestro en Ciencias. Miraflores-2018. <https://hdl.handle.net/20.500.12990/7908>

³ Fernández-Gómez, M. K. (2018). *Eficiencia de la cáscara de papa como coagulante para remover materia orgánica, en efluentes de la industria textil*. Tesis para obtener el grado de Ingeniero Ambiental. Huachipa-2018. Disponible en <https://hdl.handle.net/20.500.12692/20529>

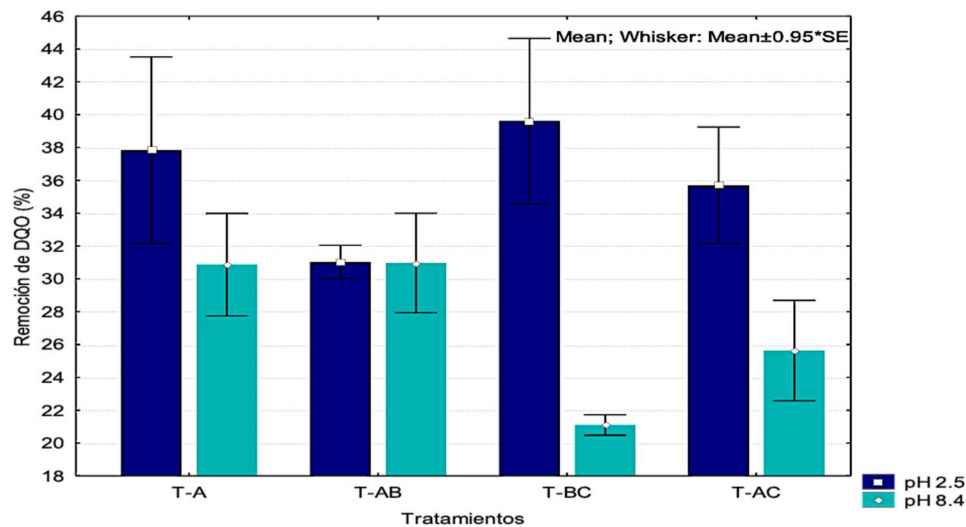


Figura 4. Valores de remoción de DQO a diferentes pH y en los tratamientos con coagulantes naturales y coagulante químico; T-A = sulfato de aluminio; T-AB = sulfato y almidón de plátano; T-AC = sulfato y almidón de papa; T-BC = almidón de papa y plátano.

Figure 4. COD values at different pH and different treatments with natural coagulants and chemical coagulants; T-A = aluminum sulfate; T-AB = sulfate and banana starch; T-AC = sulfate and potato starch; T-BC = potato and banana starch.

Dolar, Košutić y Strmecky (2016) indicaron que la dosis de los coagulantes es crucial en la remoción de contaminantes, ya que la tasa de eliminación de la DQO y los sólidos suspendidos totales también pueden incrementar. Esto se debe a que la composición de los lixiviados varía y es probable que, aunque se observó en este estudio una mayor remoción de la turbidez, cuente con la presencia de diversos compuestos químicos que no fueron removidos. Silva *et al.* (2017) mencionaron que los lixiviados se componen de materia orgánica disuelta y que principalmente consiste en compuestos orgánicos que varían ampliamente en su peso molecular e incluyen ácidos grasos volátiles, ácidos húmicos y ácidos fúlvicos en altas concentraciones. Por otro lado, Khoo *et al.* (2020) señalaron que el uso de almidones en el proceso de coagulación-floculación utilizan el principio de neutralización de carga y puenteo de los polímeros para eliminar las partículas coloidales y disueltas en el lixiviado, a pesar de ello, no todas las partículas pueden eliminarse eficazmente. No obstante, es fundamental el control de la DQO en los lixiviados para mitigar su impacto en los ecosistemas (Gao *et al.*, 2022).

CONCLUSIONES

La reducción del impacto que generan los lixiviados que provienen de rellenos sanitarios es un reto actual, por lo que se han implementado metodologías aplicadas en el tratamiento de aguas residuales. El proceso de coagulación-floculación se ha considerado una alternativa para la remoción de los contaminantes presentes. En la búsqueda de utilizar coagulantes naturales, el presente estudio determinó que los residuos agroindustriales como la cáscara de papa y plátano pueden resultar una mejor opción. El almidón obtenido de estos residuos por el método por vía húmeda (VH) logró una mayor remoción de la turbidez a una dosis de 0.2 g. Los resultados demostraron que la acidificación previa del lixiviado a un pH de 2.5, ofrece mejores resultados en la remoción de turbidez. Los tratamientos con almidón de papa y plátano con y sin uso de sulfato de aluminio como coagulante químico dieron remociones favorables de 70.1-83.7% en turbidez y de 37.8-39.6% para DQO. Se puede concluir que el uso de almidón obtenidos de los residuos de papa y plátano actúan mejor a un pH ácido, y brinda una mejor opción para reducir el uso de coagulantes químicos y minimizar su impacto en el ambiente. Esto demuestra que los naturales pueden ser una alternativa efectiva y viable para el tratamiento de lixiviados procedentes de rellenos sanitarios, ya que son de fácil adquisición y no causan efectos negativos en el ambiente. De esta manera, pueden sustituir total o parcialmente los coagulantes químicos como el sulfato de aluminio, logrando un ahorro significativo en los costos de operación.

DECLARACIÓN DE ÉTICA

No aplicable.

CONSENTIMIENTO PARA PUBLICACIÓN

No aplicable.

DISPONIBILIDAD DE DATOS

Todos los datos analizados durante este estudio se incluyen en este artículo.

CONFLICTO DE INTERESES

Los autores declaran que no tienen intereses en competencia.

FINANCIACIÓN

No Aplicable.

CONTRIBUCIÓN DE LOS AUTORES

Conceptualización: I.A.A.E. y P.Z.R.; Metodología: P.Z.R., I.A.A.E. y K.L.P.T.; Análisis formal: I.A.A.E. y P.Z.R.; Investigación: K.L.P.T., I.A.A.E. y P.Z.R.; Recursos: I.A.A.E. y C.R.V.; Escritura – preparación del borrador original: I.A.A.E. y K.L.P.T.; Supervisión: I.A.A.E., P.Z.R. y C.R.V.; Adquisición de fondos: I.A.A.E. y C.R.V.

AGRADECIMIENTOS

Al Tecnológico Nacional de México por el financiamiento del Proyecto: 19713.24-P

LITERATURA CITADA

- Abdel-Shafy, H. I., Ibrahim, A. M., Al-Sulaiman, A. M., & Okasha, R. A. (2024). Landfill leachate: Sources, nature, organic composition, and treatment: An environmental overview. *Ain Shams Engineering Journal*, 15(1), 102293. <https://doi.org/10.1016/j.asej.2023.102293>
- Antov, M. G., Šćiban, M. B., & Prodanović, J. M. (2012). Evaluation of the efficiency of natural coagulant obtained by ultrafiltration of common bean seed extract in water turbidity removal. *Ecological Engineering*, 49, 48-52. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2012.08.015>
- Aragaw, T. A., & Bogale, F. M. (2023). Role of coagulation/flocculation as a pretreatment option to reduce colloidal/bio-colloidal fouling in tertiary filtration of textile wastewater: A review and future outlooks. *Frontiers in Environmental Science*, 11, 1142227. <https://doi.org/10.3389/fenvs.2023.1142227>
- ASTM International. (2008). *Standard practice for coagulation-flocculation jar test of water*. ASTM D2035-08. West Conshohocken, PA, USA: ASTM International.
- Camacho-Oviedo, H., Campos-Núñez, D., Mercado-Martínez, I., Cubillán-Acosta, N., & Castellar-Ortega, G. (2020). Uso de las cáscaras de papa (*Solanum tuberosum* L) en la clarificación del agua de la Ciénaga de Malambo. *Investigación e Innovación en Ingenierías*, 8(1) 100-111. <https://doi.org/10.17081/INVINNO.8.1.3572>
- Carrasquero, S. J., Flores, S. M., Perche, E. D. F., Ferrer, P. M. P., Leal, J. C. M., & Montiel, A. R. D. (2017). Efectividad de coagulantes obtenidos de residuos de papa (*Solanum tuberosum*) y plátano (*Musa paradisiaca*) en la clarificación de aguas. *Revista Facultad de Ciencias Básicas*, 13(2), 90-99. <https://doi.org/10.18359/rfcb.1941>
- Daniel, A. N., Ekeleme, I. K., Onuigbo, C. M., Ikpeazu, V. O., & Obiekezie, S. O. (2021). Review on effect of dumpsite leachate to the environmental and public health implication. *GSC Advanced Research and Reviews*, 7(2), 051-060. <https://doi.org/10.30574/gscarr.2021.7.2.0097>
- Dolar, D., Košutić, K., & Strmecky, T. (2016). Hybrid processes for treatment of landfill leachate: coagulation/UF/NF-RO and adsorption/UF/NF-RO. *Separation and Purification Technology*, 168, 39-46. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2016.05.016>
- FAO (Food and Agriculture Organization of the United Nations). (2015). *Iniciativa mundial sobre la reducción de la pérdida y el desperdicio de alimentos*. Roma, Italia: FAO.
- Gao, J., Wang, R., Li, Y., Huang, H., Su, X., An, Z., ... & Sun, F. (2022). Effect of aeration modes on nitrogen removal and N₂O emission in the partial nitrification and denitrification process for landfill leachate treatment. *Science of the Total Environment*, 853, 158424. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.158424>
- Hernández, I., Martínez, M., Contreras, R., & Pérez, R. (2017). Extracción de almidón por el método seco en plátano macho, cuadrado y castilla. *Revista de Simulación y Laboratorio*, 4(13), 1-7.
- Khanal, S., Karimi, K., Majumdar, S., Kumar, V., Verma, R., Bhatia, S. K., ... & Kumar, D. (2024). Sustainable utilization and valorization of potato waste: State of the art, challenges, and perspectives. *Biomass Conversion and Biorefinery*, 14(19), 23335-23360. <https://doi.org/10.1007/s13399-023-04521-1>

- Khoo, K. S., Tan, X., Show, P. L., Pal, P., Juan, J. C., Ling, T. C., ... & Nguyen, T. H. P. (2020). Treatment for landfill leachate via physicochemical approaches: an overview. *Chemical and Biochemical Engineering Quarterly*, 34(1), 1-24. <https://doi.org/10.15255/CABEQ.2019.1703>
- Köfalusi, G. K., & Aguilar, G. E. (2006). Los productos y los impactos de la descomposición de residuos sólidos urbanos en los sitios de disposición final. *Gaceta Ecológica*, 79, 39-51.
- Koul, B., Bhat, N., Abubakar, M., Mishra, M., Arukha, A. P., & Yadav, D. (2022). Application of natural coagulants in water treatment: a sustainable alternative to chemicals. *Water*, 14(22), 3751. <https://doi.org/10.3390/w14223751>
- Kukić, D. V., Šćiban, M. B., Prodanović, J. M., Tepić, A. N., & Vasić, M. A. (2015). Extracts of fava bean (*Vicia faba* L.) seeds as natural coagulants. *Ecological Engineering*, 84, 229-232. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2015.09.008>
- Laines-Canepa, J. R., Goñi-Arévalo, J. A., Adams-Schroeder, R. H., & Camacho-Chiu, W. (2008). Mezclas con potencial coagulante para tratamiento de lixiviados de un relleno sanitario. *Interciencia*, 33(1), 22-28.
- Longe, E. O., & Enekeuchi, L. O. (2007). Investigation on potential groundwater impacts and influence of local hydrogeology on natural attenuation of leachate at a municipal landfill. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 4(1), 133-140. <https://doi.org/10.1007/BF03325971>
- Mazzeo, M., Alzate, A., & Marín, M. (2008). Obtención de almidón a partir de residuos poscosecha del pátano dominico Hartón (*Musa AAB Simonds*). *Revista Científica de la Universidad de Caldas Vector*, 3, 57-69
- Meza-Leones, M., Riaños-Donado, K., Mercado-Martínez, I., Olivero-Verbel, R., & Jurado-Eraso, M. (2018). Evaluación del poder coagulante del sulfato de aluminio y las semillas de *Moringa oleífera* en el proceso de clarificación del agua de la ciénaga de Malambo, Atlántico. *Revista UIS Ingenierías*, 17(2), 95-103.
- Mohammad-Ali, N. F. H., Megat-Hanafiah, M. A. K., Saleh, S. H., Mohd-Ali, M. T., & Ibrahim, S. (2024). A review of biomass-based natural coagulants for water pollution remediation: impact of properties and coagulation operational parameters. *AUIQ Complementary Biological System*, 1(2), 31-45. <https://doi.org/10.70176/3007-973X.1013>
- Owodunni, A. A., & Ismail, S. (2021). Revolutionary technique for sustainable plant-based green coagulants in industrial wastewater treatment—A review. *Journal of Water Process Engineering*, 42, 102096. <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2021.102096>
- Patchaiyappan, A., & Devipriya, S. P. (2022). Application of plant-based natural coagulants in water treatment. In S. Kathi, S. Devipriya, K. Thamaraiselvi, & M. Z. Hashmi (Eds.). *Cost-effective technologies for solid waste and wastewater treatment* (pp. 51-58). Oxford, UK: Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-822933-0.00012-7>
- Pinedo, M. L., Riascos, B. D., Quintero, X. E., & Costa, C. (2022). Mechanism of pH sensitive flocculation for organic load and colour reduction in landfill leachate. *Waste Management*, 144, 163-172. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2022.03.020>
- Romero Quispe, S. M., & Mallqui Gutierrez, M. A. (2019). Remoción de iones cobre de aguas residuales mineras utilizando el almidón de la cáscara de plátano. Disponible en <http://hdl.handle.net/20.500.12894/7929>
- SE (Secretaría de Economía). (2012). Norma Mexicana NMX-AA-030/1-SCFI-2012. Análisis de agua. Determinación de la demanda química de oxígeno en aguas naturales, residuales y residuales tratadas. Parte 1: Método de reflujo cerrado. *Diario Oficial de la Federación*. D. F., México: SEGOB.
- Silva, T. F., Soares, P. A., Manenti, D. R., Fonseca, A., Saraiva, I., Boaventura, R. A., & Vilar, V. J. (2017). An innovative multistage treatment system for sanitary landfill leachate depuration: Studies at pilot-scale. *Science of the Total Environment*, 576, 99-117. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.10.058>
- Singh, S., Raju, N. J., Gossel, W., & Wycisk, P. (2016). Assessment of pollution potential of leachate from the municipal solid waste disposal site and its impact on groundwater quality, Varanasi environs, India. *Arabian Journal of Geosciences*, 9(2), 131. <https://doi.org/10.1007/s12517-015-2131-x>
- StatSoft, Inc. (2004). *STATISTICA (data analysis software system), version 7.0*. Tulsa, OK, USA: StatSoft, Inc.
- Trujillo, D., Duque, L. F., Arcila, J. S., Rincón, A., Pacheco, S., & Herrera, O. F. (2014). Remoción de turbiedad en agua de una fuente natural mediante coagulación/floculación usando almidón de plátano. *Revista Ion*, 27(1), 17-34.
- Ynofuente-Quispe, L., Flores-Condori, M., & Vigo-Rivera, J. E. (2022). Residuos de papa como auxiliar del sulfato de aluminio para clarificación de agua. *Cuadernos de Investigación UNED*, 14(2), 94-106. <https://dx.doi.org/10.22458/urj.v14i2.4282>