



REVISTA AIDIS

de Ingeniería y Ciencias Ambientales:
Investigación, desarrollo y práctica.

ESTUDIO COMPARATIVO DE LA ACCIÓN COAGULANTE-FLOCULANTE DEL MUCILAGO DE *Opuntia ficus indica* POR LOS MÉTODOS: COAGULACIÓN Y ELECTROCOAGULACIÓN EN LOS LIXIVIADOS DEL RELLENO SANITARIO PIRGUA DE TUNJA

* María Cristina Castellanos Corredor¹
Nathalie del Pilar Becerra Mora²
Lizeth Carreño Nury²
Leidy Paola Páez Cepeda²

COMPARATIVE STUDY OF THE FLOCCULANT ACTION OF
Opuntia ficus indica MUCILAGE BY TWO METHODS:
COAGULATION AND ELECTROCOAGULATION IN THE
LEACHATES OF PIRGUA LANDFILL IN TUNJA

Recibido el 25 de mayo de 2011; Aceptado el 17 de noviembre de 2011

Abstract

The flocculant effect of the cactus nopal (*Opuntia ficus indica*) aqueous extract mucilage on the suspended solids that cause turbidity and pollutants load the leachates produced in the Pírgua landfill of Tunja city (Colombia) was studied. Two comparative methods were applied: the coagulation - flocculation and the electrocoagulation in three mediums: acid (pH 4), neutral (pH 7) and basic (pH10). The best results in the removal of suspended solids and subsequent correction of physicochemical parameters of leachate reached 67%, which were obtained with the method of electrocoagulation at a concentration of mucilage / leaching of 30/70 and a pH of 7.

Key words: Coagulation, Electrocoagulation, Flocculation, Leachate treatment, Turbidity removal.

¹ Escuela de Ciencias Químicas, UPTC

² Grupo GIQUA, UPTC

* Autor correspondiente: Av. Central del Norte. Tunja-Boyacá, Colombia. PBX (098)7422174/76.

Email: cristina.castellanos@uptc.edu.co

Resumen

Se evaluó el efecto floculante del mucílago acuoso, extraído del cactus nopal *Opuntia ficus indica*, sobre los sólidos suspendidos, causantes de la turbiedad y carga contaminante en los lixiviados que se producen en el relleno sanitario de Pírgua de la ciudad de Tunja, Colombia. Se aplicaron comparativamente dos métodos: la coagulación – floculación y la electrocoagulación en tres medios: ácido (pH4), neutro (pH7) y básico (pH10). Los mejores resultados en la remoción de sólidos suspendidos y subsecuente corrección de parámetros fisicoquímicos del lixiviado, alcanzaron el 67%, los cuales se obtuvieron con el método de electrocoagulación a una concentración de mucílago/lixiviado de 30/70 y a un pH de 7.

Palabras claves: Coagulación, Electrocoagulación, Floculación, Remoción de turbidez, Tratamiento de lixiviados.

Introducción

El relleno sanitario Pírgua, de la ciudad de Tunja, funciona desde el año 2007, recibe aproximadamente 150 toneladas de residuos sólidos sin clasificar, de Tunja y otros 41 municipios del departamento de Boyacá. La operación está a cargo de la empresa SERVITUNJA S.A. E.S.P. y cuenta con sistemas de recolección, conducción de lixiviados, evacuación de gases e impermeabilización de fondo con geomembrana HDPE 40 mils. El lixiviado generado, es en promedio 0,37 L/seg, el cual se desactiva en la planta de tratamiento y los gases se liberan a la atmósfera por su bajo contenido de metano (Servitunja, 2007).

Los lixiviados de rellenos sanitarios, son líquidos oscuros que se producen por descomposición de la materia orgánica y el agua lluvia Chavarro *et.al.*, (2006). Son potencialmente peligrosos para el medio ambiente debido a que presentan un alto nivel de contaminación, pueden contener alta carga de materia orgánica, nitrógeno amoniacal, metales pesados y sales Uygur and Kargi, (2004), Karadag, *et al.*,(2007), Primo, *et al.*, (2007). Las características químicas de los lixiviados varían de manera significativa en función de múltiples factores como: clima, edad del relleno, composición de la basura y la geología del terreno Cabeza, *et al.*, (2007) y Karadag, D. Et al(2007) , citado por Droppelmann y Oettinger, (2009).

La desactivación de los lixiviados puede realizarse utilizando tecnologías convencionales o emergentes, la elección del método más conveniente depende principalmente del caudal y el tipo y nivel de contaminación, además del costo de su implementación.

Dentro de las tecnologías convencionales más usadas para la eliminación de materia en suspensión se encuentran: la filtración, flotación, sedimentación y coagulación – floculación; para la eliminación de materia disuelta, se usan: métodos electroquímicos, intercambio iónico, precipitación y adsorción, entre otros. Alternativamente, se han desarrollado múltiples tratamientos biológicos tanto aeróbicos como anaeróbicos con resultados destacados. Dentro de las tecnologías emergentes se encuentran las que fundamentan sus procesos en la oxidación como la química y la oxidación avanzada (AOP) y las que se fundamentan en el uso de membranas como: la ultrafiltración, microfiltración, ósmosis inversa y nanofiltración, que usan

como fuerza impulsora la diferencia de presión transmembrana y la electrodiálisis, que usa para tal fin, la diferencia de potencial eléctrico transmembrana, (Rodríguez *et al.*, 2006).

De acuerdo con el Ministerio de Minas y Energía, existen algunas deficiencias en el manejo de los lixiviados producidos en el relleno sanitario Pírgua, generando riesgo de contaminación de suelos y fuentes de agua superficial y subterránea. Puede provocar diferentes afectaciones como: deterioro del macizo rocoso, desestabilización de taludes y laderas, alteración de la calidad paisajística y muerte de la vegetación (Instituto Colombiano de Geología y Minería, 2005).

Como un aporte al tratamiento de estos lixiviados, se evaluaron dos métodos para remoción de sólidos: la coagulación – floculación y la electrocoagulación, caracterizados por su sencillez y bajo costo, utilizando como agente coagulante, el mucílago obtenido del parénquima del cactus nopal *Opuntia ficus indica*, que en nuestro medio es subutilizado por considerarse una especie invasora.

La eficiencia comparativa de los dos métodos fue evaluada por la turbidez removida de las muestras de lixiviado crudo. Se estudiaron las variables: proporción de mucílago/ lixiviado a dos niveles, pH a tres niveles y segmento de la celda electroquímica. Los valores de parámetros fisicoquímicos del lixiviado después del tratamiento, se compararon con lo establecido en la norma colombiana para aguas residuales: Decreto 1594 de 1984, (Ministerio de Salud colombiano, 1984).

Parte Experimental

Recolección, preparación y caracterización de la muestra

Las muestras de lixiviado se recolectaron en época de lluvia (Abril), en dos puntos del vertimiento: antes y después del tratamiento en la planta del relleno sanitario Pírgua de la ciudad de Tunja (Boyacá –Colombia), siguiendo las normas de calidad de muestreo y manipulación de muestras, establecido para el laboratorio analítico de servicios ambientales GIQUA – UPTC, código MC-001, hojas14 -15. Las muestras fueron mantenidas en refrigeración a 4°C durante el tiempo del estudio. Se evaluaron los parámetros fisicoquímicos: alcalinidad, conductividad, pH, turbidez, sólidos totales, y sólidos suspendidos siguiendo procedimientos normalizados (APHA, AWWA, WEF, 2005).

Extracción y caracterización del mucílago de *Opuntia ficus indica*

Las pencas o cladodios se recolectaron en la población de Corrales (Boyacá), de plantas sanas, sin frutos y adultas (de 2 años o más). Se transportaron en bolsas plásticas selladas y dentro de recipientes de icopor. Luego de retirar las espinas se lavaron con agua corriente y luego con agua desionizada. Se mantuvieron en refrigeración a 4°C durante no más de 5 días. El mucílago

se extrajo, mediante maceración del parénquima con agua, Sepúlveda, *et.al.* (2007), en tres medios ácido (pH 4), neutro (pH 7) y básico (pH10), posteriormente se filtraron y centrifugaron, Sáenz, *et.al.* (1993). Los fluidos obtenidos se caracterizaron físicamente en los parámetros: densidad, viscosidad, tensión superficial, índice de refracción y grados Brix (Tabla1).

Determinación de actividad clarificante del mucílago de *Opuntia ficus indica* en lixiviados

La acción clarificante del mucílago sobre el lixiviado, se evaluó bajo las siguientes variables: a) Método (dos niveles): Coagulación-floculación y Electrocoagulación; b) Medio para la coagulación (tres niveles): ácido (pH 4), neutro (pH 7) y básico (pH10) y c) Concentración, mucílago/ lixiviado (v/v) (dos niveles): 50/50 (M/L_{50/50}) y 30/70 (M/L_{30/70}). Mediante ensayos preliminares se establecieron los niveles de las variables y las condiciones de trabajo de cada etapa y que se describen a continuación.

Etapa de coagulación: agitación 3 min a 150 rpm.; Floculación: 30 min a 30 rpm; Sedimentación: reposo 30 min. Electrocoagulación: se siguió el principio de reactor tipo Bach (celda electrolítica), representada en la figura 1, con capacidad de 500 mL, conformada por tres secciones: cátodo (C), ánodo (A) y centro (M), equipada con electrodos de trabajo de grafito, (3 cm Ø, alto 10,5 cm), dispuestos en los extremos de la celda (cátodo y ánodo), conectados a una fuente de poder de 0-300V, 0-1,2 mA. La separación de los compartimentos se hizo con papel de filtro a 5.5 cm de distancia de los electrodos. Los tiempos establecidos para la Electrocoagulación y la Sedimentación fueron 80 min y 40 min, respectivamente.

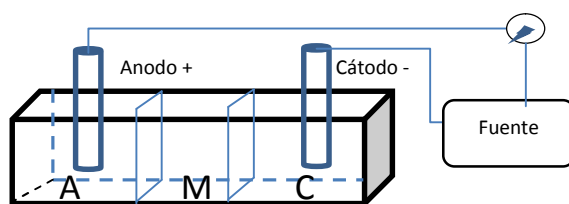


Figura 1. Esquema de la Celda electrolítica utilizada

En todos los casos la variable de control fue la turbidez en NTU, medida con turbidímetro marca Lamotte 2020i. La actividad coagulante se determinó mediante la medición de la turbidez en el lixiviado a través del tiempo, siguiendo lo establecido por Okuda *et al.*, (2001), citado por Miller *et al.*, (2008). Se analizó la variación del flujo de corriente en la electrocoagulación en las diferentes etapas del proceso, como un indicador del contenido de iones en el residuo.

Caracterización físico-química de los lixiviados tratados

Se evaluaron comparativamente los parámetros: alcalinidad, conductividad, pH, turbidez, sólidos totales, y sólidos suspendidos siguiendo procedimientos normalizados (APHA, AWWA, WEF, 2005) a los lixiviados crudos, tratados en la planta y con Opuntia mediante los tratamientos descritos.

Resultados y Discusión

Caracterización del mucilago

Los valores de las propiedades físicas del fluido, extraído a los tres niveles de pH (tabla 1), no presentan diferencias significativas, lo que indica que éstas son independientes del medio de extracción.

Tabla 1. Propiedades físicas del mucílago extraído a diferentes pH a 18°C

pH	Densidad (g/cc)	Viscosidad (Poise)	Tensión		°Brix (%)
			Superficial (Din/cm)	Índice de Refracción	
4	1,00046	6,201	188,901	1,338	4,0
7	0,99854	6,108	198,409	1,340	4,5
10	0,99879	6,102	190,350	1,241	5,0

Es posible inferir que igualmente el contenido de polielectrolitos en los mucílagos, no depende del pH utilizado para su extracción y su efecto sobre la coagulación y la electrocoagulación dependerá de la alcalinidad residual y no de la concentración de polielectrolitos, ya que es prácticamente constante.

El contenido promedio de humedad de la opuntia es del 94,7% y el rendimiento de extracción del mucilago fue de 0,3 g/100 g, valores similares a los reportados por Cárdenas *et al.*, (1997), y Sepúlveda *et al.*, (2007), pudiendo ser mejorado al variar la técnica de obtención del mucílago.

Evaluación de actividad coagulante del mucilago de Opuntia ficus indica en lixiviados

Las figuras 2 y 3 muestran el comportamiento de la actividad coagulante del mucílago extraído a 3 niveles de pH en las concentraciones M/L_{30/70} y M/L_{50/50} durante 70 minutos, los que permiten evaluar la efectividad del mucílago en la remoción de sólidos (figuras 5 y 6). La turbidez en el tratamiento M/L_{30/70} presenta un comportamiento con tendencia constante en todos los valores de pH. En el tratamiento M/L_{50/50}, la mayor estabilidad se da a pHs neutro y básico, a pH ácido la turbidez decrece entre 20 y 30 min., tiempo a partir del cual es constante.

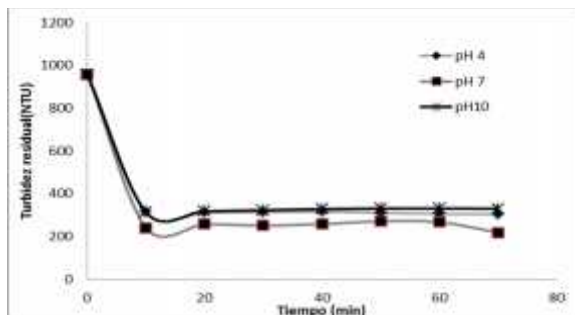


Figura 2. Turbidez residual del lixiviado en 70 min. de coagulación con mucílago extraído a diferentes pH en proporción M/L_{30/70}

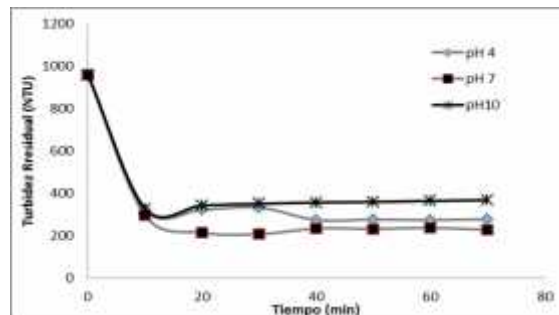


Figura3. Turbidez residual del lixiviado en 70 min. de coagulación con mucílago extraído a diferentes pH en proporción M/L_{50/50}

Los valores promedio de turbidez se presentan comparativamente en la figura 4, donde se evidencia que el pH óptimo para la coagulación del lixiviado es el neutro y el menos favorable el básico, con una respuesta ligeramente mejor a una concentración a M/L_{30/70}. Dentro de cada tratamiento a diferente pH, no se observa diferencia significativa en cuanto a las concentraciones de mucílago, indicando que el pH ejerce mayor efecto sobre la coagulación que la cantidad de material coagulante, lo cual puede deberse a que para el coagulante probado (*Opuntia ficus indica*), la zona óptima de pH es el neutro, aún para concentraciones variables.

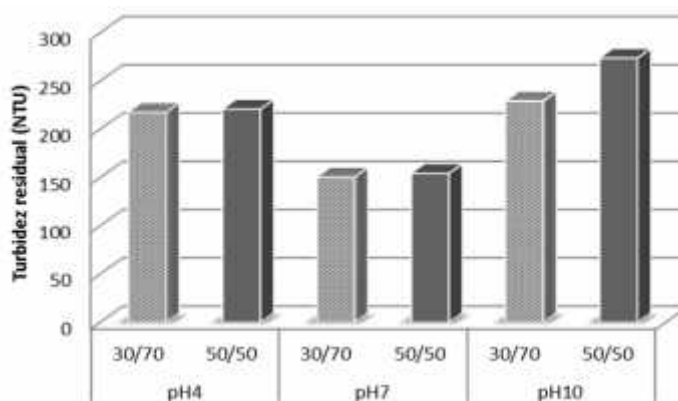


Figura 4. Promedios de turbidez en los tratamientos M/L_{30/70} y M/L_{50/50} a tres valores de pH

A pH neutro, en la primera fase se observa aumento de la turbidez (ente 25-30 min), por la desestabilización coloidal y subsecuente aglomeración de partículas. En la fase de sedimentación (50 – 60 min), las partículas pesadas van al fondo y disminuye la turbidez. En el tratamiento M/L_{30/70}, la formación de flóculos es más lenta, y la sedimentación más rápida que en M/L_{50/50}.

La turbidez disminuye en promedio 626 NTU para $M/L_{30/70}$ y se logra una remoción de sólidos promedio del 73,4 % (Figura 5). En $M/L_{50/50}$ la disminución de turbidez es ligeramente menor, al igual que la remoción de sólidos (Figura 6). Los resultados indican que una menor concentración de mucilago, puede producir una formación de flóculos más pequeños, que hacen más difícil y lento el proceso de adsorción y posterior sedimentación, coincidiendo con Restrepo y Alonso, (2009).

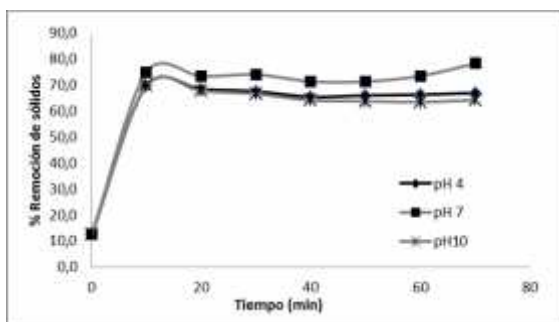


Figura 5. % de remoción de sólidos durante 70 min. en el tratamiento $M/L_{30/70}$ a tres pH

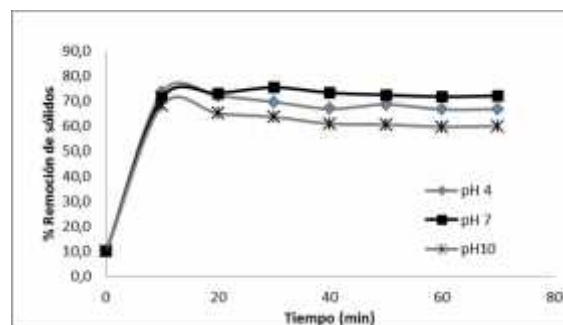


Figura 6. % de remoción de sólidos durante 70 min. en el tratamiento $M/L_{50/50}$ a tres pH

Determinación de la actividad coagulante de *Opuntia ficus indica* por electrocoagulación en el lixiviado.

Evaluación de la Turbidez residual. Se observó la electrolisis indirecta en tres regiones: una superior de lodos de flotación y espumas, una media donde ocurren las reacciones electroquímicas con producción de hidrógeno en el cátodo y oxígeno en el ánodo y una última de sedimentación, con los lodos más densos derivados de la acción del mucilago.

Los promedios de turbidez del lixiviado luego de la electrocoagulación con mucilago en proporciones $M/L_{30/70}$ y $M/L_{50/50}$ a tres niveles de pH, en las tres regiones de la celda electrolítica: ánodo cátodo y centro, se observan en la figura 7. Los mejores resultados en cuanto a eficiencia del procedimiento se obtuvieron para $M/L_{30/70}$ en el ánodo a pH neutro donde, se observa una disminución de turbidez de 805,5 a 78,2 NTU. En el cátodo no se observa incidencia del pH en la turbidez, mientras que en el centro disminuye la efectividad del tratamiento.

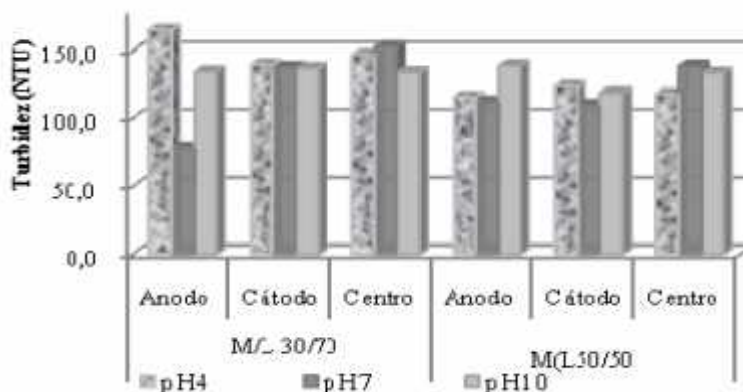


Figura 7. Promedios de turbidez residual (NTU) de lixiviados tratados por electrocoagulación con mucílago a M/L_{30/70} y M/L_{50/50} a pH 4, 7 y 10 en las tres secciones de la celda durante 100 min

El tiempo óptimo para el proceso de electrocoagulación está en 60-70 minutos en el cátodo y en ánodo y a los 100 minutos para el centro. A partir del minuto 90, aumenta significativamente la turbidez especialmente en el tratamiento M/L_{30/70} a pH neutro, haciendo ineficiente el proceso. El comportamiento observado en las secciones de la celda, puede ser ocasionada por el intercambio iónico en la cercanía de los electrodos, permitiendo la neutralización de cargas del lixiviado, facilitando la rápida aglutinación.

En M/L_{50/50}, se registraron variaciones alternas en la turbidez en los tres compartimientos de la celda, con varias etapas de precipitación originando el efecto de barrido, (figura 8, ampliada en la figura 9). La inestabilidad generada por la redisolución de los microflóculos pudo ser causada por la sobresaturación de mucílago en el lixiviado. Los resultados señalan la efectividad de la preparación M/L_{30/70}, para tratar el lixiviado del relleno sanitario en estudio.

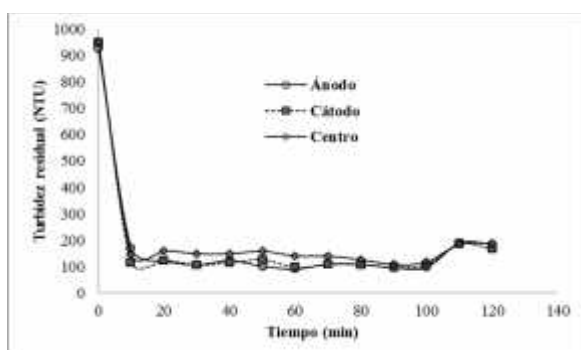


Figura 8. Comportamiento de la turbidez residual durante 120 minutos en las tres regiones de la celda para el tratamiento M/L_{50/50} a pH neutro

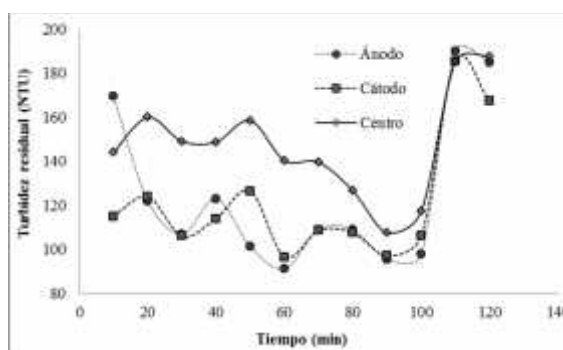


Figura 9. Ampliación del intervalo de turbidez entre 90 y 200 NTU de la figura 8

Estudio de la remoción de sólidos suspendidos. Como se observa en la figura 10, la remoción de sólidos resulta ser más difícil a pH ácido y básico en las dos concentraciones probadas, la respuesta más baja se encontró en el ánodo a pH4 en M/L_{30/70}. La mayor efectividad del proceso se logró a pH7 en M/L_{30/70}, presentándose valores similares en las tres secciones de la celda, lo que indica que la remoción de sólidos es independiente de la sección de la celda. Se lograron remover sólidos en un intervalo entre el 55 y 67%. En la concentración M/L_{50/50} el proceso de remoción de sólidos por electrocoagulación muestra un comportamiento similar en las variables analizadas: pH ácido, básico y neutro y secciones de la celda ánodo, cátodo y centro. Se alcanzó una remoción de sólidos entre el 35 y 40%.

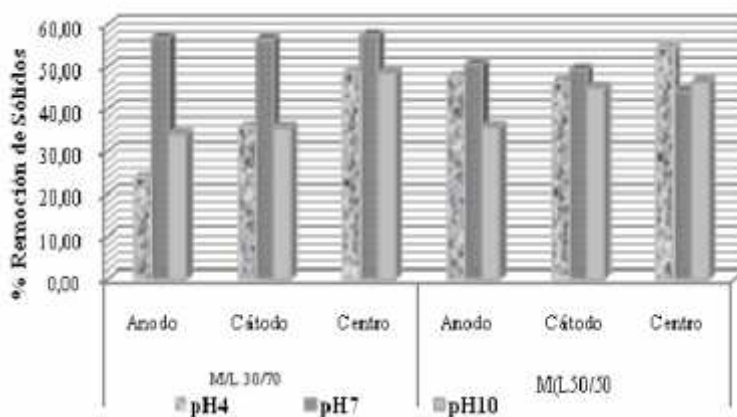


Figura 10. Porcentaje de remoción de sólidos suspendidos mediante la electrocoagulación del lixiviado en el cátodo, ánodo y centro de la celda electrolítica empleando concentraciones M/L_{30/70} y M/L_{50/50} a pH ácido (4), neutro (7) y básico (10)

En el proceso de electrocoagulación del lixiviado, se pudieron identificar claramente tres etapas en la variación de corriente dentro de la celda electrolítica: la primera (20 min.) de elevación, la segunda (70-90 min.) de marcada disminución y la tercera de estabilidad. En la primera etapa, ocurre la electromigración de iones a través del lixiviado, el aumento de corriente es potenciado por los iones introducidos dentro del sistema de la celda, en la segunda, la migración y transporte de los iones hidrogeno y las especies adsorbidas empiezan a tener menor significancia y la corriente decrece gradualmente, así, la variación de corriente y su tendencia puede explicar la resistencia, el consumo de energía y los fenómenos de transporte de las especies contenidas en el sistema, Kim *et al.*, (2001). Las reacciones de electrolisis aceleran el proceso de óxido-reducción facilitando la desestabilización del lixiviado y la formación de grupos ionizables en el mucilago que ayudan a la adsorción de los coloides, permitiendo la formación de flóculos.

Los parámetros fisicoquímicos (figura 11) a pH neutro, evaluados en los lixiviados tratados por los dos métodos, se encuentran dentro de la norma nacional, los cuales al ser comparados con los tratados en la planta de Pírgua reflejan valores más deseables y por consiguiente un proceso de coagulación-floculación eficiente en la remoción de partículas contaminantes: menor alcalinidad (mg CaCO₃ / L) y sólidos totales (ST), más baja conductividad (μS), (límite no establecido por el decreto). Los lixiviados tratados en planta muestran alta concentración de iones orgánicos e inorgánicos en la suspensión. La disminución de los parámetros mencionados y el valor de sólidos totales, es proporcional a la concentración y naturaleza de las partículas, lo que influye en la velocidad de formación de flóculos y la sedimentación.

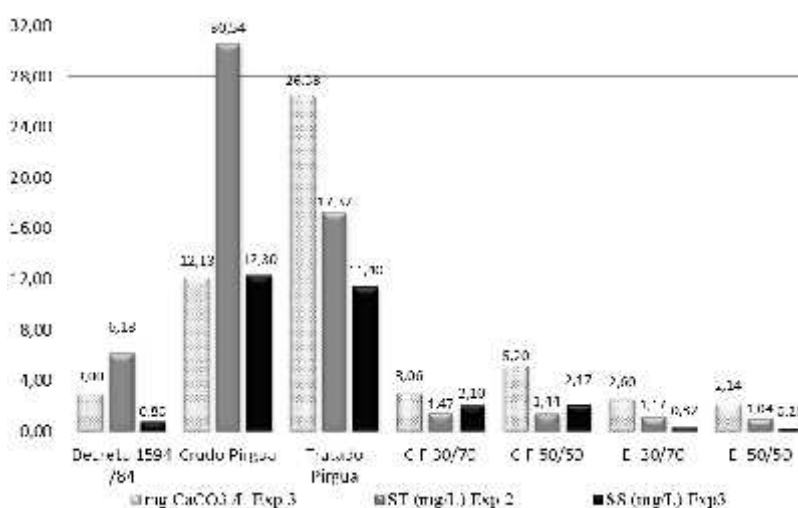


Figura 11. Parámetros fisicoquímicos obtenidos después de la aplicación de los tratamientos coagulación-floculación y electrocoagulación con concentraciones M/L 30/70 y M/L 50/50 a pH neutro

Conclusiones

El tratamiento de lixiviados con el mucílago de *Opuntia ficus indica* mostró ser efectivo en la remoción de partículas sólidas contaminantes. La electrocoagulación en una concentración del 30% (tratamiento M/L_{30/70}) a pH 7 presentó los mayores valores de remoción de turbidez, disminuyendo el porcentaje de sólidos suspendidos hasta en 67 unidades porcentuales en promedio en las tres secciones de la celda electrolítica.

Los parámetros fisicoquímicos del lixiviado tratado con el mucílago por los métodos de coagulación - floculación y electrocoagulación mostraron registros deseables cumpliendo con lo establecido en la norma nacional para aguas de vertimiento agrícola. El pH 7 resultó ser el más eficiente en los procesos descritos.

Las condiciones recomendables para el tratamiento de lixiviados por coagulación – floculación con *Opuntia ficus indica* son: Medio neutro (pH7), Concentración mucílago/ lixiviado: 30/70, tiempo de coagulación: 70 minutos. Para la electrocoagulación son: Medio neutro (pH7), Concentración mucílago/ lixiviado: 30/70, tiempo de electrocoagulación 100 minutos y es independiente a la sección de la celda.

Las propiedades coagulantes-floculantes más destacadas del mucílago de *Opuntia ficus indica* son: buena capacidad de formación de flóculos, gran capacidad biodegradable, mayor velocidad de sedimentación con baja producción de lodos, por lo que es una excelente alternativa natural y de bajo costo para el tratamiento de lixiviados.

Los lixiviados crudos y tratados de la planta Pircua no cumplen con lo establecido en la normatividad nacional para el parámetro de alcalinidad, a diferencia de los lixiviados tratados con *Opuntia ficus indica*.

Recomendaciones

Continuar el estudio, para determinar concentraciones intermedias que proporcionen mejores resultados, para la remoción de turbidez por coagulación química.

En estudios posteriores evaluar la remoción de metales pesados en lixiviados mediante los tratamientos de coagulación-floculación y electrocoagulación empleando mucílago de *Opuntia ficus indica*.

Bibliografía

- Cabeza, A. *et al.* (2007). Ammonium Removal from Landfill Leachate by Anodic Oxidation, *Journal of Hazardous Materials*: **144**(3), 715-719 (2007).
- Chavarro, M. *et al.* (2006). Evaluación de la tratabilidad de los lixiviados en el relleno sanitario de Pereira mediante filtros anaerobios de flujo ascendente a escala piloto. *Scientia et Technica* **10**(30): 399-404.
- Cárdenas *et al.* (1997). Rheology and aggregation of cactus (*Opuntia ficus indica*) mucilage in solution. *Journal of the Professional Association for Cactus Development*. 2 p: 152–157.
- CER (2000). Leachate Treatment: Principles and options. **Curso superior sobre gestión y diseño de vertederos**. Club Español de Residuos. Madrid, España. 4 pp.
- Droppelmann, C. V. y Oettinger, M. (2009). Tratamiento en Lodo Activado del Lixiviado de un Relleno Sanitario. *Información Tecnológica*–Vol. 20 N°1–2009, pág.: 11-19 Universidad Andrés Bello, Facultad de Ecología y Recursos Naturales, Santiago-Chile
- Empresa de Aseo de Tunja SERVITUNJA (2009). Ficha Residuos sólidos Ciudades. Tunja, Colombia
- Empresa de Aseo de Tunja SERVITUNJA (2007). Caracterización de residuos sólidos domésticos. Tunja, Colombia.
- Karadag, D. *et al.* (2007). Ammonium removal from Sanitary Landfill Leachate using Natural Gördes Clinoptilolite, *Journal of Hazardous Materials* (2007), doi:10.1016/j.jhazmat.2007.08.019.
- Kemmer Frank (1989). *Nalco Manual del agua. Su naturaleza, tratamiento y aplicaciones*. México: Editorial McGraw-Hill. pp. 8-2, 8-4.

- Kim, *et al.* (2001). Monitoring of electrokinetic removal of heavy metals in tailing-soil using sequential extraction analysis. En: *Journal of Hazardous Materials*. 85: 195-211.
- López, E. (2000). Utilización de productos naturales en la clarificación de aguas para consumo humano. Universidad de la Habana. Cuba. Tesis de Maestría, Facultad de Ingeniería Química. ISPJAE.
- Miller, Et.al. (2008). Toward Understanding the Efficacy and Mechanism of *Opuntia* spp. as a Natural Coagulant for Potential Application in Water Treatment. *Environ Sci Technol*. **42**(12): 4274-4279.
- Ministerio de Salud. Decreto 1594 del 26 de junio de 1984.
- Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial. Viceministerio de Agua y Saneamiento. República de Colombia. Ficha residuos sólidos ciudades, Tunja, periodo 2009.
- Ministerio de Minas y Energía Instituto Colombiano de Geología y Minería (2005). Informe de Visita Técnica al Relleno Sanitario de la Ciudad de Tunja Boyacá. República de Colombia pp 12-13.
- Nobel, P. *et al.* (1992). Mucilage in cactus apoplastic capacitance, associated solutes, and influence on tissue water relations. *Journal of Experimental Botany*. **43**(250): 641-648.
- Okuda, *et al.* (2001). Isolation and characterization of coagulant extracted from *Moringa oleifera* seed by salt solution. *Water Res*. **3**(2): 405-410.
- Primo, O. *et al.* (2007). Photo-Fenton Process as an Efficient Alternative to the Treatment of Landfill Leachates, *Journal of Hazardous Materials* (2007), doi:10.1016/j.jhazmat.2007.09.053.
- Renou, S. *et al.* (2008). Landfill Leachate Treatment : Review and Opportunity, *Journal of Hazardous Materials*: **150**(3): 468-493.
- Restrepo Osorno Hernán Alonso (2009). Evaluación del proceso de coagulación - Floculación De Una Planta De Tratamiento De Agua Potable. Universidad Nacional De Colombia Facultad De Minas Medellín. P. 28
- Rodríguez *et al.*, 2006, tratamientos avanzados de aguas residuales industriales.
- Sáenz C, *et al.* (2004). *Opuntia* Spp Mucilage'S: A Functional Component With Industrial Perspectives. En: *Journal Of Arid Environments*. 57: 275-290.
- Sáenz, C. *et al.* (1993); Alternativas de industrialización de la tuna (*Opuntia ficus-indica*). *Alimentos*. 18: 29-32
- Sepúlveda E. *et al.* (2007), Extraction and characterization of mucilage in *Opuntia* spp, *Journal and Environments* 68 : 534-545.
- Standard Methods for the examination of water and wastewater (2005). Twenty first edition, APHA, AWWA, WEF.
- Uygur, A. and Kargi, F (2004). Biological Nutrient Removal from Pre-Treated Landfill Leachate in a Sequencing Batch Reactor, *Journal of Environmental Management*: **71**(1), 9-14 (2004).