

Estudio preliminar del uso de la semilla de tamarindo (*Tamarindus indica*) en la coagulación-floculación de aguas residuales

Fecha de recepción: 28/06/2010

Fecha de aceptación: 27/09/2010

Róger Gurdián López¹
Juana María Coto Campos²

Palabras clave

Coagulantes naturales, agua residual, coagulación/floculación.

Key words

Natural coagulants, wastewater, coagulation/flocculation.

Resumen

En este estudio se compara el desempeño de dos coagulantes convencionales, sulfato de aluminio y cloruro de hierro (III), con el de la semilla de tamarindo (*Tamarindus indica*), en dos tipos de agua residual: una con alta turbidez, proveniente de la industria textil, y otra con baja turbidez, del tipo sanitario o doméstico.

La semilla de tamarindo no mostró buen desempeño en la remoción de turbidez en aguas residuales de baja turbidez. En lo que respecta a la DQO, podría sustituir a los coagulantes tradicionales, ya que presentó una remoción ligeramente menor a la lograda por estos. Asimismo, muestra un mejor desempeño en la remoción de turbidez en aguas residuales muy turbias, como las de la industria textil.

Abstract

In this study the performance of two conventional coagulants is compared, aluminum sulphate and iron chloride (III), with the one of tamarind seed (*Tamarindus indica*) in two types of wastewater: one with high turbidity coming from a textile industry, and another one with low turbidity, a sanitary or domestic type.

The tamarind seed did not show good performance in the removal of turbidity in low turbidity wastewater. With regard to COD, it could replace traditional coagulants, since it presented a removal efficiency slightly smaller than the obtained with them. Also, it shows a better performance in the removal of turbidity in very turbid wastewaters like those of the textile industry.

1. Licenciado en Química Industrial. Departamento de Aseguramiento de la Calidad, Refinadora Costarricense de Petróleo (Recope), Costa Rica. Teléfono 2436-6059. Correo electrónico: rogergl09@gmail.com.
2. Licenciada en Química, con Maestría en Ingeniería Ambiental. Laboratorio de Manejo del Recurso Hídrico, Escuela de Química, Universidad Nacional, Costa Rica. Teléfono 2277-3824. Correo electrónico: jcoto@una.ac.cr

Introducción

Durante la última década, los conflictos ambientales se han convertido en temas recurrentes en la agenda de gobiernos, instituciones educativas, medios de comunicación, organizaciones, empresas y espacios de acción ciudadana. La preocupación por el tema ambiental es impulsada principalmente por el reconocimiento de que los problemas ambientales son consecuencia de nuestro estilo de desarrollo, es decir, se trata de un fenómeno sociocultural.

En ese contexto, las organizaciones de todo tipo cada día están más empeñadas en alcanzar y demostrar un sólido desempeño ambiental mediante el control de los impactos de sus actividades, productos y servicios. También lo hacen en el marco de crecientes posibilidades de vinculación comercial y de una legislación ambiental más estricta. Ello explica por qué en los últimos años los procesos de tratamiento de aguas residuales han tomado mayor importancia en nuestro país.

La eliminación de sólidos disueltos y suspendidos, uno de los objetivos del tratamiento primario de aguas residuales, influye directamente en la disminución de la demanda bioquímica de oxígeno, de la demanda química de oxígeno, de fosfatos, grasas, aceites, turbidez y color, entre otros parámetros característicos del agua residual. Esta se realiza mediante la desestabilización química de los coloides en el proceso de coagulación-floculación.

Las partículas causantes de turbidez y color presentan características coloidales (10^{-6} - 10^{-9} m de diámetro) con carga negativa en aguas a pH próximo a 7. El coagulante, sustancia de carga opuesta, se agrega para neutralizar esas cargas y permitir que las partículas coloidales se agrupen y formen partículas de mayor tamaño que puedan sedimentar.

Coagulantes primarios como el sulfato de aluminio y el cloruro de hierro pueden ser

fácilmente asimilados por los seres vivos, con potenciales consecuencias negativas a largo plazo. Por ejemplo, los efectos del sulfato de aluminio se asocian con el cáncer, el Alzheimer y enfermedades óseas; el cloruro de hierro se relaciona con varias formas de cáncer y con la inducción de daños en los cromosomas humanos (Poddar *et ál* 2004).

En los últimos años se buscan opciones limpias (con efecto nocivo mínimo) y económicas con las cuales se sustituyan los coagulantes primarios; entre ellas, las semillas de tamarindo (*Tamarindus indica*), morango (*Moringa oleifera*), nirmali (*Strychnos potarum*), planta de guar (*Cyamopsis psoraloides*), planta de sorela roja (*Hibiscus sabdariffa*), el polímero extraído de las pencas de la tuna (*Opuntia cochinellífera*), lentejas (*Lens esculenta*) y quitosano, polímero natural (Shults y Okun, 1990; Almendarez, 2004; Vargas y Romero, 2006). La mayoría de ellas se utiliza en la India y Asia para potabilizar aguas de consumo humano.

Entre las ventajas de utilizar sustancias naturales para el tratamiento de aguas residuales se encuentran: baja toxicidad del efluente y de los lodos generados, alta biodegradabilidad de los lodos y de las sustancias naturales que permanecen en el efluente, disminución de costos de adquisición e importación (si se utilizan sustancias o desechos locales) y aprovechamiento de desechos industriales y agropecuarios.

En este estudio se utilizó como coagulante semilla de tamarindo y su desempeño se comparó con el de dos coagulantes convencionales: sulfato de aluminio y cloruro de hierro III.

La semilla de tamarindo está compuesta en su mayoría por carbohidratos (57,1%), proteína (13,3%) y agua (11,3%). La fracción proteica está formada mayoritariamente por ácidos glutámico y aspártico (figura 1), glicina y leucina

Coagulantes primarios como el sulfato de aluminio y el cloruro de hierro pueden ser fácilmente asimilados por los seres vivos, con potenciales consecuencias negativas a largo plazo. Por ejemplo, los efectos del sulfato de aluminio se asocian con el cáncer, el Alzheimer y enfermedades óseas; el cloruro de hierro se relaciona con varias formas de cáncer y con la inducción de daños en los cromosomas humanos.

(Vázquez *et ál*, 1999); los dos primeros serían los responsables de la coagulación (Campos *et ál*, 2003).

En Costa Rica, el tamarindo se encuentra principalmente en Guanacaste, Orotina, Atenas y el litoral Pacífico, distribuido en algunas fincas y a las orillas de las playas. No existen terrenos destinados exclusivamente a su siembra.

Materiales y métodos

Para realizar los ensayos de coagulación se seleccionaron dos tipos de aguas residuales:

- Aguas residuales industriales crudas de la industria textil, con alta turbidez y mucho color. Proviene de la salida del tanque de homogenización de la planta de tratamiento y se generan principalmente en las operaciones de entintado y lavado de prendas y de equipos.
- Aguas residuales domésticas crudas, con baja turbidez y poco color. Proviene de la salida del tanque de homogenización de la planta de tratamiento. Consisten en una mezcla de aguas negras (alto contenido de materia orgánica y sólidos), aguas de limpieza (presencia de tensoactivos y sustancias desinfectantes), aguas de preparación de alimentos y limpieza de vajilla, con

alto contenido de materia orgánica, detergentes y sólidos, y un pequeño volumen de aguas de laboratorio (contenido de sustancias químicas).

Para la caracterización de las aguas residuales se colectó una única muestra puntual a la salida del tanque de homogenización, pues en esta unidad de proceso se logra una mezcla efectiva de todas las aguas residuales que llegan al sistema de tratamiento. Los parámetros de caracterización fueron: pH, turbidez, sólidos totales, sólidos disueltos, sólidos suspendidos, sólidos sedimentables, DBO_{5,20}, DQO y alcalinidad. Todos los análisis se realizaron por triplicado de acuerdo con los métodos establecidos en APHA, AWWA, WPCF (1998).

Se determinó la forma óptima de empleo de la semilla de tamarindo (temperatura del agua de desulpado, condiciones de molienda y de secado y tamaño de partícula) y los modificadores de pH (ácido y básico) adecuados para evitar su degradación.

El comportamiento del sulfato de aluminio y del cloruro de hierro III como coagulante de semillas de tamarindo, se determinó con base en la remoción de DQO y turbidez, en función del pH, en razón de que a partir de la DQO se determina indirectamente la DBO_{5,20}, pues se conoce la relación DBO_{5,20}/

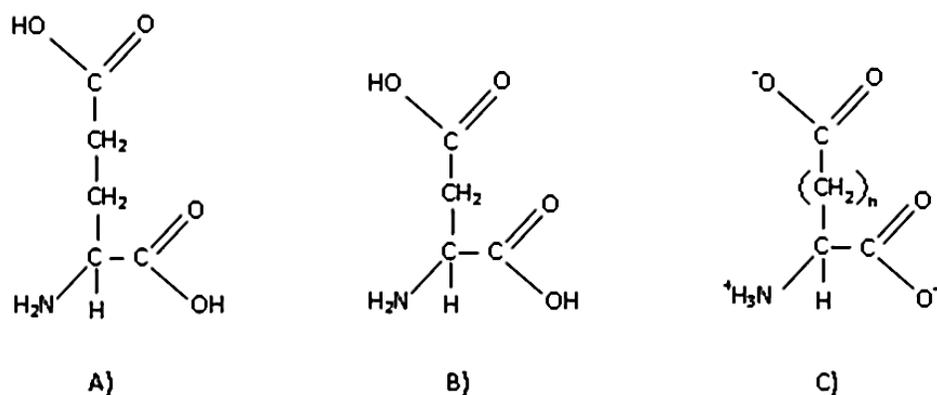


Figura 1. Estructura química: A) del ácido glutámico, B) del ácido aspártico, C) de la especie predominante a pH 5, n = 1 o 2.

Fuente: Mathews *et ál*, 2003.

DQO del agua residual. Por otro lado, la turbidez representa indirectamente la cantidad de sólidos suspendidos presentes en el agua residual. El pH permite determinar las condiciones óptimas para alcanzar el punto isoelectrico de la disolución, en el cual se logra la formación de flóculos capaces de precipitar.

Además, se realizó una prueba cualitativa para determinar la dosis de coagulante por utilizar en la prueba de jarras. La prueba se realizó con 100 mL de agua residual a tres diferentes valores de pH [(5,00, 7,00, 10,00) ± 0,01]. El coagulante primario se adicionó en gotas (0,05 mL), probándose disoluciones de 0,5%, 1%, 2%, 3%, 4% y 5% m/m. La disolución madre cuyo volumen de adición fue inferior al 10% del volumen de agua residual y que mostró formación de flóculos fue la utilizada en la prueba de jarras. En el caso de la semilla de tamarindo, sucesivamente se adicionaron al agua residual pequeñas cantidades de 0,1000 ± 0,0001g, hasta observar la aparición de flóculos.

Las pruebas de jarras se realizaron por triplicado para cada coagulante, en muestras de los dos tipos de agua residual, a tres valores de pH (5,00, 7,00, 10,00) ± 0,01. Para modificar el pH se utilizó HCl diluido (0,1M) y carbonato de calcio comercial en disolución (3% m/v). Luego se determinó la turbidez residual en el sobrenadante de cada recipiente. Se generaron curvas de isoturbidez utilizando el software *Surfer 8.0* (Golden Software Inc.) para establecer la dosis de coagulante y el pH, a los que se logra la mejor remoción de turbidez.

Al “blanco” (sin coagulante) y al tratamiento “óptimo” (jarra que presentó menor turbidez) de cada grupo de ensayos se les determinó el porcentaje de remoción de DQO.

Resultados y discusión

De la caracterización de las aguas residuales de la textilera se destacan los siguientes aspectos:

- Presenta elevados valores de pH y de alcalinidad, en promedio $9,66 \pm 0,01$ y $414 \pm 1 \text{ mg/L CaCO}_3$, respectivamente y una turbidez promedio de $56,8 \pm 0,1$ NTU.
- Los sólidos totales están constituidos mayoritariamente por sólidos disueltos (95%), los cuales se atribuyen a colorantes, sustancias de lavado, retardantes de llama, las que proveen resistencia al moho y al encogimiento, las que proporcionan repelencia al agua, entre otras, que generalmente son sales inorgánicas solubles en agua.
- La relación DBO/DQO, con valor de 0,25, evidencia el carácter poco biodegradable del efluente (Hernández, 1996).

Por otra parte, las aguas residuales domésticas poseen valores de pH y alcalinidad moderados: $7,78 \pm 0,01$ y $180 \pm 1 \text{ mg/L CaCO}_3$, respectivamente; baja turbidez, en promedio $30,3 \pm 0,1$ NTU; sólidos totales constituidos en su mayoría por sólidos disueltos (78%), y una relación DBO₅/DQO de 0,51, por lo que se clasifica como biodegradable (Hernández, 1996). Aunque esta agua es tratable mediante sistemas biológicos, el uso de procesos de coagulación para reducir los sólidos suspendidos y disueltos permite disminuir la cantidad de material oxidable, con lo que se abarata el costo asociado a la energía eléctrica necesaria para la aireación (Hwa y Cheng, 2006).

A partir de las pruebas cualitativas de formación de flóculos se determinó que la temperatura del agua de despulpado no tiene efectos significativos en la formación de flóculos, y que los mejores resultados de floculación se obtuvieron a pH 5,00 y a un tamaño de partícula inferior a 1 mm.

A partir de gráficos de isoturbidez similares a los que se presentan en las figuras 2 y 3 se generaron los datos que se incluyen en los cuadros 2 y 3.

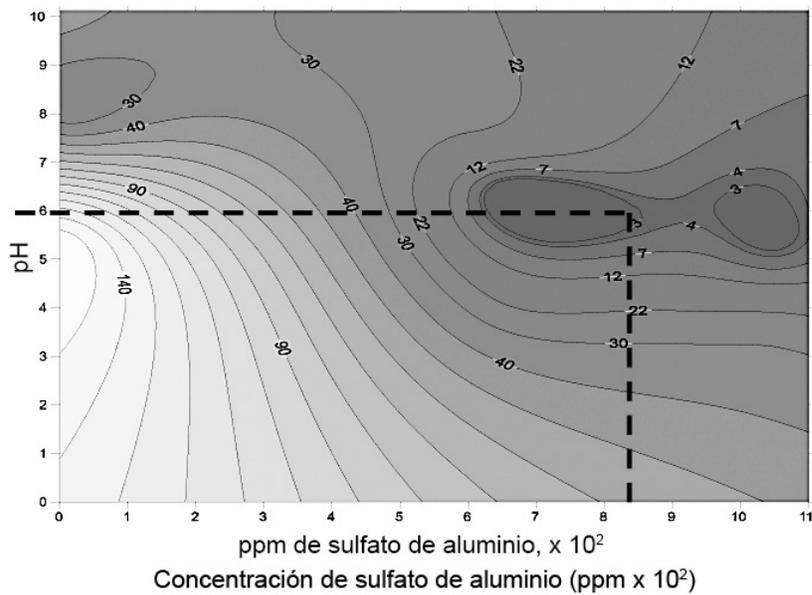


Figura 2. Curva de isoturbidez para determinar dosis óptima de sulfato de aluminio (870 ppm, pH 6,00) en aguas residuales de una industria textil.

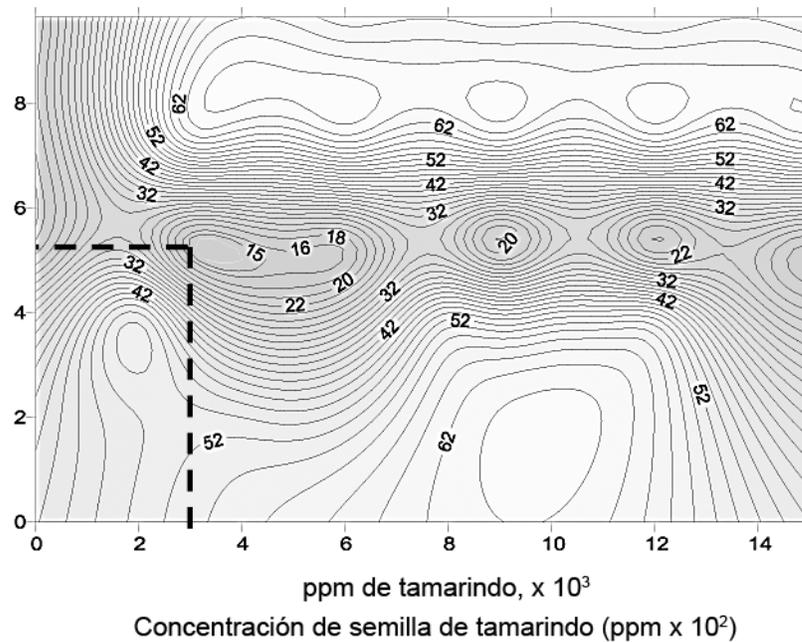


Figura 3. Curva de isoturbidez para determinar dosis óptima de semilla de tamarindo (3500 ppm, pH 5,00) en aguas residuales de una industria textil.

Cuadro 2. Dosis de coagulante (promedio) y pH óptimos utilizando sulfato de aluminio al 5% (m/v), cloruro de hierro (III) al 5% (m/v) y semilla de tamarindo en la coagulación-floculación del agua residual de una industria textil.

	Dosis promedio (ppm)	pH	Remoción turbidez (%)	Remoción DQO (%)
Sulfato de aluminio	700	5,78	93,1	45,8
Desviación estándar	151	0,46	4,6	7,7
Cloruro de hierro (III)	837	4,80	97,6	46,7
Desviación estándar	198	0,36	1,03	9,08
Semilla de tamarindo	3500	5,17	18,9	29,2
Desviación estándar	500	0,29	7	8

Cuadro 3. Dosis de coagulante (valores promedio) y pH óptimos utilizando sulfato de aluminio al 5% (m/v), cloruro de hierro (III) al 5% (m/v) y semilla de tamarindo en la coagulación-floculación del agua residual doméstica.

	Dosis promedio (ppm)	pH	Remoción turbidez (%)	Remoción DQO (%)
Sulfato de aluminio	480	6,50	81,1	59,1
Desviación estándar	299	1	7	20
Cloruro de hierro (III)	627	6,80	97,9	62,3
Desviación estándar	25	0,44	0,9	26
Semilla de tamarindo	4667	5,56	22,3	43,5
Desviación estándar	1155	0,1	4	3

Agua residual de una industria textil

La remoción promedio de turbidez con uso de sulfato de aluminio fue bastante alta, de un 93,1%, y la de DQO de un 45,8%. Aunque la dosis determinada experimentalmente es elevada, las condiciones cotidianas de operación de la planta de tratamiento en la industria son: dosis de 962 ppm, con adición de cal comercial previamente a la adición del coagulante para aumentar la alcalinidad del

agua y favorecer la coagulación, así como para obtener un pH de salida cercano a 7, con lo cual se obtiene una buena remoción de turbidez y color.

El pH óptimo obtenido se encuentra en el rango teórico de 5 a 7,5 y con el utilizado actualmente en planta. Los resultados concuerdan con los del estudio realizado por Ara (2002) sobre pruebas de coagulación / floculación efectuadas en aguas de industrias textiles de Pakistán:

dosis promedio de 1000 ppm a pH entre 5 y 6, y remoción de turbidez de 95% y de DQO de 20-50%.

Con respecto al cloruro de hierro (III), la dosis promedio fue de 837 ± 198 ppm, mucho mayor que el valor teórico (hasta 160 ppm). La baja alcalinidad (414 mg/L CaCO_3) del agua residual hace que la dosis requerida para lograr la coagulación sea mayor (Arboleda, 2000). La remoción de turbidez (97,6%) y de DQO (46,7%) y el pH óptimo concuerdan con el estudio realizado por Ara (2002).

La dosis promedio de semilla de tamarindo fue de 3500 ± 500 ppm; la remoción promedio de turbidez fue muy baja (18,9%), al igual que la de DQO ($36,7 \pm 8\%$). La alta concentración de material particulado "inerte" que acompaña al coagulante, parte del cual se mantiene en suspensión durante la coagulación, afecta ambos parámetros. Una posterior filtración de este material logró disminuir notablemente la turbidez y la DQO.

Aguas residuales domésticas

La dosis de sulfato de aluminio en estas aguas fue de 480 ± 299 ppm a pH 6,50 \pm 1,00, lográndose una remoción de turbidez de $81,1 \pm 1\%$, y de DQO de 59,1%.

Para el cloruro de hierro (III), la dosis promedio fue de 627 ± 25 ppm, a un pH de $6,80 \pm 0,44$. El promedio de remoción de turbidez fue del $97,9 \pm 0,9\%$ y de DQO fue de $62,3 \pm 26\%$. Esta sustancia presenta características deseables para el tratamiento de este tipo de aguas, ya que no solo logra un alto porcentaje de remoción de turbidez, sino que también elimina un alto porcentaje de la DQO y mantiene valores aceptables de pH.

La dosis promedio de semilla de tamarindo fue de 4667 ± 1155 ppm a pH $5,56 \pm 0,01$, lográndose porcentajes de remoción de $22 \pm 4\%$ y $43 \pm 3\%$ para turbidez y DQO, respectivamente. La remoción de la DQO alcanzada en estas aguas fue mayor que la lograda en las aguas de la industria

textil, lo cual convierte a la semilla en un buen agente reductor de la DQO de aguas residuales domésticas.

Campos *et ál* (2003), en su análisis de los posibles componentes responsables de la coagulación de la *Moringa oleifera*, propone los ácidos glutámico y aspártico, por ser sustancias que poseen grupos con cargas formales negativa y positiva que le permiten desestabilizar y coagular un agua residual.

Al igual que la *Moringa oleifera*, la semilla de tamarindo presenta proteínas constituidas principalmente por aminoácidos como glicina, leucina, ácido glutámico y aspártico. La glicina y la leucina son aminoácidos alifáticos, no solubles en agua, y los ácidos glutámico y aspártico son aminoácidos con carácter ácido y solubles en agua (Mathews *et ál*, 2003). Lo anterior haría suponer que las sustancias responsables de la coagulación en la semilla de tamarindo son las terminaciones de ácido glutámico y aspártico.

Estas sustancias también se encuentran en la cáscara de la semilla, la cual contiene mucílagos que son polisacáridos heterogéneos con un alto contenido en galactosa, manosa, glucosa y derivados (principalmente ácidos), los cuales, al ponerse en contacto con el agua, se hinchan y forman soluciones altamente viscosas, que pueden permitir la aglomeración de partículas. Mishra y Bajpai (2006) y Bajpai *et ál* (2006) emplearon un extracto del mucílago para evaluar la remoción de sulfatos y fosfatos, alcanzando un 75% de remoción, con una dosis de 50 ppm, a pH ácido. En el presente estudio, la semilla de tamarindo también mostró un mejor desempeño a pH ácido.

El pH de funcionalidad de cada coagulante varió en el rango de 4,80 a 5,78, partiendo de un valor ácido con el cloruro de hierro (4,80), seguido por la semilla de tamarindo (5,58) y el sulfato de aluminio (5,78).

Al igual que la Moringa oleifera, la semilla de tamarindo presenta proteínas constituidas principalmente por aminoácidos como glicina, leucina, ácido glutámico y aspártico. La glicina y la leucina son aminoácidos alifáticos, no solubles en agua, y los ácidos glutámico y aspártico son aminoácidos con carácter ácido y solubles en agua.

La semilla de tamarindo es un potencial sustituto de los coagulantes convencionales actualmente utilizados, ya que remueve entre un 85% y un 75% de turbidez del agua residual, respectivamente. Sin embargo, la remoción no alcanza valores superiores a los logrados por las sustancias químicas tradicionales (95%).

En cuanto a remoción de DQO, el cloruro de hierro (III) y el sulfato de aluminio parecen ser las mejores opciones.

Con todas las sustancias se alcanzó una remoción de turbidez superior al 20%. El cloruro de hierro (III) fue la sustancia con la cual se alcanzó mayor remoción, seguida por el sulfato de aluminio. La semilla de tamarindo mostró una baja remoción de turbidez, incluso después de realizar filtración rápida, por lo que se puede concluir que presenta un mejor desempeño en aguas con alta turbidez (industria textil) que en aquellas con baja turbidez, como las aguas residuales domésticas.

Aun cuando la semilla de tamarindo no presenta porcentajes de remoción de turbidez tan altos como los de las sustancias convencionales, logra remover la turbidez y el DQO a valores tales que se ubican dentro de los límites establecidos en el Reglamento de Vertido y Reuso de Aguas Residuales.

Conclusiones

En ambos tipos de aguas residuales, el sulfato de aluminio y el cloruro de hierro (III) resultaron ser las sustancias que removieron mayor turbidez y DQO, siendo el cloruro de hierro (III) la sustancia con mejores características para el tratamiento de las aguas residuales domésticas.

La semilla de tamarindo no mostró buen desempeño para remover turbidez en aguas residuales de baja turbidez; no obstante, en lo que respecta a la remoción de DQO, podría sustituir a los coagulantes tradicionales, pues presentó una remoción

ligeramente menor que la lograda por estos. Asimismo, muestra un mejor desempeño en la remoción de turbidez en aguas residuales muy turbias (industria textil).

Este producto natural se vislumbra como un coagulante económico y con el cual se puede alcanzar buena remoción de turbidez y DQO, pero conviene realizar estudios para identificar y extraer, mediante procesos simples y de bajo costo, las sustancias que permiten la coagulación, esto con el fin de maximizar su función de coagulante y que su uso pueda ser promovido en la industria nacional.

Bibliografía

- Almendárez, N. (2004). *Comprobación de la efectividad del coagulante (Cochifloc) en aguas del Lago de Managua "Piedras Azules"*. Revista Iberoamericana de Polímeros, 5,1.
- APHA, AWWA, WPCF. (1998). *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater*. 20th edition. Washington, DC, U.S.A., 1142.
- Arboleda J. (2000). *Teoría y práctica de la purificación del agua*. Tercera edición, Asociación Colombiana de Ingeniería Sanitaria, ACODAL. Mc Graw Hill, Colombia.
- Ara S. (2002). *Textile Wastewater Treatment by Coagulation Process*. Disponible en <http://www.cpp.org.pk>, Clean Production Program (CPP), Pakistán.
- Bajpai M, S; Pal, A; Mishra, M; Agrawal, S. Pandey (2006). *Tamarindus indica Mucilage and its Acrylamide-grafted Copolymer as Flocculants for Removal of Dyes*. Colloid & Polymer Science, 285, 2, 161-168.
- Campos J.; G. Colina; N. Fernández; G. Torres; B. Sulbarán & G. Ojeda (2003) *Caracterización del agente coagulante activo de las semillas de Moringa oleífera mediante HPLC*. Universidad de Zulia, Boletín del Centro de Investigaciones, 37, 1, Maracaibo, Venezuela, 35-43.
- Hernández, A. (1996) *Depuración de aguas residuales*. 3^a edición, 2^a impresión. Editorial Paraninfo S.A., España. 33, 315, 402-419, 428, 494-497, 747-767.

- Hwa Fung, W & Po Cheng (2006) *Use of Chitosan as Coagulant to Treat Wastewater from Milk Processing Plant*. Journal of Polymers and the Environment. 411- 417.
- Mathews C. K; van Holde, K. Ahern (2003) *Bioquímica*. 3ª edición. Editorial Addison Wesley. España.141-150.
- Mishra A. & M. Bajpai (2006) *Removal of Sulphate and Phosphate from Aqueous Solutions Using a Food Grade Polysaccharide as Flocculant*. Colloid Polymer & Science. 284, 443-448.
- Poddar S.; G. Talukder & A. Sharma (2004). *Chromosome Damage Induced by Ferric Chloride in Human Peripheral Lymphocytes*. International Journal of Human Genetics. 4, 261-264.
- Vargas M. & L. Romero (2006) *Aprovechamiento de algunos materiales en el desarrollo de coagulantes y floculantes para el tratamiento de aguas en Costa Rica*. Tecnología en Marcha. 19-4-2006. 37-41.
- Vázquez Yanes C., A. I; Batis Muñoz, M. I; Alcocer Silva, M; Gual Díaz & C. Sánchez Dirzo (1999). *Árboles y arbustos potencialmente valiosos para la restauración ecológica y la reforestación*. Reporte técnico del proyecto J084. CONABIO - Instituto de Ecología, UNAM, México. 91-95.