

MEZCLAS CON POTENCIAL COAGULANTE PARA CLARIFICAR AGUAS SUPERFICIALES

Rudy SOLÍS SILVAN, José Ramón LAINES CANEPA* y José Roberto HERNÁNDEZ BARAJAS

División Académica de Ciencias Biológicas, Universidad Juárez Autónoma de Tabasco, Carretera Villahermosa-Cárdenas Km. 0.5 S/N, entronque a Bosques de Saloya, CP. 86150, Villahermosa, Tabasco, México

*Autor responsable; josra_2001@yahoo.com.mx

(Recibido septiembre 2011, aceptado marzo 2012)

Palabras clave: coagulación, floculación, prueba de jarras, sólidos suspendidos, turbiedad, color

RESUMEN

Las partículas suspendidas confieren color y turbiedad indeseables a las aguas superficiales. El uso de agentes químicos como el sulfato de aluminio permite remover una proporción significativa de los sólidos suspendidos, clarificando el agua para su potabilización posterior. En este estudio se compararon mezclas con potencial coagulante compuestas por almidón de yuca (*Manihot esculenta* Crantz) y sulfato de aluminio grado comercial, que permitirían reducir la cantidad sulfato de aluminio usado en plantas de tratamiento de agua. Mediante prueba de jarras se determinó la dosis óptima del sulfato de aluminio (30 mg/L, tratamiento 1), en la clarificación de una muestra de agua de río (color de 85 CU, turbiedad de 70 NTU y pH de 6.8). Esta dosis, sirvió como base para la preparación de seis mezclas con distintas composiciones de almidón y sulfato de aluminio (tratamientos 2 a 7). En cada tratamiento se midieron tres parámetros fisicoquímicos relevantes en ensayos de coagulación-floculación: color, turbiedad y pH. Los resultados indican que la mayor reducción de color (94 % de eficiencia) se obtuvo con el tratamiento 2 (2 mg/L de yuca más 28 mg/L de sulfato de aluminio). La remoción de color en los tratamientos 3 y 4 (4 mg/L de yuca más 26 mg/L de sulfato de aluminio y 6 mg/L de yuca más 24 mg/L de sulfato de aluminio, respectivamente), son estadísticamente iguales al tratamiento 1 de acuerdo con la prueba de comparación de medias de Dunnett. En cuanto a la remoción de turbiedad se observa que los tratamientos 1 y 2 son estadísticamente iguales de acuerdo con la prueba de comparación de medias de Dunnett, con una reducción del 98.7 y 97.9 % respectivamente. Finalmente, el pH no varió significativamente para todos los tratamientos.

Key words: coagulation, color, flocculation, jar test, suspended solids, turbidity

ABSTRACT

The suspended particles cause both color and turbidity in surface waters. The use of chemical agents such as aluminum sulfate can remove a significant proportion of suspended solids, clarifying water in the first stage of purification. This study compared potential coagulant mixtures consisting of cassava starch (*Manihot esculenta* Crantz) and a commercial grade aluminum sulfate, which could reduce the amount of aluminum sulfate spent in water treatment plants. Using the jar test procedure, the optimal dose of aluminum sulfate (30 mg/L, treatment 1) to clarify a river water sample (a color of

85 CU, a turbidity of 70 NTU and a pH of 6.8) have been determined. This dose was the basis for the preparation of six mixtures with different compositions of starch and aluminum sulfate (treatments 2 to 7). In each treatment, three relevant physicochemical parameters in the coagulation-flocculation were measured: color, turbidity and pH. The results indicate that the best color removal (94 % efficiency) was obtained with treatment 2 (2 mg/L of cassava over 28 mg/L of aluminum sulfate). The color removal for treatments 3 and 4 (4 mg/L of cassava over 26 mg/L of aluminum sulfate and 6 mg/L of cassava over 24 mg/L of aluminum sulfate, respectively) are statistically equal to those of treatment 1 according to the Dunnett's test for comparing means. With respect to turbidity removal, no significant difference between treatments 1 and 2 were observed, with a reduction of 98.7 % and 97.9 % respectively. Finally, the pH variation was insignificant in all treatments.

INTRODUCCIÓN

Los tratamientos para la purificación de agua superficial son de suma importancia para la sociedad, ya que de estos depende la calidad del agua para consumo humano, doméstico y usos de diferente índole. Si los tratamientos se aplican de manera correcta cada comunidad podría satisfacer un requerimiento esencial para la vida. Las grandes ciudades dependen de abastecimiento superficial y en la mayoría de los casos sus fuentes son corrientes, lagos o embalses (Guerrero 1962). En el proceso de potabilización de las aguas, la clarificación es una de las etapas más importantes ya que permite la remoción de materiales de naturaleza coloidal en suspensión tales como arcilla, limo y lodos. Para lograr la clarificación del agua, es necesaria la utilización de agentes coagulantes así como coadyuvantes de coagulación, que permiten eliminar un porcentaje significativo de las partículas en suspensión (típicamente entre 80 y 90 %); este proceso es conocido como coagulación-floculación. Los agentes convencionales utilizados en la coagulación-floculación son sales metálicas tales como el sulfato de aluminio, el cloruro férrico y el sulfato ferroso. Actualmente, el coagulante más utilizado es el sulfato de aluminio multihidratado (generalmente $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 \times 18\text{H}_2\text{O}$) (CEPIS 1983). Este compuesto al disociarse en agua, sufre una serie de reacciones con los iones alcalinos presentes en el agua, formando iones complejos, polímeros e hidróxido de aluminio insoluble, que pueden ser adsorbidos por las partículas coloidales suspendidas en el agua produciendo la desestabilización de las cargas y favoreciendo la sedimentación de las mismas (Martínez 2003). Para determinar la dosis óptima de los agentes químicos empleados en el proceso de coagulación-floculación se utiliza un procedimiento de laboratorio conocido como la prueba de jarras, con esta se determina la dosis de agente más efecti-

va y económica para una intensidad y duración de mezclado particular, y en ella se utiliza una serie de mezcladores rotacionales de escala laboratorio a fin de conseguir el mezclado uniforme de varias muestras simultáneamente, para que sea posible ajustar hasta igualar los gradientes de velocidad a escala de planta para floculación y mezclado rápido. Debido a que la disociación del agente coagulante produce una serie de reacciones en equilibrio químico, su desempeño depende del pH. En el caso del sulfato de aluminio, la formación óptima de flóculos ocurre en un intervalo de pH entre 6.0 y 8.0 (Schulz y Okun 1998).

Desde el punto de vista ambiental, se ha reportado que en análisis realizados a muestras de aguas potabilizadoras se han encontrado trazas de sulfato de aluminio, lo que indica que el control en cuanto a la adición de esta sustancia no es apropiado, representando así un riesgo potencial para la salud humana (Martínez 2003). Bratby (2006) y Colbert (2007) mencionan que existe una preocupación creciente de la relación entre el aluminio residual y efectos neurológicos adversos, principalmente manifestado en la enfermedad del Alzheimer.

Además de los agentes convencionales basados en sales metálicas, se emplean polímeros utilizados como coadyuvantes de coagulación los cuales se clasifican en dos categorías: naturales y sintéticos. Los polielectrolitos naturales importantes incluyen polímeros de origen biológico, y los derivados del almidón, de la celulosa y alginatos. Según el tipo de carga al momento de introducirlo en el agua (negativo, positivo o neutro), se clasifican en polielectrolitos aniónicos, catiónicos y no iónicos, respectivamente (Tatsi *et al.* 2003). La acción de los polielectrolitos se puede dividir en tres categorías generales. En la primera, los polielectrolitos actúan como coagulantes disminuyendo las cargas de las partículas. Cuando las partículas están cargadas negativamente, se emplean

polielectrolitos catiónicos. En esta aplicación se considera que los polielectrolitos catiónicos son coagulantes primarios. La segunda forma de acción de los polielectrolitos es la formación de puentes entre las partículas. En este caso los polímeros aniónicos y no iónicos (por lo general ligeramente aniónicos al introducirlos en agua), se adhieren a un número de puntos de adsorción de la superficie de las partículas presentes en el efluente sedimentado. El tercer tipo de acción de los polielectrolitos puede clasificarse como una acción de coagulación-floculación de puentes, que resulta al emplear polielectrolitos catiónicos de alto peso molecular (Tchobanoglous *et al.* 2003). El almidón contiene generalmente alrededor del 20 % de una sustancia soluble en agua llamada amilosa y el 80 % de una insoluble conocida como amilopectina. Ambas fracciones corresponden a dos carbohidratos diferentes, de peso molecular elevado. Tanto la amilosa como la amilopectina están constituidas por unidades de D-(+)-glucosa, pero difieren en tamaño y forma (Durán *et al.* 2005).

El uso de materiales naturales de origen vegetal para clarificar las aguas superficiales turbias no es una idea reciente. Las escrituras en sánscrito procedentes de la India y fechadas varios siglos antes de Cristo, hacen la referencia de las semillas del árbol nirmali (*Strychnos potatorum*) utilizadas hace 4000 años para clarificar aguas pluviales turbias. En Perú, el agua se ha clarificado tradicionalmente con la savia mucilaginoso de “pencas” obtenidas de ciertas especies de cactáceas (Kirchmer *et al.* 1975). Jahn (1979) describe que en varios países de África (Chad, Nigeria, Sudán y Túnez) los aldeanos añaden plantas nativas al agua para beber, con el fin de reducir la turbiedad, los olores y los sabores desagradables. Al mismo tiempo estas sustancias también han demostrado su eficacia como coadyuvantes de la coagulación en el tratamiento de aguas en pequeñas comunidades. Otros polímeros naturales que se han utilizado exitosamente en Inglaterra son la hidroxietil celulosa (HEC) y el “Wisprofloc”, derivado del almidón de patata (Schulz y Okun 1998). Qudsieh *et al.* (2008) sintetizaron un nuevo copolímero coagulante de poli(acrilamida) combinado con almidón de *Metroxylum sagu*, un material extraído de una palma asiática. El estudio demostró una alta remoción de turbiedad (del 97 %) en soluciones estándar de caolinita. You *et al.* (2009) evaluaron el desempeño de un nuevo agente floculante basado en una mezcla de almidón de maíz y quitosano. Nkurunziza *et al.* (2009) estudiaron las propiedades antimicrobianas de *Moringa oleifera* en el tratamiento de aguas superficiales de alta turbiedad. Recientemente, Fabris *et al.* (2010) evaluaron

el desempeño de quitosano como coagulante natural en sistemas de tratamiento de agua potable. Los resultados demostraron que este biopolímero natural es capaz de remover partículas suspendidas del agua permitiendo disminuir la dosis de cloro necesaria en la etapa de desinfección.

Otros estudios de coagulación-floculación que involucran el empleo de coagulantes de origen vegetal están orientados al tratamiento de aguas industriales. Beltrán-Heredia *et al.* (2009) emplearon dos agentes coagulantes naturales, uno de ellos es un agente basado en taninos y el segundo es un extracto de la semilla de *Moringa oleifera*. Ambos agentes demostraron altas eficiencias de remoción de colorantes sintéticos aunque sugirieron que la concentración del colorante es un factor clave en el desempeño del proceso de coagulación-floculación. Anastasakis *et al.* (2010) evaluaron el poder floculante del mucílago de plantas herbáceas de la familia *Malvaceae* (malvas e hibiscos) al emplear como agente coagulante sales de aluminio en el tratamiento de efluentes de diversa naturaleza. Los resultados demostraron que el mucílago de hibiscos requiere de menores dosis para obtener las mismas eficiencias de remoción de partículas suspendidas aunque ambos floculantes fueron incapaces de disminuir el contenido de carbono orgánico disuelto. Los autores sugieren que la misma naturaleza orgánica de los floculantes propuestos evita la disminución de este parámetro de calidad del agua.

En Latinoamérica, actualmente se realiza investigación sobre el nopal mexicano (*Opuntia ficus-indica*) en la clarificación de suspensiones coloidales y así como de diversos productos naturales en la clarificación de agua para consumo humano (Almendárez 2004). Martínez *et al.* (2003) utilizaron *Cactus lefaria* en la clarificación de aguas superficiales que actúa como un coagulante removiendo turbiedad y color. Un año más tarde Almendárez (2004) comprobó la efectividad de coagulación de un polímero natural extraído de las pencas de *Opuntia cochinellifera* (planta nativa de Centroamérica) en aguas superficiales. Navarro *et al.* (2006) emplearon biopolímeros naturales que tienen la capacidad de adsorber metales pesados de aguas industriales. Recientemente, Laines *et al.* (2008) utilizaron mezclas con potencial coagulante a base de almidón de plátano y coagulantes convencionales en el tratamiento de aguas de lixiviados provenientes de un relleno sanitario.

El propósito de la presente investigación es comprobar el potencial de coagulación-floculación de la mezcla de un polímero natural basado en almidón extraído de la yuca (*Manihot esculenta* Crantz)

con sulfato de aluminio comercial, comparando la eficiencia de remoción de partículas suspendidas con la eficiencia alcanzada con solamente sulfato de aluminio grado comercial. Para evaluar la eficiencia, se utilizaron muestras de agua superficial de un río de importancia en la región sureste de México, el Río Carrizal, tributario del Río Grijalva. En este trabajo de investigación se llevaron a cabo experimentos de prueba de jarras para la obtención de la dosis óptima de sulfato de aluminio. Una vez obtenida la dosis óptima, se procedió a emplear 6 mezclas en proporciones diferentes del polímero natural a base de almidón de yuca más sulfato de aluminio, de modo que la concentración de la mezcla coincidiera con la concentración en del sulfato de aluminio de grado comercial. Como resultado, se compararon las eficiencias de remoción de partículas de cada una de las mezclas con la dosis óptima del sulfato de aluminio de grado comercial.

MATERIALES Y MÉTODO

Agua superficial

El agua superficial empleada como muestra se tomó del Río Carrizal ubicado en una zona conurbada del municipio de Centro, Tabasco, México (17°59'20.42" N y 92°58'13.41" W). La zona del río está compuesta de tres tipos de suelos (Feozem, Fluvisol y Gleysol), siendo el Gleysol el tipo predominante (INEGI 2001). El lecho del río está compuesto principalmente por arena, limo y lodo. Este río provee el agua a varias plantas potabilizadoras (la Isla I, la Isla II y Carrizal) del municipio de Centro (población estimada de 810 000 hab), donde se localiza la Ciudad de Villahermosa (aprox. 750 000 hab).

La recolección de la muestra se efectuó en el mes marzo del 2009, que tuvo una precipitación media de 44 mm y temperatura media de 25.9 °C (Servicio Meteorológico Nacional 2009). La temperatura ambiente promedio durante la toma de muestra fue de 27 °C.

Antes del experimento, se tomó la muestra de agua superficial con una botella tipo Van Dorn con capacidad de 2 litros a diferentes niveles de profundidad en el Río Carrizal. El volumen de agua recolectado fue de 60 litros y se depositó en un recipiente de plástico con capacidad de 70 litros. Las muestras de agua se llevaron al laboratorio en donde se midieron parámetros fisicoquímicos iniciales como turbiedad, color, pH y temperatura. Para medir la turbiedad se empleó un turbidímetro marca LaMotte^{MR} con precisión 0.01 NTU-turbiedad por el método EPA 180.1 (EPA 1983, NOM-041-SSA1 1993, ISO 1990). El color

fue medido con el mismo equipo con una precisión 0.1 CU-color por el método estándar 2120B. El pH y la temperatura se analizaron con un medidor versátil marca Hanna^{MR} con precisión 0.1. Los parámetros iniciales del agua cruda superficial fueron los siguientes: turbiedad igual a 70 NTU, color igual a 85 CU, pH igual a 6.9 y temperatura de 27 °C.

Almidón de yuca

Se adquirieron 10 kg de yuca (*Manihot esculenta* Crantz) en un mercado público. La yuca se usa principalmente como alimento humano, también es usada para la alimentación animal y la extracción de almidones. Cerca de la quinta parte de la producción mundial se usa para la nutrición animal. La yuca es empleada en el sureste mexicano como ingrediente clave en la preparación de alimentos cocidos tales como caldos regionales, por lo que es un tubérculo muy apreciado y de alta demanda (Cock 1980).

Aislamiento del almidón de yuca

Para la obtención del almidón, se utilizó la metodología de Aparicio (2003). Se pesaron y lavaron 10 kg de yuca. Los tubérculos ya pelados se picaron en porciones de aproximadamente 2×1.2 cm, remojándose en un recipiente que contenía un volumen de agua de seis veces el peso de la muestra a temperatura de 40 °C. La yuca picada se molió en una licuadora a prueba de impacto, hasta su completa desintegración. Ya molida se lavó tres veces con agua caliente (40 °C), empleando un tamiz No. 100 escala Tyler. La fibra retenida en el tamiz se eliminó. El cernido fue recolectado en un recipiente donde se dejó sedimentar durante 3 h aproximadamente. El sobrenadante se separó por decantación y el sedimento se dejó reposar en refrigeración durante la noche. Al día siguiente se repitió la operación de cernido, eliminando nuevamente el sobrenadante. El sedimento obtenido se centrifugó para separar el agua de la pasta a una velocidad de 850 rpm durante 15 min. La pasta se secó en una estufa a 40 °C por 24 h, pulverizándose finalmente. Se envasó en frascos de plástico de tereftalato de polietileno (acrónimo en inglés, PET). En la **Figura 1** se observa a los gránulos de almidón nativo de yuca, por microscopía electrónica de barrido.

Preparación de soluciones de referencia

Se prepararon dos soluciones de referencia. Para la solución del sulfato de aluminio se pesaron 2 g de sulfato de aluminio (J.T. Baker, Nueva Jersey, EUA) con un grado de pureza del 98.5 % y se disolvieron

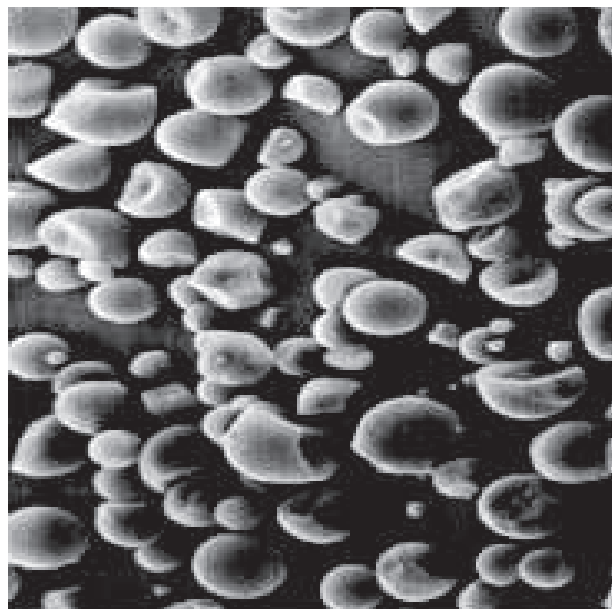


Fig. 1. Gránulos de almidón nativo de yuca, por microscopía electrónica de barrido (Aparicio 2003)

en un litro de agua destilada. De la misma forma, se preparó la solución de referencia del almidón de yuca pesando 2 g y se disolvieron en un litro de agua destilada.

Obtención de la dosis óptima de sulfato de aluminio puro

Una vez tomada la muestra de agua y medidos los valores iniciales de los parámetros de turbiedad, color, pH y temperatura, se llevó a cabo el proceso de coagulación-floculación mediante el equipo de prueba de jarras marca Phipps & Bird^{MR}, modelo PB-700. Este equipo cuenta con 6 vasos de precipitado de un litro y en cada uno de estos vasos se agregó una muestra de agua superficial. En cada vaso se procedió a agregar sulfato de aluminio comercial con las siguientes concentraciones 0 (testigo), 10, 20, 30, 40 y 50 mg/L. Una vez agregado el coagulante se llevó a cabo un mezclado utilizando el método de Letterman y Villegas (1976) que consiste en una mezcla rápida por 15 s a 200 rpm, a fin de desestabilizar las cargas superficiales de las partículas de la materia orgánica contenida, seguida de una mezcla lenta por 25 min a 25 rpm para promover la formación de flóculos. Después se dejó sedimentar por un tiempo de 30 min. Se midieron los valores finales de los parámetros de turbiedad, color, pH y temperatura. Con la finalidad de disminuir el efecto de los errores experimentales y de aplicar las pruebas estadísticas pertinentes, se realizaron cuatro repeticiones de este procedimiento. La dosis

óptima fue la concentración con el mejor promedio en remoción de color y turbiedad. A este tratamiento se le llamó tratamiento 1

Determinación de la dosis óptima de las mezclas

Tomando como base la concentración óptima del sulfato de aluminio comercial, que fue de 30 mg/L (tratamiento 1), se prepararon las mezclas almidón:sulfato en las proporciones de concentración siguientes: 2:28 mg/L¹ (tratamiento 2); 4:26 (tratamiento 3); 6:24 (tratamiento 4); 8:22 (tratamiento 5); 10:20 (tratamiento 6) y 12:18 (tratamiento 7). Las velocidades de mezclado y de sedimentación durante la prueba de jarras con las mezclas coagulantes, se realizaron de la misma manera que como se obtuvo la dosis óptima del sulfato de aluminio comercial, con la diferencia que primero se agregaron las concentraciones de sulfato de aluminio en la mezcla rápida y durante la mezcla lenta se agregaron las concentraciones de almidón de yuca. Al final del experimento a cada mezcla se le midieron los parámetros de caracterización de la calidad del agua (turbiedad, color, pH y temperatura).

Análisis estadístico

Se utilizó el diseño completamente al azar para el análisis de varianza y probar la igualdad de medias entre los tratamientos. En caso de existir diferencias entre tratamientos se realizó una prueba de medias por el método de Dunnett (Rubio 2003).

RESULTADOS

Pruebas de efectividad de mezclas coagulantes

Los experimentos de prueba de jarras realizados se llevaron a cabo para evaluar la efectividad de las mezclas coagulantes propuestas que permiten comparar la eficiencia de remoción de partículas suspendidas de las mezclas con base en almidón de yuca, sobre el agua superficial recolectada en el río seleccionado. Tal efectividad se evaluó bajo criterios comparativos con relación a los resultados obtenidos por la coagulación lograda con el sulfato de aluminio comercial.

Remoción de color

El análisis de varianza para el color indica diferencias muy significativas entre los tratamientos (ANOVA $P = 0.00001$). En la **Figura 2**, se observa que el tratamiento que presenta el color más bajo es el 2 (28 mg/L de sulfato de aluminio comercial más

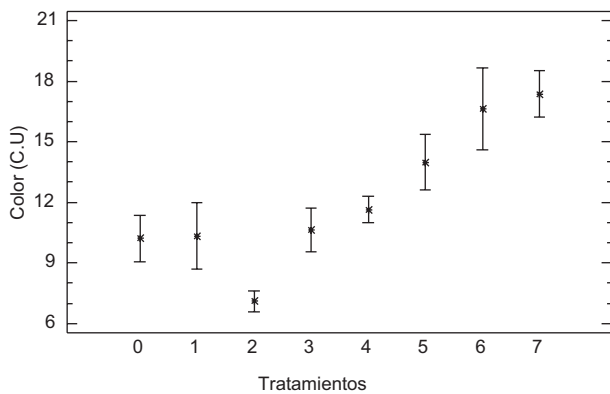


Fig. 2. Comparación de medias de los diferentes tratamientos. Las barras verticales denotan intervalos de confianza de 0.95

2 mg/L de almidón de yuca), con un valor de 7.11 CU, seguido por el tratamiento 1 con 10.33 CU, (30 mg/L de sulfato de aluminio comercial). Se incluyó un control adicional (Tratamiento 0), para descartar el efecto del sulfato de aluminio comercial (28 mg/L¹ sin almidón de yuca), sobre el color del agua. Los tratamientos 0, 1, 3 y 4 son estadísticamente iguales de acuerdo con el contraste de medias de Dunnett. La mayor remoción de color, se logró con el tratamiento 2, seguido del 1, con valores de 91.6 % y de 87.9 %, respectivamente.

Remoción de turbiedad

Los valores obtenidos de la variable turbiedad indican diferencias estadísticamente significativas (ANOVA $P = 0.00001$) entre los tratamientos. La prueba de Dunnett confirma que los tratamientos 0, 1 y la mezcla del tratamiento 2 se comportan estadísticamente de manera similar y diferente a los demás tratamientos (**Fig. 3**).

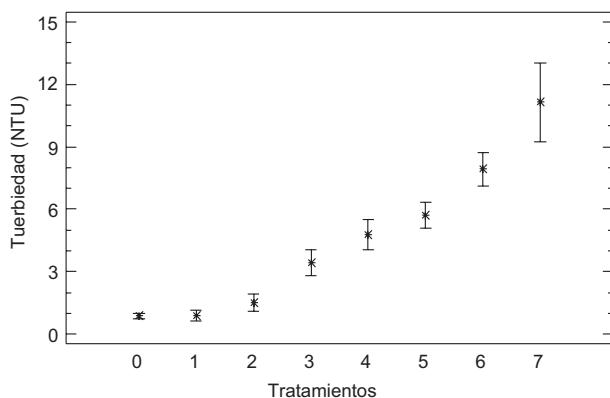


Fig. 3. Comparación de medias de los diferentes tratamientos. Las barras verticales denotan intervalos de confianza de 0.95

Comportamiento del pH

El pH inicial de la muestra de agua fue de 6.9. Con la dosis óptima (30 mg/L de sulfato de aluminio comercial), se acidificó levemente hasta un promedio de 6.3 y con las mezclas coagulantes (tratamiento 2 al 7) el pH aumentó gradualmente por encima del tratamiento 1 (**Fig. 4**).

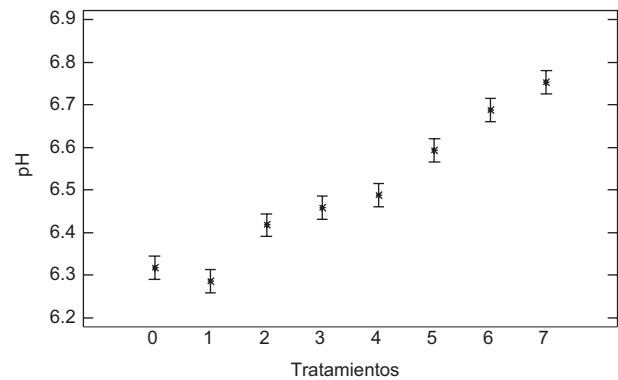


Fig. 4. Comportamiento en pH de los tratamientos

DISCUSIÓN

Los resultados obtenidos en esta investigación en cuanto a la remoción de turbiedad son comparables con los estudios realizados por Laines (2008), que utiliza mezclas con potencial coagulante a base de almidón de plátano mezclado con sulfato de aluminio de grado comercial, sólo que en lugar de aguas superficiales, utiliza lixiviados de rellenos sanitarios. Para agua de lixiviado de un relleno sanitario con una turbiedad de 126 NTU logra remociones del 98.6 % de turbiedad con una mezcla de sulfato/almidón en proporción 1:1 con una dosis óptima de 70 mg/L, mientras que con el sulfato de aluminio de grado comercial con la misma dosis óptima mencionada anteriormente logra remociones del 97.4 %. En el presente trabajo se logran remociones de turbiedad del 98.7 % para el sulfato de aluminio comercial mientras que para la mezcla del tratamiento 2 se obtiene 97.9 % para agua cruda superficial de 70 NTU, la dosis óptima fue de 30 mg/L.

La contribución de este trabajo es que la mezcla aquí propuesta de sulfato de aluminio/almidón de yuca es de 1:0.07, empleando así mucho menor cantidad de almidón que en los estudios realizados por Laines (2008) en los que se utilizó una mezcla de sulfato de aluminio/almidón de plátano en proporción 1:1. Lo anterior no sólo implica un ahorro económico asociado a la producción y dosificación de almidón en una unidad de coagulación-floculación de escala industrial,

sino que también permite disminuir el efecto del uso del agente floculante en el incremento del carbono orgánico total (COT) y Demanda Química de Oxígeno (DQO) en el agua tratada, cuyos parámetros son criterios establecidos de la calidad del agua en las plantas potabilizadoras. Sin embargo, debe tenerse en mente que en los estudios de Laines (2008) el agua tratada provino de un relleno sanitario mientras que en este estudio el agua tratada es agua superficial de un río por lo cual se infiere que las mezclas podrían actuar de manera diferente. Al respecto, es preferible comparar los resultados de este trabajo con los valores reportados por Shahriari *et al.* (2012) quienes emplearon mezclas de almidón con cloruro férrico (FeCl_3) para tratar agua preparada a partir de caolinita con turbiedad inicial de 50 y 100 NTU, rango de turbiedad muy similar al que fue analizado en este estudio. Los resultados de Shahriari y colaboradores mostraron que la dosis óptima para la remoción de turbiedad fue de 10 mg/L de FeCl_3 más 0.2 mg/L de almidón, equivalente a una proporción 1:0.02. Empleando esta dosis óptima, la combinación de los agentes permitió eficiencias de remoción de turbiedad de 86.5 % y 92.4 % a un pH igual a 7, para turbiedades iniciales de 50 y 100 NTU, respectivamente. Debe notarse que estas eficiencias de remoción son significativamente menores a las eficiencias mostradas aquí aunque debe considerarse el efecto del pH. En particular, la dosis óptima de la mezcla sulfato de aluminio/almidón de yuca fue obtenida a un pH de 6.5, un valor cercano al pH óptimo teórico para el empleo de sulfato de aluminio, igual a 5.9. Sin embargo, Shahriari y colaboradores estudiaron el efecto del pH en la remoción de turbiedad encontrando que ésta disminuye al variar el pH de 7 a 8. Lo anterior podría resultar contradictorio ya que el pH óptimo teórico para el FeCl_3 es 8.2 aunque debe recordarse que el pH no sólo afecta al equilibrio químico de la formación de iones complejos del agente coagulante sino también a las condiciones de solubilidad del tipo de arcilla empleada en cada estudio.

En cuanto a la remoción de color, en el estudio de Laines (2008), se obtuvo una remoción del 84.3 % en comparación con el sulfato de aluminio comercial con 84.7 %, para agua cruda de 1043 CU. En el caso del presente estudio se observan mejores remociones de color que las obtenidas por Laines (2008), debido a que la mezcla del tratamiento 2 tiene una eficiencia de remoción del 91.6 % comparadas con el sulfato de aluminio comercial con 87.9 %, para agua cruda de 85 CU.

El pH de entrada del agua cruda fue de 6.9. Se observó que con la dosis óptima (30 mg/L) de sulfato de aluminio se acidificó levemente hasta un promedio

de 6.3 y con las mezclas coagulantes del tratamiento 2 al 7, se mantuvo ligeramente menos ácida hasta 6.7. Navarro *et al.* (2006) observaron en sus resultados el efecto del pH en la capacidad de adsorción, de cationes divalentes con biopolímeros naturales (*Ascophyllum nodosum*, coronta de maíz blanco, *Lentinusedodes* sp. y *Saccharomyces cerevisiae*), y observaron que en un pH ácido de 4 y 5, los biopolímeros adsorben una mayor cantidad de estos cationes divalentes. Este efecto de adsorción a diferente con lo observado con la yuca, ya que la sorción fue mínima debido a la nula presencia de metales en el agua al utilizarse agua superficial carente de metales pesados, a diferencia de las soluciones de nitrato de cadmio (II) tetrahidratado ($\text{Cd}(\text{NO}_3)_2 \times 4\text{H}_2\text{O}$) y sulfato de zinc (II) heptahidratado ($\text{ZnSO}_4 \times 7\text{H}_2\text{O}$), ambas de grado analítico, utilizadas por Navarro y colaboradores (2006).

CONCLUSIONES

Los resultados obtenidos en el presente trabajo lograron comprobar que las mezclas de sulfato de aluminio con almidón de yuca tienen un potencial de coagulación-floculación y podrían ayudar al tratamiento de las aguas superficiales. El empleo de almidón como agente coadyuvante en la remoción de color, mezclado con sulfato de aluminio (agente coagulante), permitiría reducir el costo económico, el impacto ambiental y los efectos a la salud pública. Como resultado de esta investigación, se abre una posibilidad de experimentar con otros tipos de aguas tales como las residuales industriales o municipales. Es importante realizar futuras investigaciones con almidones estructuralmente modificados empleando técnicas de copolimerización por injerto con el propósito de aumentar la efectividad en la remoción de color y turbiedad en procesos de tratamiento de aguas superficiales y eliminar el uso de coagulantes metálicos.

AGRADECIMIENTOS

A la División Académica de Ciencias Biológicas de la Universidad Juárez Autónoma de Tabasco (UJAT).

REFERENCIAS

- Almendárez N. (2004). Comprobación de la efectividad del coagulante (Cochifloc) en aguas del Lago de Managua, Nicaragua. Revista Iberoamericana de Polímeros 5, 46-54.

- Anastasakis K., Kalderis D. y Diamadopoulou E. (2010). Flocculation behavior of mallow and okra mucilage in treating wastewater. *Wa. Sci. Technol.* 61, 786-791.
- Aparicio M.A. (2003). Caracterización fisicoquímica de los almidones nativos y modificados de Yuca (*Manihot esculenta Crantz*), camote (*Ipomeae batata Lam*) y plátano valery (*Musa cavendish*). Tesis Doctoral. Universidad Veracruzana. Veracruz, México, 119 p.
- Bratby J. (2006) Coagulation and flocculation in water and wastewater treatment. IWA Publishing; 2a Ed. 424 p.
- Beltrán J., Sánchez J., Delgado A. y Jurado C. (2009). Removal of alizarin violet 3R (anthraquinonic dye) from aqueous solutions by natural coagulants. *J. Haz. Mater. (JHM)*. 170, 43-50.
- CEPIS (1983). Teoría, diseño y control de los procesos de clarificación del agua. Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente. Manual. Lima, Perú. 623 p.
- Cock H. (1980). Dátil de la yuca. CONACyT. México, 205 p.
- Colbert D. (2007) Los siete pilares de la salud. Casa Creación. EUA, 314 p.
- Durán J., Morales M. y Yusti R. (2005). Formulación para la obtención de un polímero biodegradable a partir de almidón de yuca, variedad MBRA 383. *Revista Científica Guillermo de Ockham* 3, 127-133.
- Fabris R., Chow C.W.K. y Drikas M. (2010). Evaluation of chitosan as a natural coagulant for drinking water treatment. *Wa. Sci. Technol.* 61, 2119-2128.
- Guerrero R. (1979). Manual de Tratamiento de aguas. Limusa. México, 316 p.
- INEGI (2001). Síntesis Geográfica. Carta Edafológica del Estado de Tabasco, México. Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática. Villahermosa, Tabasco.
- ISO (1990). Norma 7027. 2nd Ed. International Standards Organization. Ginebra, Suiza. 20 pp
- Jahn S.A.A. (1979). African plants used for the improvement of drinking water. *Curare* 2, 183-199.
- Kirchmer J.C., Arboleda J. y Castro M. (1975). Polímeros naturales y su aplicación como ayudantes de floculación. Serie Documentos Técnicos 2, Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente (CEPIS), Lima, Perú.
- Laines J.R., Goñi A. y Howard R. (2008). Mezclas con potencial coagulante para tratamiento de lixiviados de un relleno sanitario. *Interciencia* 33, 22-28.
- Villegas R. y Letterman R. (1976). Optimizing flocculator power input. *J. Environ. Eng. Div. ASCE* 251-262.
- Martínez D., Magaly C., Altamira D., Elsa C. y Nola F. (2003). Eficiencia del cactus lefaría para su uso como coagulante en la clarificación de aguas. *Rev. Téc. Fac. Ing. Univ. (RTFIUZ)*. 26, 27-33.
- Metcalf y Eddy (2003). Ingeniería de Aguas residuales, Tratamiento, Vertido y Reutilización. Tchobanoglous G, Burton F y Stensel H. MacGraw-Hill. México. 356 pp.
- EPA (1983) Turbidity (nephelometric) methods for chemical analysis of water and wastes. Environmental Protection Agency. Environmental Monitoring as Supporting Laboratory. Office of Research and Development. EUA, Cincinnati.
- Navarro A., Ramos K., Campos K. y Maldonado H. (2006). Elucidación del efecto del pH en la adsorción de metales pesados mediante biopolímeros naturales: cationes divalentes y superficies activas. *Revista Iberoamericana de Polímeros (RIP)*. 7, 113-126.
- Nkurunziza T., Nduwayezu J.B., Banadda E.N. y Nhapi I. (2009). The effect of turbidity levels and *Moringa oleifera* concentration on the effectiveness of coagulation in water treatment. *Water Science and Technology* 59, 1551-1558.
- NOM-041-SSA1 (1993). Norma Oficial Mexicana. Bienes y Servicios. Agua Purificada Envasada. Especificaciones Sanitarias. 53 pp.
- Qudsieh I.Y., Fakhru L., Razi A., Kabbashi N.A., Mirghani M.E.S., Fandi K.G., Alam M.Z., Muyibi S.A. y Nasef M.M. (2008). Preparation and characterization of a new coagulant based on the sago starch biopolymer and its application in water turbidity removal. *J. Appl. Polymer Sci.* 109, 3140-3147.
- Rubio A.H. (2003). Estadística experimental. Marfil. México, 321 pp
- Shahriari T., Bidhendi N. y Shariari S. (2012). Evaluating the efficiency of plantago ovata and starch in water turbidity removal. *Int. J. Environ. Res.* 6, 259-264.
- Servicio Meteorológico Nacional (2009). Mapas diarios de precipitación del mes de Marzo (en línea). <http://www.smn.cna.gob.mx> 25/09/2009.
- Schulz C.R. y Okun D.A. (1998). Tratamiento de aguas superficiales para países en desarrollo. Limusa México, 390 p.
- Tatsi A.A., Zouboulis A.I., Matis K.A. y Samara P. (2003). Coagulation-flocculation pretreatment of sanitary landfill leachates. *Chemosphere* 53, 737-744.
- You L., Lu F., Li D., Qiao Z. y Yin Y. (2009). Preparation and flocculation properties of cationic starch/chitosan crosslinking-copolymer. *J. Hazard Mater.* 172, 38-45.