



Quitosano aplicado en el tratamiento del agua residual de la producción de aceite de palma¹

Chitosan applied in the treatment of wastewater from palm oil production

Dalia Milena Rodríguez-Jiménez², Yim James Rodríguez-Díaz², Esteban Burbano-Erazo³

- ¹ Recepción: 20 de octubre, 2020. Aceptación: 26 de mayo, 2021. Este trabajo fue elaborado a partir de los resultados de la tesis de grado del primer autor, realizada en la Universidad Popular del Cesar, Colombia.
- ² Universidad Popular del Cesar. Diagonal 21 No. 29-56 Sabanas del Valle, Valledupar, Cesar, Colombia. damrodriguezji@unal.edu.co (autor para la correspondencia; <https://orcid.org/0000-0001-5860-9765>), yimrodriguez@unicesar.edu.co (<https://orcid.org/0000-0002-4463-0077>).
- ³ Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria (AGROSAVIA). Centro de investigación Motilonia, Calle 59 A No 63-20, Medellín, Colombia. Km 5. vía Becerril, Agustín Codazzi, Cesar, Colombia. eburbano@agrosavia.co (<https://orcid.org/0000-0001-5056-9893>).

Resumen

Introducción. El uso de biopolímeros en el tratamiento de efluentes permite controlar el impacto ambiental asociado a la descarga de aguas residuales agroindustriales. **Objetivo.** Evaluar la efectividad del quitosano como coagulante natural en el tratamiento de efluentes de producción de aceite de palma. **Materiales y métodos.** Se determinaron los parámetros: demanda química de oxígeno (DQO), los sólidos suspendidos totales (SST) y volátiles (SSV), turbidez y grasas y aceites (GYA) sobre en el agua residual asociada a la producción de aceite de palma proveniente del municipio de Agustín Codazzi en el departamento del Cesar (Colombia), por el ensayo de pruebas de jarras. Se aplicó quitosano en dosis de: 100, 200, 300, 400 y 0 mg L⁻¹ a tres niveles de pH 4, 5 y 6 del agua. Se implementó un diseño experimental completamente aleatorizado, de dos vías, con efectos fijos. Para el análisis de datos se utilizó un análisis multivariado de los parámetros fisicoquímicos del efluente industrial. El estudio se realizó en el año 2012. **Resultados.** El quitosano permitió reducir más del 87 % de turbidez, DQO, SST, SSV y grasas y aceites en todas las dosis del coagulante, mientras que el control (0 mg L⁻¹) fue diferente estadísticamente ($p < 0,05$) a todos los tratamientos. En el análisis multivariado de los datos, el componente principal 1 (PC1) explicó el 79,3 % de la varianza total de las variables. **Conclusión.** Dosis de 100, 200, 300 y 400 mg L⁻¹ de quitosano evaluado como coagulante natural en el tratamiento de aguas, disminuyeron la concentración de contaminantes en efluentes asociados a la producción de aceite de palma.

Palabras clave: aguas residuales, análisis multivariado, biopolímero, tratamiento de efluentes, prueba de jarras.

Abstract

Introduction. The use of biopolymers in effluents treatment allows to control the environmental impact associated with agroindustrial wastewater discharge. **Objective.** To evaluate the effectiveness of chitosan as a natural coagulant in the treatment of palm oil production effluents. **Materials and methods.** The following parameters were determined: Chemical Oxygen Demand (COD), total suspended solids (TSS) and volatile solids (TVS), turbidity and fats and oils



(GYA) in wastewater associated with palm oil production from the municipality of Agustín Codazzi in the department of Cesar (Colombia), by the jar test assay. Chitosan was applied in doses of: 100, 200, 300, 400, and 0 mg L⁻¹ at three pH levels 4, 5, and 6 of the water. A completely randomized, two-way, fixed effects experimental was implemented. A multivariate analysis of the physical-chemical parameters of industrial effluent was used for data analysis. The study was conducted in 2012. **Results.** Chitosan allowed a reduction of more than 87 % turbidity, COD, TSS, TVS and fats and oils in all coagulant doses. While the control (0 mg L⁻¹) was statistically different ($p < 0.05$) to all the treatments. In the multivariate analysis of the data, the principal component 1 (PC1) explained 79.3 % of the total variance of the variables. **Conclusion.** Doses of 100, 200, 300, and 400 mg L⁻¹ of chitosan evaluated as a natural coagulant in water treatment, decreased the concentration of pollutants in effluents associated with palm oil production.

Keywords: wastewater, multivariate analysis, biopolymer, treatment of effluents, jar test.

Introducción

La extracción de aceite de palma (*Elaeis guineensis* Jacq.) se agrupa dentro de las explotaciones agrícolas e industriales de mayor importancia en el mundo (Corley, 2009; Kadarusman & Herabadi, 2018). En Colombia, el área cosechada de palma de aceite creció de forma acelerada durante el periodo 2007-2018, de 221 601 a 549 355 ha respectivamente; con el departamento del Cesar como una de las regiones más representativas de este cultivo, con la mayor área sembrada (88 802 ha) en el país (Red de información y comunicación del sector agropecuario colombiano, 2019).

Los impactos ambientales generados por el cultivo de la palma y de manera particular, por el proceso industrial de extracción de aceite, ha sido objeto de constante análisis, lo que genera múltiples polémicas (Khokthong et al., 2019; Meijaard et al., 2018). Dentro de los principales problemas derivados del proceso de extracción de aceite, se encuentra la generación de aguas residuales. Cada tonelada de racimos de fruta fresca requiere alrededor de 1,5 m³ de agua durante su procesamiento y cerca del 50 % del agua se convierte en descarga (Zhang et al., 2008), originada del proceso de clarificación y condensado del esterilizador (Thani et al., 1999). El residuo líquido proveniente de la extracción de aceite de palma está compuesto por sólidos totales, sólidos en suspensión, grasas y aceites (Hassan & Puteh, 2007), Na, K, Ca, Mg, Mn, Fe, Zn, Cu, Co y Cd, carbohidratos, compuestos nitrogenados (Santosa, 2008) y materia orgánica (Sundram et al., 2003).

En Colombia, los requerimientos normativos sobre la gestión del agua (Secretaría Jurídica Distrital de la Alcaldía Mayor de Bogotá D.C., 2010), han llevado a los sistemas productivos agropecuarios a explorar alternativas para el vertimiento de las aguas producto del desarrollo de sus actividades económicas. Algunas de estas pueden estar enfocadas en el mejoramiento de la calidad de efluentes mediante el empleo de biomateriales (Rodríguez-Jiménez & Gallego-Suárez, 2019).

Existen tratamientos que usan biopolímeros para remover agentes contaminantes en aguas residuales derivadas de procesos agroindustriales (Saifuddin & Dinara, 2011). Una alternativa biotecnológica para el tratamiento de aguas es el quitosano (Carrasquero-Ferrer et al., 2019; Kamaruddin et al., 2018; Sharma et al., 2019; Zhang et al., 2018), clasificado como biopolímero presente en seres vivos pertenecientes al subfilo crustácea y reino fungi (Kumar, 2000), abundante en la naturaleza. Posee grupos amino e hidroxilo reactivos con alta carga catiónica (Balanta et al., 2010).

Dentro del campo biotecnológico, se reporta su uso para mejorar la calidad de aguas (Hassan & Puteh, 2007; Rodríguez, 2011; Rodríguez-Jiménez & Gallego-Suárez, 2019), esta práctica permite el aprovechamiento

de residuos acuícolas tales como los asociados a los desechos de camarón (Cadeza-Espinosa et al., 2017; Duarte et al., 2009; Velasco et al., 2019). De esta manera, se reducen impactos medio ambientales ocasionados por la contaminación del recurso hídrico. Por ello, este tipo de prácticas puede contribuir a la conservación de recursos naturales (Duarte et al., 2009).

El quitosano ha demostrado ser eficiente en la remoción de turbidez en un 87 % del agua de producción piscícola en tecnología Biofloc; permite reducir la concentración de partículas coloidales que aportan turbidez al agua (Rodríguez-Jiménez & Gallego-Suárez, 2019); de igual manera, se reporta una eliminación del 83 % (Kamaruddin et al., 2018) y 98 % (Saifuddin & Dinara, 2011) para este parámetro, en agua residual de planta extractora de aceite de palma. Otros investigadores coinciden en que se puede lograr remover la turbidez de aguas con alta concentración de sólidos en suspensión mediante el uso de quitosano (Balanta et al., 2010; Caldera et al., 2011).

Se ha encontrado una influencia significativa de la dosis de este biopolímero sobre parámetros fisicoquímicos del agua derivada de producción de aceite de palma (Ahmad et al., 2006). Además, en la industria sardinera, dosis de quitosano de 200 a 1000 mg L⁻¹, han logrado reducir la demanda química de oxígeno (DQO) presente en el agua residual (Pacheco-Aguilar et al., 2009); mientras que en efluentes de una planta procesadora de biodiesel, se han reportado reducciones de este parámetro hasta del 94 % al usar el quitosano como un componente del tratamiento biorremediador (Stroparo et al., 2018).

En aguas residuales provenientes de procesamientos industriales para la extracción de aceite de palma, el quitosano o sus derivados han permitido reducir entre 88% y 95 % (Ahmad et al., 2006; Kamaruddin et al., 2018; Saifuddin & Dinara, 2011), de sólidos en suspensión.

El mecanismo usado por el quitosano para coagular y flocular las partículas de grasas y aceites con cargas negativas es la neutralización de carga (López-Maldonado et al., 2014). Esto le permite no solo reducir las partículas en forma de suspensión, sino adherirse a superficies aniónicas de menor tamaño presentes en el agua (Ahmad et al., 2006). Por lo tanto, el quitosano en el agua residual reacciona con partículas de carga negativa, de forma que favorece su coagulación, floculación y precipitación (Rodríguez, 2011; Rodríguez-Jiménez & Gallego-Suárez, 2019).

En efluentes de industria petrolera, se ha reducido el aceite presente en el agua (Grem et al., 2013), al mejorar la eliminación de material en suspensión del agua. De igual manera, este biomaterial puede ser factible en la eliminación de iones de cromo presentes en aguas residuales industriales (Saifuddin & Kumaran, 2005).

El objetivo de este estudio fue evaluar la efectividad del quitosano como coagulante natural en el tratamiento de efluentes de producción de aceite de palma.

Materiales y métodos

Tratamientos y diseño experimental

Se implementó un diseño experimental de dos vías completamente aleatorizado, con tres réplicas. Se evaluaron quince tratamientos derivados de la combinación de cinco dosis de quitosano (0, 100, 200, 300 y 400 mg L⁻¹) y tres valores de pH (4, 5 y 6 unidades) en el agua residual asociada a la producción de aceite de palma proveniente del municipio de Agustín Codazzi en el departamento del Cesar (Colombia). El estudio se realizó en el año 2012. Las variables fisicoquímicas se determinaron una vez con base en métodos estandarizados establecidos por Greenberg et al. (2012). Estos parámetros fueron demanda química de oxígeno (DQO) (5220 D), sólidos suspendidos totales (SST) y volátiles (SSV) (2540 D), turbidez (2130 B) y grasas y aceites (GYA) (5520-B).

Preparación de la solución de hidróxido de sodio (NaOH)

Para variar los niveles de pH del agua, conforme a lo establecido en el diseño experimental planteado, se preparó una solución de hidróxido de sodio (NaOH) a 0,2 N. Se tituló el agua de estudio con el fin de aumentar el pH inicial de la muestra, la cual tenía un valor de 4, hasta lograr valores de pH de 5 y 6.

Prueba de jarras

La prueba de jarras, es un método usado para la selección del rango de operación de dosis de coagulantes en el tratamiento físico-químico en agua potable y/o residual con el fin de determinar las condiciones óptimas en la eliminación del material en suspensión y de la materia orgánica (Rodríguez-Jiménez & Gallego-Suárez, 2019).

En la prueba de jarras para este experimento, se preparó el coagulante con ácido acético (1 %) y quitosano Sigma Chemical Co. Se prepararon dosis de quitosano de 100, 200, 300 y 400 mg L⁻¹ desde una solución madre con una concentración de 0,10 M sobre el agua de estudio (Divakaran & Sivasankara-Pillai, 2002).

La evaluación del proceso de coagulación - floculación se llevó a cabo mediante el ensayo Prueba de Jarras. Para ello, se usó un agitador múltiple de velocidad variable modelo F6-300 E&Q Equipos, con cinco paletas, se agregó 1 L de la muestra del agua de estudio a cada vaso de precipitado y se tomó uno de estos como tratamiento control.

Se adicionaron las dosis de quitosano a cada jarra de operación, conforme a los distintos tratamientos del experimento. Se inició el proceso con la etapa del mezclado rápido a 120 rpm durante 1 min. Después, las revoluciones fueron reducidas a 30 rpm por un tiempo de 30 min. El proceso de coagulación-floculación finalizó con la etapa de sedimentación a 0 rpm que duró 40 min.

Una vez terminado el proceso fisicoquímico, las muestras de agua se tomaron del sobrenadante de cada jarra preservadas a 4 °C y luego se analizaron.

Análisis estadístico de datos

Las variables de estudio se analizaron y se verificó el cumplimiento de normalidad de los datos (pruebas de Shapiro-Wilk), aleatorización y homogeneidad de varianzas (Prueba de Bartlett). Se llevó a cabo un ANOVA para conocer el efecto de los factores y sus niveles sobre las variables de estudio, con base en un nivel de significancia del 95 % ($p < 0,05$). Se realizó una prueba de comparación de medias por Duncan. El análisis estadístico se llevó a cabo con el programa R (R Core Team, 2017). Además, los resultados se sometieron a un análisis de conglomerados, con base en los tratamientos que incluyeron tres valores de pH del agua residual del proceso de extracción de aceite de palma (4, 5 y 6), las distintas dosis de quitosano (0, 100, 200, 300, 400 mg L⁻¹) y las tres réplicas para cada tratamiento; finalmente, se realizó un análisis de componentes principales.

Resultados

Los resultados del análisis de la muestra de agua residual de una planta extractora de palma de aceite, usada para el ensayo Prueba de Jarras se evidencia en el Cuadro 1.

Los resultados del análisis de varianza mostraron que las dosis de quitosano tuvieron un efecto significativo ($p < 0,05$) en la remoción de parámetros fisicoquímicos de aguas residuales de la producción de aceite de palma, reflejado en la reducción de la DQO, turbidez, GYA, SST y SSV (Figura 1).

Cuadro 1. Valores iniciales de la muestra de agua de producción de aceite de palma (*E. guineensis*) usada para las pruebas de jarras. Laboratorio de mecánica de fluidos, Universidad Popular del Cesar, Cesar, Colombia, 2012.

Table 1. Initial values of the palm oil production water sample (*E. guineensis*) used for the jar tests. Fluid mechanics laboratory, Popular University of Cesar, Cesar, Colombia, 2012.

Parámetro del ag	Unidad de medida	Concentración inicial
Turbidez	NTU	13395
DQO	mg L ⁻¹	48000
SST	mg L ⁻¹	13420
SSV	mg L ⁻¹	12078
GYA	mg L ⁻¹	2074
pH	UND	4

DQO: demanda química de oxígeno, SST: sólidos suspendidos totales, SSV: sólidos suspendidos volátiles, GYA: grasas y aceite. / DQO: chemical oxygen demand, SST: total suspended solids, SSV: volatile suspended solids, GYA: greases and oils.

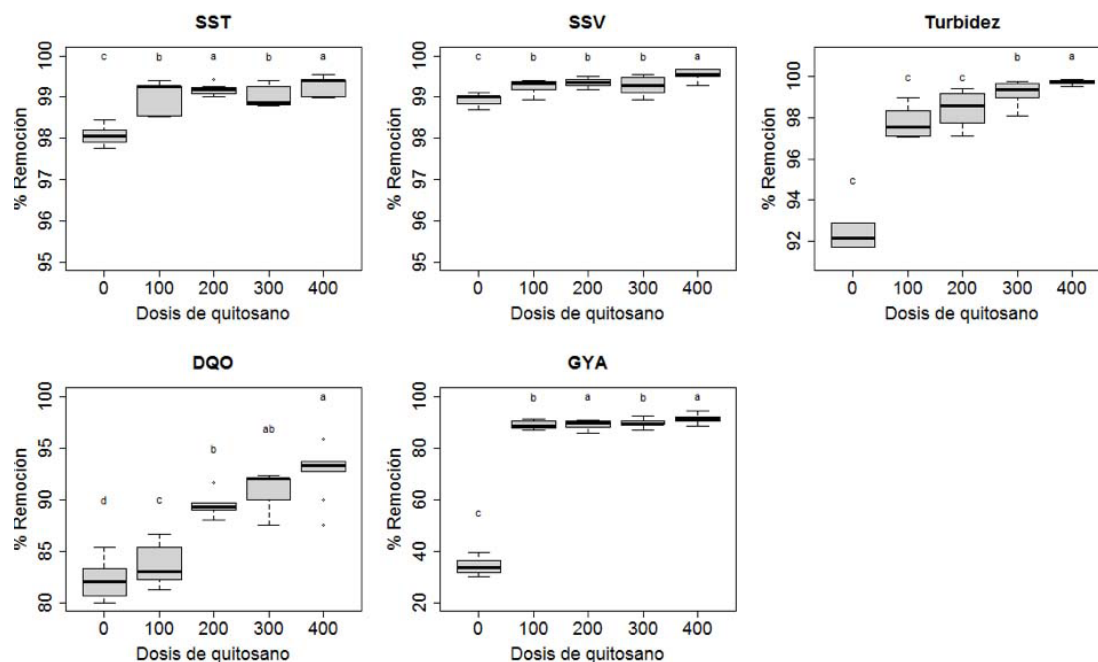


Figura 1. Comparación de medias de las variables fisicoquímicas demanda química de oxígeno (DQO), turbidez, grasas y aceites (G y A), sólidos suspendidos totales (SST) y sólidos suspendidos volátiles (SSV) a distintas aplicaciones de quitosano usado como coagulante en el tratamiento de aguas asociadas a la extracción de aceite de palma (*E. guineensis*). Laboratorio de mecánica de fluidos, Universidad Popular del Cesar, Cesar, Colombia, 2012.

0 mg L⁻¹: tratamiento control sin coagulante. Los valores representan las medias de tres réplicas para las distintas aplicaciones de quitosano y distintos pH. Letras distintas en los tratamientos indican diferencias significativas (p<0,05) según la prueba de Duncan.

Figure 1. Comparison of means of the physicochemical variables chemical oxygen demand (DQO), turbidity, fats and oils (G y A), total suspended solids (SST) and volatile suspended solids (SSV) to different applications of chitosan used as coagulant in the treatment of waters associated with the extraction of palm oil (*E. guineensis*). Fluid mechanics laboratory, Popular University of Cesar, Cesar, Colombia, 2012.

0 mg L⁻¹: Control treatment without coagulant. The values represent the averages of three replicates for different chitosan applications and different pH. Different letters in the treatments indicate significant differences (p<0,05) according to the Duncan's test.

Según el valor inicial registrado para las variables DQO, turbidez, SST, SSV y grasas y aceites (Cuadro 1), se logró reducir hasta el 92,5 %, 99,7 %, 99,3 %, 99,5 % y 91 %, respectivamente para la dosis de 400 mg L⁻¹ (Figura 1). Del mismo modo, al llevar a cabo el análisis de varianza y la comparación de medias, el factor pH no presentó efecto significativo ($p > 0,05$) en la evaluación de las variables de estudio (Figura 2).

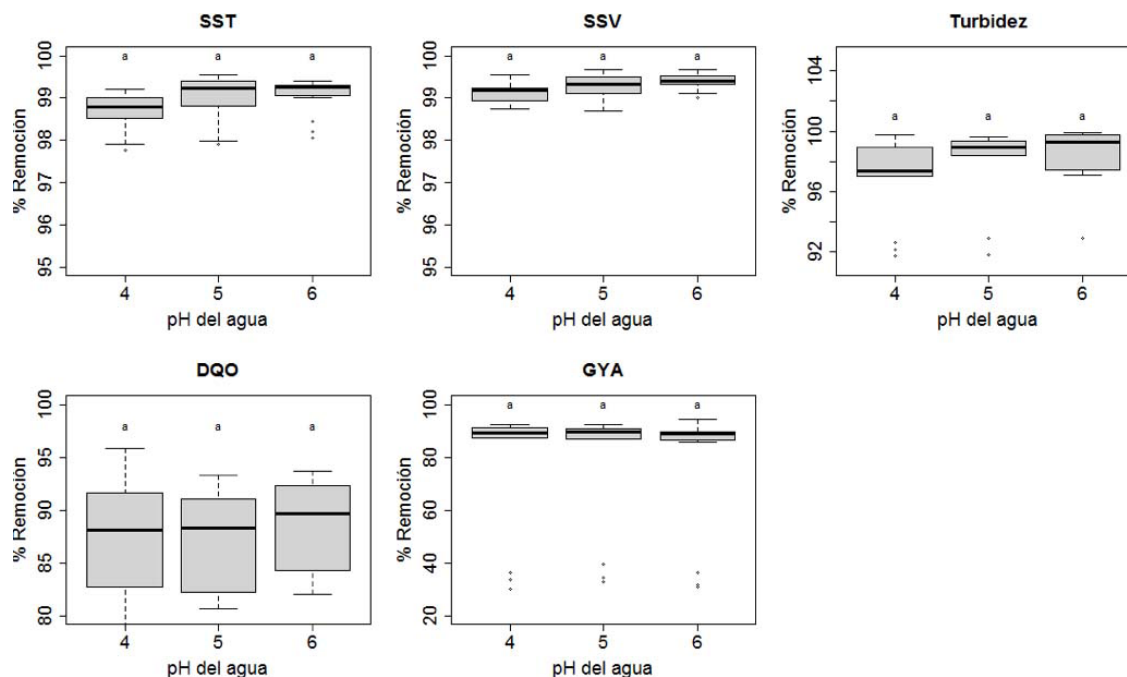


Figura 2. Comparación de medias de las variables fisicoquímicas demanda química de oxígeno (DQO), turbidez, grasas y aceites (GYA), sólidos suspendidos totales (SST) y sólidos suspendidos volátiles (SSV) a distintos pH en el tratamiento de aguas asociadas a la extracción de aceite de palma (*E. guineensis*). Laboratorio de mecánica de fluidos, Universidad Popular del Cesar, Cesar, Colombia, 2012.

Letras distintas en los tratamientos indican diferencias significativas según la prueba de Duncan.

Figure 2. Comparison of means of the physicochemical variables chemical oxygen demand (DQO), turbidity, fats and oils (GYA), total suspended solids (SST), and volatile suspended solids (SSV) to different pH of water treatments associated with the extraction of palm oil (*E. guineensis*). Fluid mechanics laboratory, Popular University of Cesar, Cesar, Colombia, 2012.

Different letters in the treatments indicate significant differences according to Duncan's test.

Al llevar a cabo la prueba de normalidad mediante la prueba de Shapiro-Wilk, los residuales del modelo de regresión lineal para las variables de estudio, obedecieron a una distribución normal. De igual modo, los datos cumplieron con los supuestos de igualdad de varianza e independencia de los datos requeridos en el análisis estadístico factorial.

Los valores residuales obtenidos para las variables de estudio variaron entre 3600 y 7680 mg L⁻¹ para DQO, 40 y 295 NTU para turbidez, 94 y 134 mg L⁻¹ para SST, 60 y 97 mg L⁻¹ para SSV y 185 y 228 mg L⁻¹ para GYA (Cuadro 2).

La dosis que permitió la mayor reducción de todos los parámetros de estudio fue la de 400 mg L⁻¹ de quitosano (Figura 1). Sin embargo, el quitosano demostró ser un buen coagulante incluso a dosis más bajas, como 100 mg L⁻¹, ya que logró eliminar el 84 % de la DQO, 97,8 % de turbidez y 89 % de GYA.

Cuadro 2. Análisis de varianza de las variables demanda química de oxígeno (DQO), turbidez, sólidos suspendidos totales (SST), sólidos suspendidos volátiles (SSV) y grasas y aceites (GYA), en aguas asociadas a la extracción de aceite de palma (*E. guineensis*). Laboratorio de mecánica de fluidos, Universidad Popular del Cesar, Cesar, Colombia, 2012.

Table 2. Analysis of variance of the variables chemical oxygen demand (DQO), turbidity, total suspended solids (SST), volatile suspended solids (SSV), and fats and oils (GYA), in water associated with palm oil (*E. guineensis*) production. Fluid mechanics laboratory, Popular University of Cesar, Cesar, Colombia, 2012.

Variables	Dosis de quitosano (mg L ⁻¹)					Valor p
	100	200	300	400	0	
DQO (mg L ⁻¹)	7680	5328	4416	3600	8928	<0,001
TURBIDEZ (NTU)	295	241	107	40	1219	<0,001
SST (mg L ⁻¹)	134	121	134	94	255	<0,001
SSV (mg L ⁻¹)	97	84	97	60	133	<0,001
GYA (mg L ⁻¹)	228	220	214	185	1371	<0,001

0 mg L⁻¹: tratamiento control sin coagulante. Los valores representan las medias de tres réplicas para las distintas aplicaciones de quitosano y distintos pH. Valores p ≤ 0.05 indican diferencias significativas según la prueba de Duncan. / 0 mg L⁻¹: Control treatment without coagulant. The values represent the averages of three replicates for the different chitosan applications and different pH. Values p ≤ 0.05 indicate significant differences according to Duncan's test.

El control o tratamiento sin dosis de coagulante (0 mg L⁻¹), también presentó altas reducciones en los parámetros de estudio. Variables tales como los SST y SSV presentaron remociones del 98,1 % y 98,9 %, respectivamente, debido a la presencia de partículas en suspensión que pueden precipitar sin adicionar coagulante. Para las GYA, sin aplicar quitosano, se logró remover un 33,9 % y las distintas dosis de quitosano provocaron reducciones superiores al 89 % (Figura 1).

Al comparar los resultados del tratamiento control con respecto a los obtenidos para la dosis de 400 mg L⁻¹ de quitosano; los valores residuales fueron de forma proporcional hasta treinta veces menores para la turbidez y siete veces más bajos en las GYA.

El comportamiento de los distintos parámetros evaluados frente a la aplicación de las dosis de quitosano y tres valores del pH del agua de producción de aceite de palma, se pueden observar en la Figura 3. Para este estudio, los distintos niveles del pH de agua evaluados (4, 5 y 6), permitieron que las dosis de quitosano fueran eficientes en la reducción de parámetros fisicoquímicos del agua.

Análisis multivariado

Los datos se aglomeraron por similitud en los tratamientos implementados en este estudio, los cuales reflejan el comportamiento de la remoción de contaminantes del agua, tal como se muestra en el dendograma de la Figura 4. Se identificaron tres agrupaciones que respondieron a la aplicación de las distintas dosis de quitosano como coagulante en el tratamiento físico-químico del agua. El pH no ejerció influencia en la agrupación de los tratamientos.

El grupo 1 estuvo integrado por los tratamientos sin aplicación de quitosano (0 mg L⁻¹ de quitosano), el grupo 2 se caracterizó por tener el tratamiento con la dosis de 100 mg L⁻¹, y el grupo 3 por los tratamientos que contenían dosis de quitosano de 200, 300 y 400 mg L⁻¹ (Figura 4).

El biplot de forma, con base en el pH del agua, se observa en la Figura 5, donde se puede visualizar que el intervalo de pH del agua utilizado en esta investigación no influyó en la eficiencia del quitosano para la remoción de parámetros fisicoquímicos. Sin embargo, se ha reportado que la remoción con quitosano puede favorecerse por un valor de pH ácido cercano a 4,5, mientras que valores de pH superiores reducen la eficiencia del quitosano.

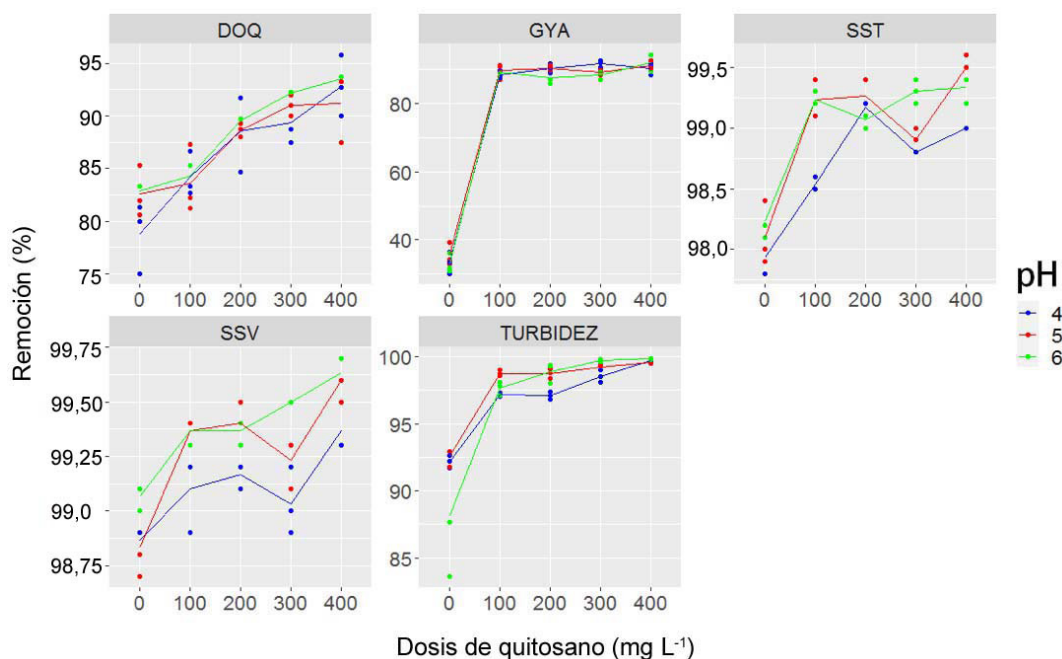


Figura 3. Removal of chemical oxygen demand (DQO), turbidity, fats and oils (GYA), total suspended solids (SST) and volatile suspended solids (SSV) with different applications of chitosan doses in the treatment of palm oil (*E. guineensis*) production water at three pH levels, 4, 5, and 6. Fluid mechanics laboratory, Popular University of Cesar, Colombia, 2012.

0 mg L⁻¹: tratamiento control sin coagulante.

Figure 3. Removal of chemical oxygen demand (DQO), turbidity, fats and oils (GYA), total suspended solids (SST) and volatile suspended solids (SSV) to different applications of chitosan used as in the treatment of water of palm oil production (*E. guineensis*) at three pH levels, 4, 5 and 6. Fluid mechanics laboratory, Popular University of Cesar, Colombia, 2012.

0 mg L⁻¹: Control treatment without coagulant.

Los datos generados con la correlación lineal de Pearson, muestran que todos los parámetros cuantificados presentaron una correlación directa y estadísticamente significativa ($p < 0,001$) (Cuadro 3).

El mayor coeficiente de correlación se presentó entre los parámetros turbidez y GYA con un valor de 0,89, lo que indica una asociación directa debida a la presencia de GYA en forma de coloide y material en suspensión que aportan turbidez al agua, por ello, la correlación entre las GYA con los SST fue de 0,85. De igual manera, sucedió con la turbidez y SSV, ya que permitió observar como se redujeron estos parámetros en la medida en que se removieron los SST.

La distribución de los efectos generados con el tratamiento de quitosano, se observó en un biplot, conformado por los componentes principales PC1 y PC2 (Figura 6), que permitieron explicar el 79,3 % y el 8,3 % de la varianza total de los datos, respectivamente. El componente principal PC1, estuvo representado por las variables SST, SSV, GYA, DQO y turbidez, lo que se debió a la presencia de material orgánico dentro del agua de producción de aceite de palma, que aporta contaminación al agua. Mientras que el componente principal PC2, estuvo representado en gran parte por la turbidez, lo que indica presencia de material coloidal de tamaño inferior a los sólidos en suspensión que aportan a la turbidez del agua.

Las agrupaciones encontradas muestran el comportamiento para cada parámetro físico-químico ante las distintas dosis de quitosano, lo que facilita la visualización contrastante de las diferencias entre aplicar una dosis u otra.

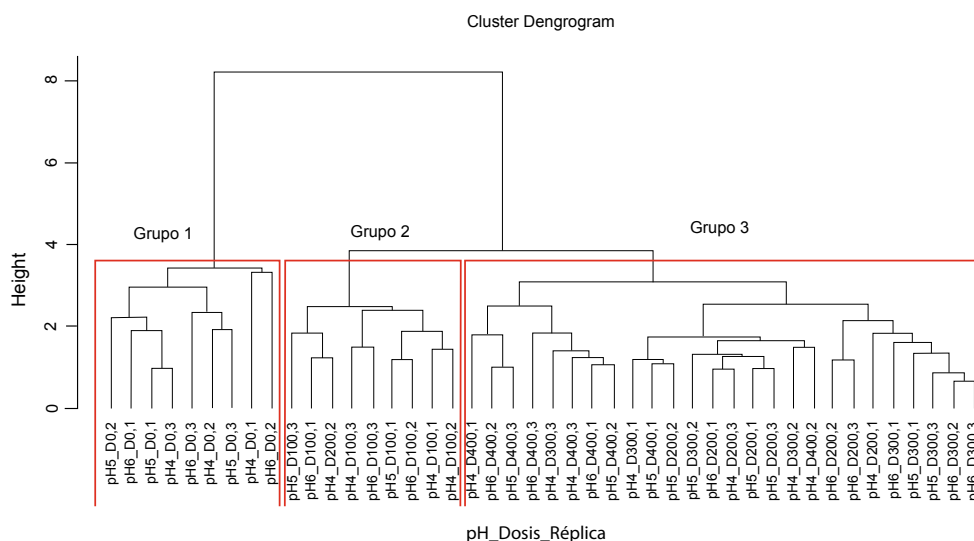


Figura 4. Dendrograma de los tratamientos aplicados sobre agua residual de producción de aceite de palma (*E. guineensis*) en función de distintos pH de agua, dosis de quitosano y réplicas de los tratamientos. Laboratorio de mecánica de fluidos, Universidad Popular del Cesar, Cesar, Colombia, 2012.

Las agrupaciones fueron formadas al considerar el pH del agua de estudio, la dosis de quitosano y las réplicas del tratamiento, según la similitud entre los tratamientos.

Figure 4. Dendrogram of the treatments applied to wastewater from palm oil (*E. guineensis*) production as a function of different water pH, chitosan dose and replicates of the treatments. Fluid mechanics laboratory, Popular University of Cesar, Cesar, Colombia, 2012.

The groupings were formed by considering the pH of the study water, the dose of chitosan and the replications of the treatment, according to the similarity between the treatments.

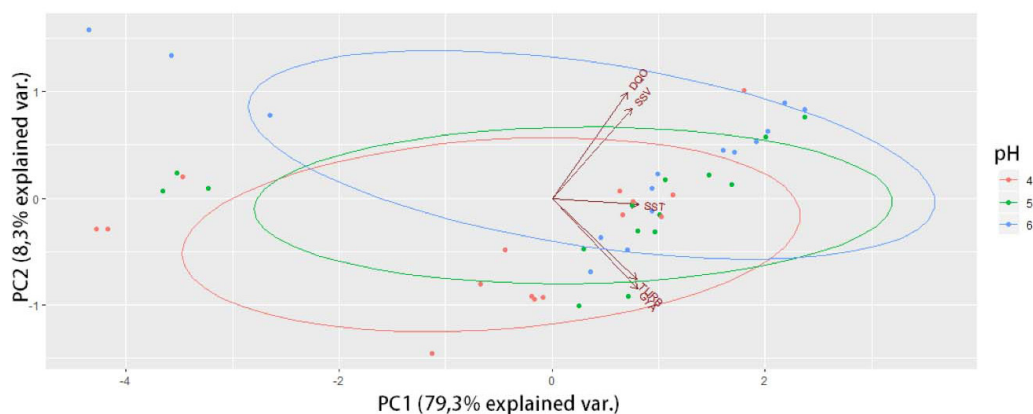


Figura 5. Biplot de forma en función del efecto del quitosano a distintos pH del agua asociada a la producción de aceite de palma (*E. guineensis*), de acuerdo con PC1 y PC2. Laboratorio de mecánica de fluidos, Universidad Popular del Cesar, Cesar, Colombia, 2012.

DQO: demanda química de oxígeno, SST: sólidos suspendidos totales, SSV: sólidos suspendidos volátiles, GYA: grasas y aceites y Turbiedad.

Figure 5. Shape biplot as a function of the effect of chitosan at different pH of the water associated with the production of palm oil (*E. guineensis*), according to PC1 and PC2. Fluid mechanics laboratory, Popular University of Cesar, Cesar, Colombia, 2012.

DQO: chemical oxygen demand, SST: total suspended solids, SSV: volatile suspended solids, GYA: fats and oils and Turbidity.

Cuadro 3. Coeficiente de correlación de Pearson relacionados con parámetros de calidad de agua asociada a extracción de aceite de palma (*E. guineensis*). Laboratorio de mecánica de fluidos, Universidad Popular del Cesar, Cesar, Colombia, 2012.

Table 3. Pearson's correlation coefficient associated with the quality parameters of wastewater from palm oil (*E. guineensis*) production. Fluid mechanics laboratory, Popular University of Cesar, Cesar, Colombia, 2012.

Variable	DQO	GYA	Turbidez	SST	SSV
DQO	1				
GYA	0,66***	1			
Turbidez	0,68***	0,89***	1		
SST	0,66***	0,85***	0,80***	1	
SSV	0,64***	0,67***	0,67***	0,83***	1

***p<0.0001. DQO: demanda química de oxígeno SST: sólidos suspendidos totales, SSV: sólidos suspendidos volátiles, GYA: grasas y aceites / ***p<0.0001. DQO: chemical oxygen demand SST: total suspended solids, SSV: volatile suspended solids, GYA: fats and oils.

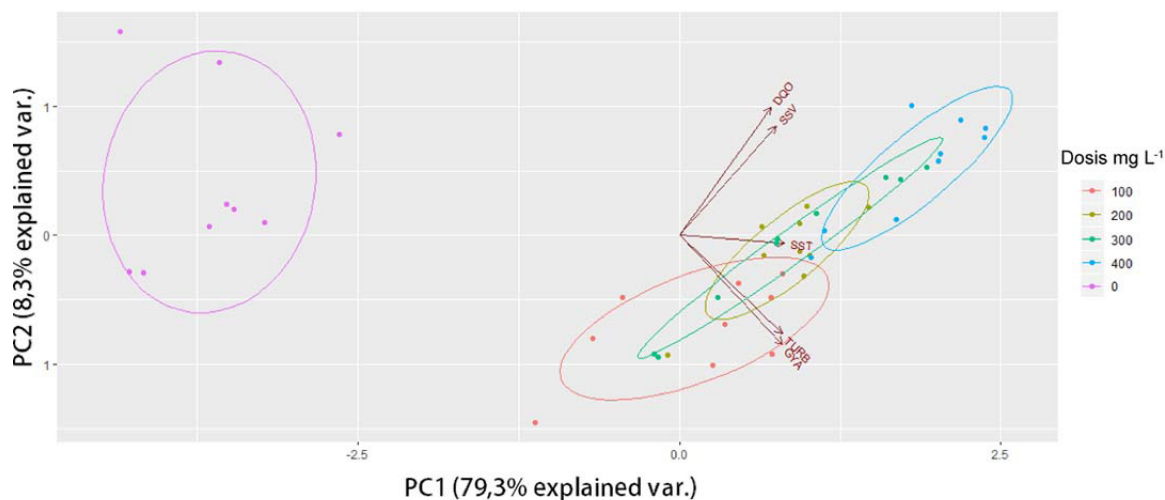


Figura 6. Biplot de forma en función de la dosis de quitosano aplicada al agua asociada a la producción de aceite de palma (*E. guineensis*) de acuerdo con PC1 y PC2. Laboratorio de mecánica de fluidos, Universidad Popular del Cesar, Cesar, Colombia, 2012.

DQO: demanda química de oxígeno SST: sólidos suspendidos totales, SSV: sólidos suspendidos volátiles, GYA: Grasas y aceites y Turbidez.

Figure 6. Shape biplot as a function of the chitosan dose applied to the water associated with the production of palm oil (*E. guineensis*) according to PC1 and PC2. Fluid mechanics laboratory, Popular University of Cesar, Cesar, Colombia, 2012.

DQO: chemical oxygen demand, SST: total suspended solids, SSV: volatile suspended solids, GYA: fats and oils and Turbidity.

Discusión

El uso del quitosano en el tratamiento fisicoquímico de aguas residuales provenientes de una planta extractora de aceite, permitió la reducción de impurezas, lo que pudo deberse a la capacidad del quitosano para mejorar la calidad del agua, ya que en su composición química posee grupos funcionales que se combinan con la carga de las partículas presentes en el agua (Pacheco-Aguilar et al., 2009). Además, este coagulante con carga positiva se une a las superficies aniónicas de las partículas presentes en el agua y se da la formación de un conglomerado de mayor tamaño que luego se precipita por su peso (López-Maldonado et al., 2014), lo que ocasiona la reducción de contaminantes del agua (Rojas et al., 2008; Zhang et al., 2018).

En el presente estudio se logró una reducción en la turbidez del agua de 98 % a 99,8 % con dosis de 100 a 400 mg L⁻¹ (Figura 1), con valores residuales hasta de 40,2 NTU (Cuadro 2). Sin aplicar quitosano también logró removerse la turbidez del agua hasta un valor de 1218 NTU, debido a que en el agua residual existen partículas que precipitan sin tratamiento químico y esto permite que se reduzca este parámetro del agua (Rodríguez-Jiménez & Gallego-Suárez, 2019). Varios autores han reportado que dosis de quitosano de 400 mg L⁻¹ puede disminuir la turbidez en un 99,5 % en agua de producción de aceite de palma con pH de 4,5 (Hassan & Puteh, 2007).

Para esta investigación, se logró disminuir hasta el 92,5 % de la DQO a dosis de 400 mg L⁻¹ de quitosano, con valores residuales de 3600 mg L⁻¹. Se ha reportado la influencia significativa de la dosis de este biopolímero sobre parámetros fisicoquímicos del agua derivada de producción de aceite de palma (Ahmad et al., 2006). Otros autores reportaron que se ha logrado disminuir la DQO en aguas de la industria sardinera y se tienen registros de valores aproximados de 30 mg L⁻¹ y reducciones cercanas al 70 % al centrifugar el agua de estudio y luego usar dosis de quitosano de 100 y 1000 mg L⁻¹ con pH de evaluación de 4 a 7 (Pacheco-Aguilar et al., 2009). También, en aguas residuales de una planta procesadora de biodiesel se alcanzaron remociones del 94 % de DQO mediante un proceso Foto-Fenton que incluyó la evaluación de hierro inmovilizado en quitosano (Stroparo et al., 2018).

Investigadores han reportado reducción del contenido de aceite hasta en un 95 % (valores residuales < 300 mg L⁻¹) al usar una dosis de 500 mg L⁻¹ de quitosano con pH 5 del agua y que se requieren cantidades diez veces menores de este biopolímero a las requeridas por coagulantes sintéticos como policloruro de aluminio (PAC) y alumbre para tener las mismas eficiencias en aguas de industria aceitera (Ahmad et al., 2006). De igual manera, en otros estudios con microesferas de quitosano y trifosfato de sodio se evidenció que se remueven hasta en un 90 %, los aceites totales en el agua producida en la industria petrolera (Grem et al., 2013). Estos reportes son similares a los encontrados en esta investigación, al usar quitosano en aguas de producción de aceite de palma, se logró reducir más de un 80 % de GYA, con dosis de 100 a 400 mg L⁻¹ y alcanzar un valor residual de GYA de 184,6 mg L⁻¹ (91 % de reducción) para la dosis de quitosano de 400 mg L⁻¹, mientras que sin aplicar quitosano se registraron 1371,2 mg L⁻¹ de este parámetro.

Aunque el tratamiento control (0 mg L⁻¹) removió un 98,1 % para SST y 98,9 % para SSV, para GYA solo removió un 33,9 %, debido a que si no se aplica coagulante, se dificulta la reducción de partículas de inferior tamaño a los sólidos en suspensión (Pérez, 2005); por ello, biopolímeros como el quitosano coagulan y floculan las partículas a través de la neutralización de carga (López-Maldonado et al., 2014). Por lo tanto, el quitosano se adhiere a superficies aniónicas de menor tamaño presentes en el agua (Ahmad et al., 2006).

En esta investigación se logró remover sólidos en suspensión sin aplicar quitosano, debido a la presencia de sólidos sedimentables que obedecen al tratamiento físico provocado por la mezcla rápida que desestabiliza las partículas y permite la decantación de sólidos del agua sin aplicar coagulante (Pérez, 2005). Sin embargo, la ventaja de aplicar un coagulante al agua radica en que este facilita la formación de floc (agregado de partículas en suspensión y/o coloidales) grandes, que precipitan a velocidad de sedimentación, lo cual permite la construcción de sedimentadores más pequeños que requieren menor tiempo de retención hidráulica de partículas (Pérez, 2005). Asimismo, otros estudios han reportado que dosis de quitosano de 500 mg L⁻¹, pH del agua de 3 a 6, permiten remociones cercanas al 90 % y valores residuales aproximados de los SST de 30 mg L⁻¹ (Ahmad et al., 2006).

En cuanto a la normatividad vigente para Colombia, los límites para vertimientos de efluentes a cuerpos de aguas superficiales por extracción de aceites de origen vegetal (Secretaría Jurídica Distrital de la Alcaldía de Bogotá D.C., 2010), indican que los valores de pH deben estar entre 6 y 9, para este estudio el valor de pH inicial fue de 4 (Cuadro 1) y el rango evaluado fue de 4 a 6. Aunque no se midieron los valores residuales del pH después de los tratamientos, se pueden adelantar estudios que permitan evaluar si al usar un pH 6 se puede dar cumplimiento a la norma con respecto a este parámetro. De acuerdo con la norma, la DQO debe ser inferior a 1500 mg L⁻¹. Para el agua de estudio, la DQO se redujo con dosis de 400 mg L⁻¹ de quitosano hasta 3600 mg L⁻¹. Para este parámetro no se cumplió con lo requerido en la norma ambiental, sin embargo, se puede considerar evaluar un tratamiento de agua terciario (Pérez, 2005), al igual como ocurrió con las GYA, cuyos valores deben ser inferiores a 20 mg L⁻¹ y para esta investigación el valor mínimo alcanzado fue de 185 mg L⁻¹. Los sólidos en suspensión en el efluente para vertimiento no deben ser mayores a 400 mg L⁻¹ y los resultados de este trabajo mostraron que en todas las dosis se cumplió con lo establecido en la normativa vigente.

En el análisis de clúster (Figura 4), el grupo 1 permitió agrupar las réplicas correspondientes al tratamiento sin aplicación de quitosano, donde se presentó la menor remoción en las variables de estudio, caracterizado por la presencia de partículas sedimentables (Rodríguez-Jiménez & Gallego-Suárez, 2019). Mientras que el grupo 2, compuesto por la dosis de 100 mg L⁻¹ de quitosano, confirmó que, aunque fue la dosis con menor eficiencia de remoción, permitió controlar la presencia de contaminantes del agua mediante una reducción de la fuerza de repulsión entre los iones, lo que provoca la formación de flóculos, que dan como resultado la clarificación del agua (Ríos-Donato et al., 2006).

En el grupo 3 del clúster conformado por las dosis de 200, 300 y 400 mg L⁻¹ del biopolímero, fueron más eficientes en reducir los contaminantes del agua residual. Las dosis para el desempeño óptimo de un compuesto están en función de las características específicas del agua (Andía-Cárdenas, 2000). La mejor calidad de agua residual tratada y derivada de una planta extractora de aceite de palma se logró en un intervalo de 100 a 400 mg L⁻¹ de quitosano (Figura 3).

Para esta investigación el pH no ejerció influencia en la eficiencia del quitosano para la clarificación del agua (Figura 2), aunque se ha reportado que la solubilidad del quitosano se ve favorecida por pH ácido cercano a 4 y afectado de forma negativa por el pH alcalino superior a 7 (Adnan et al., 2017; Wang et al., 2009). La desestabilización de las partículas con carga negativa se presenta a pH bajo (Hassan & Puteh, 2007), inferiores o iguales a 6 (Ahmad et al., 2006).

El análisis de correlación en la calidad de aguas es usado con el fin de definir las relaciones entre parámetros fisicoquímicos del agua (Noori et al., 2010). Para este estudio, las correlaciones entre la turbidez, los SST y SSV, con altos valores, pueden ser entendidos debido a que la turbidez es una medida de la dispersión de la luz por el agua como consecuencia de la presencia de partículas suspendidas y/o coloidales, es decir, que al incrementar la cantidad de material suspendido, aumentará el grado de turbidez en el agua (Ahmad et al., 2006; de Andrade et al., 2007). La correlación más alta presentada entre la turbidez y las GYA, indica que la materia orgánica e inorgánica particulada existente en el agua de estudio, que confiere turbidez a la misma, estuvo asociada a la presencia de GYA, es decir, que al remover partículas coloidales y en suspensión, se redujeron las GYA presentes (Pérez & Camacho, 2011).

Conclusiones

El uso de quitosano para el tratamiento de aguas residuales derivadas del proceso de extracción de palma de aceite resulta promisorio, permitió reducir el grado de turbidez, DQO, SST, SSV y GYA, y esto indica que este biopolímero es una alternativa no contaminante, en el tratamiento de efluentes.

Dosis de 100 a 400 mg L⁻¹ fueron estadísticamente significativas en la remoción de los parámetros de estudio, lo permitieron reducciones máximas de 92,5 %, 99,7 %, 99,3 %, 99,5 %, 91,1 % para las variables de DQO, turbidez,

SST, SSV y GYA, respectivamente. Aunque la dosis de 400 mg L⁻¹ fue la que presentó mejores resultados, la dosis de 200 mg L⁻¹ de quitosano es una opción que mostró remociones significativas ($p < 0,05$) y a pH ácido del agua y, de acuerdo con el análisis clúster, tuvo resultados similares a la dosis de 400 mg L⁻¹.

El agua derivada de la extracción de aceite de palma poseía material en suspensión que pudo precipitar sin aplicación de coagulantes, lo que permitió reducir los parámetros estudiados en proporciones de 90,9 % (turbidez), 81,4 % (DQO), 98,1 % (SST), 98,9 % (SSV) y 33,9 % (GYA).

Para este estudio, el intervalo de pH (4, 5 y 6) evaluado permitió garantizar la eficiencia del quitosano para la clarificación del agua en todos los tratamientos implementados. El quitosano pudo operar a pH ácido del agua sin presentar diferencias estadísticas significativas ($p > 0,05$).

Referencias

- Adnan, O., Abidin, Z. Z., Idris, A., Kamarudin, S., & Al-Qubaisi, M. S. (2017). A novel biocoagulant agent from mushroom chitosan as water and wastewater therapy. *Environmental Science and Pollution Research*, 24, 20104–20112. <https://doi.org/10.1007/s11356-017-9560-x>
- Ahmad, A. L., Sumathi, S., & Hameed, B. H. (2006). Coagulation of residue oil and suspended solid in palm oil mill effluent by chitosan, alum and PAC. *Chemical Engineering Journal*, 118(1–2), 99–105. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2006.02.001>
- Andía-Cárdenas, Y. (2000). *Tratamiento de agua: coagulación y floculación*. Servicio de Agua Potable y Alcantarillado de Lima.
- Balanta, D., Grande, C. D., & Zuluaga, F. (2010). Extracción, identificación y caracterización de quitosano del micelio de *Aspergillus niger* y sus aplicaciones como material bioadsorbente en el tratamiento de aguas. *Revista Iberoamericana de Polímeros*, 11(5), 297–316.
- Cadeza-Espinosa, M., Brambila-Paz, J. J., Chalita-Tovar, L. E., & González-Estrada, A. (2017). Evaluación financiera con la metodología de opciones reales de una inversión para producir quitosano con base en desperdicio de camarón. *Agricultura, Sociedad y Desarrollo*, 14(4), 533–545.
- Caldera, Y., Rodríguez, Y., Oñate, H., Prato, J., & Gutiérrez, E. (2011). Eficiencia del quitosano como coagulante durante el tratamiento de aguas de baja turbidez asociadas a la producción de petróleo. *Revista Tecnocientífica URU*, 1(1), 45–52.
- Carrasquero-Ferrer, S. J., González-Sahinian, Y. G., Colina-Andrade, G., & Díaz-Montiel, A. R. (2019). Eficiencia del quitosano como coagulante en el postratamiento de efluentes de una planta de sacrificio de cerdos. *Orinoquia*, 23(2), 36–46. <https://doi.org/10.22579/20112629.567>
- Greenberg, A., Clesceri, L., & Eaton, A. (2012). *Standard methods for the examination of water and wastewater* (22nd Ed.). American Public Health Association.
- Corley, R. H. V. (2009). How much palm oil do we need? *Environmental Science & Policy*, 12(2), 134–139. <https://doi.org/10.1016/j.envsci.2008.10.011>
- de Andrade, E. M., Araújo, L. F. P., Rosa, M. F., Disney, W., & Alves, A. B. (2007). Seleção dos indicadores da qualidade das águas superficiais pelo emprego da análise multivariada. *Engenharia Agrícola*, 27(3), 683–690. <https://doi.org/10.1590/S0100-69162007000400011>
- Divakaran, R., & Sivasankara-Pillai, V. N. (2002). Flocculation of river silt using chitosan. *Water Research*, 36(9), 2414–2418. [https://doi.org/10.1016/s0043-1354\(01\)00436-5](https://doi.org/10.1016/s0043-1354(01)00436-5)

- Duarte, E. R., Olivero-Verbel, J., & Jaramillo, B. E. (2009). Remoción de cromo de aguas residuales de curtiembres usando quitosano obtenido de desechos de camarón. *Scientia et Technica*, 2(42), 290–295.
- Grem, I. C. D. S., Lima, B. N. B., Carneiro, W. F., Queirós, Y. G. D. C., & Mansur, C. R. E. (2013). Chitosan microspheres applied for removal of oil from produced water in the oil industry. *Polímeros*, 23(6), 705–711. <https://doi.org/10.4322/polimeros.2014.008>
- Hassan, M. A. A., & Puteh, M. H. (2007). Pre-treatment of palm oil mill effluent (POME): a comparison study using chitosan and alum. *Malaysian Journal of Civil Engineering*, 19(2), 38–51. <https://doi.org/10.11113/MJCE.V19N2.197>
- Kamaruddin, M. A., Ismail, N., Kuen, T. H., & Alrozi, R. (2018). Sustainable treatment of Palm Oil Mill Effluent (POME) by using pectin and chitosan in jar test protocol–sequential comparison. *International Journal of Integrated Engineering*, 10(9), 63–68. <https://doi.org/10.30880/ijie.2018.10.09.012>
- Kadarusman, Y. B., & Herabadi, A. G. (2018). Improving sustainable development within Indonesian palm oil: the importance of the reward system. *Sustainable Development*, 26(4), 422–434. <https://doi.org/10.1002/sd.1715>
- Khokthong, W., Zemp, D. C., Irawan, B., Sundawati, L., Kreft, H., & Hölscher, D. (2019). Drone-Based Assessment of Canopy Cover for Analyzing Tree Mortality in an Oil Palm Agroforest. *Frontiers in Forests and Global Change*, 2(12), 1–10. <https://doi.org/10.3389/ffgc.2019.00012>
- Kumar, M. N. R. (2000). A review of chitin and chitosan applications. *Reactive and Functional Polymers*, 46(1), 1–27. [https://doi.org/10.1016/S1381-5148\(00\)00038-9](https://doi.org/10.1016/S1381-5148(00)00038-9)
- López-Maldonado, E. A., Oropeza-Guzman, M. T., Jurado-Baizaval, J. L., & Ochoa-Terán, A. (2014). Coagulation–flocculation mechanisms in wastewater treatment plants through zeta po-tential measurements. *Journal of Hazardous Materials*, 279, 1–10. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2014.06.025>
- Meijaard, E., Garcia-Ulloa, J., Sheil, D., Wich, S. A., Carlson, K. M., Juffe-Bignoli, D., & Brooks, T. M. (2018). *Oil palm and biodiversity: A situation analysis by the IUCN Oil Palm Task Force*. IUCN Publication. <https://doi.org/10.2305/IUCN.CH.2018.11.en>
- Noori, R., Sabahi, M. S., Karbassi, A. R., Baghvand, A., & Taati-Zadeh, H. (2010). Multivariate statistical analysis of surface water quality based on correlations and variations in the data set. *Desalination*, 260(1-3), 129–136. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2010.04.053>
- Pacheco-Aguilar, R., Leyva-Soto, P., Carvallo-Ruiz, G., García-Carreño, L. F., & Márquez-Ríos, E. (2009). Efecto de la concentración de quitosano y ph sobre la remoción de sólidos en agua de cola de la industria sardinera. *Interciencia*, 24(4), 274–279.
- Pérez, L. (2005). *Teoría de la sedimentación*. Universidad Tecnológica Nacional.
- Pérez, F., & Camacho, K. (2011). *Tecnologías para el tratamiento de aguas servidas*. Recuperado el 20 de agosto de 2019 de <https://es.scribd.com/document/151816818/Perez-Alarcon-y-Camacho-Alcala>
- Red de información y comunicación del sector Agropecuario Colombiano. (2019). *Reporte: área, producción y rendimiento nacional por cultivo*. <https://www.agronet.gov.co/estadistica/Paginas/home.aspx?cod=1>
- R Core Team. (2017). *R: A language and environment for statistical computing*. R Foundation for Statistical Computing. <https://www.R-project.org/>
- Ríos-Donato, N., Navarro-Mendoza, R., Ávila-Rodríguez, M., & Mendizábal-Mijares, E. (2006). Obtención de sulfato de quitosano y su aplicación en el proceso de coagulación–floculación de suspensiones coloidales aniónicas de caolinita. *Iberoamericana de Polímeros*, 7(3), 145–161.

- Rodríguez, Y. (2011). *Eficiencia del quitosano como coagulante en el tratamiento de las aguas asociadas a la producción de petróleo* [Tesis de Maestría, no publicada]. Universidad del Zulia.
- Rodríguez-Jimenez, D. M., & Gallego-Suarez, D. J. (2019). Evaluación del quitosano como coagulante para el tratamiento de efluentes piscícolas. *Revista Colombiana de Biotecnología*, 21(1), 6–17. <https://doi.org/10.15446/rev.colomb.biote.v21n1.73340>
- Rojas, C., Rincón, N., Díaz, A., Colina, G., Behllng, E., Chacín, E., & Fernández, N. (2008). Evaluación de una unidad de flotación con aire disuelto para el tratamiento de aguas aceitosas. *Revista Técnica de la Facultad de Ingeniería Universidad del Zulia*, 31(1), 50–57.
- Saifuddin, N. M., & Kumaran, P. (2005). Removal of heavy metal from industrial wastewater using chitosan coated oil palm shell charcoal. *Electronic Journal of Biotechnology*, 8(1), 44–53. <https://10.2225/vol8-issue1-fulltext-7>
- Saifuddin, N., & Dinara, S. (2011). Pretreatment of Palm Oil Mill Effluent (POME) using magnetic chitosan. *Journal of Chemistry*, 8(S1), S67–S78. <https://doi.org/10.1155/2011/427532>
- Santosa, S. J. (2008). Palm oil boom in Indonesia: from plantation to downstream products and biodiesel. *CLEAN – Soil Air Water*, 36(5–6), 453–465. <https://doi.org/10.1002/clen.200800039>
- Secretaría Jurídica Distrital de la Alcaldía Mayor de Bogotá D.C. (2010). *Decreto 3930 de 2010 Nivel Nacional*. Diario Oficial 47837. <http://www.alcaldiabogota.gov.co/sisjur/normas/Norma1.jsp?i=40620>
- Sharma, N., Singh, D., Rani, R., Sharma, D., Pandey, H., & Agarwal, V. (2019). Chapter 13 - Chitosan and Its Nanocarriers: Applications and Opportunities In D. Kumar, P. Ahmad, S. Sharma, D. Kumar, & N. Kishore (Eds.), *Nanomaterials in Plants, Algae and Microorganisms* (Vol. 2, pp. 267–286). Academic Press. <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-811488-9.00013-5>
- Stroparo, E. C., Mollinari, K. C., & Souza, K. V. D. (2018). Use of chitosan in the remediation of water from purification of biodiesel. *Polímeros*, 28(5), 400–405. <https://doi.org/10.1590/0104-1428.02416>
- Sundram, K., Sambanthamurthi, R., & Tan, Y. A. (2003). Palm fruit chemistry and nutrition. *Asia Pacific Journal of Clinical Nutrition*, 12(3), 355–362. <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/14506001/>
- Thani, M. I., Hussin, R., Ramlah, W., & Sulaiman, M. S. (Eds.) (1999). *Industrial Processes & The Environment (Handbook No. 3): The Crude Palm Oil Industry*. Department of Environment.
- Velasco-Reyes, J. F., Díaz-Narváez, G. C., Ramírez-Carrillo, R. E., & Pérez-Cabrera, L. E. (2019). Producción de quitosano a partir de desechos de camarón generados del procesamiento industrial. *Investigación y Desarrollo en Ciencia y Tecnología de Alimentos*, 4, 897–901.
- Wang, J. -P., Chen, Y. -Z., Yuan, S. -J., Sheng, G. -P., & Yu, H. -Q. (2009). Synthesis and characterization of a novel cationic chitosan-based flocculant with a high water-solubility. *Water Research*, 43(20), 5267–5275. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2009.08.040>
- Zhang, Y., Yan, L., Qiao, X., Chi, L., Niu, X., & Mei, Z. (2008). Integration of biological method and membrane technology in treating palm oil mill effluent. *Journal of Environmental Sciences*, 20(5), 558–564. [https://doi.org/10.1016/S1001-0742\(08\)62094-X](https://doi.org/10.1016/S1001-0742(08)62094-X)
- Zhang, Z., Jing, R., He, S., Qian, J., Zhang, K., Ma, G., Chang, X., Zhang, M., Li, Y. (2018). Coagulation of low temperature and low turbidity water: Adjusting basicity of polyaluminum chloride (PAC) and using chitosan as coagulant aid. *Separation and Purification Technology*, 206(29), 131–139. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2018.05.051>