

# Remoción de metales pesados presentes en aguas residuales provenientes de pozos de perforación de petróleo y gas a través de coagulantes naturales

Andrés Camilo Munive-Solís<sup>1</sup>, Daniela Trujillo-Velásquez<sup>2</sup>, Karina Paola Torres-Cervera<sup>3</sup>, Alcides Torregrosa<sup>4</sup>, Yim James Rodríguez-Díaz<sup>5</sup>, Adriana Royero-Ibarra<sup>6</sup>

<sup>1</sup>Ingeniero Ambiental y Sanitario. [acmunive@unicesar.edu.co](mailto:acmunive@unicesar.edu.co)

<sup>2</sup>Ingeniera Ambiental y Sanitario. [dtrujillov@unicesar.edu.co](mailto:dtrujillov@unicesar.edu.co)

<sup>3</sup>Ingeniera Ambiental y Sanitaria. Docente Universitaria y Magister en Medio Ambiente y Desarrollo de la UNAL-Sede Bogota. [karinaptorres@unicesar.edu.co](mailto:karinaptorres@unicesar.edu.co)

<sup>4</sup>Ingeniero Químico. Docente Universitario y Magister en Ciencias Ambientales de la Sue Caribe. [alcidestorregroza@unicesar.edu.co](mailto:alcidestorregroza@unicesar.edu.co)

<sup>5</sup>Ingeniero del Medio Ambiente, Magister en Ingeniería Ambiental. PhD en Educación. [yimrodriguez@unicesar.edu.co](mailto:yimrodriguez@unicesar.edu.co)

<sup>6</sup>Ingeniera Ambiental y Sanitaria. Docente Universitaria y Magister Sistemas de Gestión de la Uniuautónoma. [adrianaroyero@unicesar.edu.co](mailto:adrianaroyero@unicesar.edu.co)

## RESUMEN

Se evaluó la eficiencia del *Opuntia ficus indica* y del almidón de la Yuca como coagulantes en el tratamiento de aguas asociadas a la producción de petróleo y Gas. Se realizaron pruebas a escala de laboratorio de coagulación, floculación y sedimentación con tiempos de 1 minuto, 20 minutos y 30 minutos, respectivamente. Las muestras de Aguas Asociadas con la extracción de petróleo y gas, con valores de turbidez inicial de 14500 NTU. Se evaluaron diversas concentraciones, donde se tuvieron en cuenta parámetros tales como, demanda química de oxígeno (DQO), turbidez, pH y metales pesados (Mercurio, Hierro y Plomo). El cactus fue eficiente para la remoción del Hierro, turbiedad, DBO y DQO generando resultados superiores al 87%. Mientras que el almidón de Yuca fue menos eficiente generando un porcentaje de remoción mayor al 65% con respecto a los parámetros estudiados.

**Palabras clave:** Coagulación, floculación, remoción, *Opuntia ficus-Indica*, Almidón de Yuca.

Recibido: 12 de marzo de 2024. Aceptado: 13 de julio de 2024

Received: March 12, 2024. Accepted: July 13, 2024

## REMOVAL OF HEAVY METALS IN WASTEWATER FROM OIL AND GAS DRILLING WELLS BY NATURAL COAGULANTS

### ABSTRACT

The efficiency of *Opuntia ficus indica* and *Yucca* starch as coagulants in the treatment of water associated with oil and gas production was evaluated. Laboratory scale tests of coagulation, flocculation and sedimentation were carried out with times of 1 minute, 20 minutes and 30 minutes, respectively. The samples of waters associated with oil and gas extraction, with initial turbidity values of 14500 NTU. Different concentrations were evaluated, where parameters such as chemical oxygen demand (COD), turbidity, pH and heavy metals (mercury, iron and lead) were taken into account. The cactus was efficient for the removal of iron, turbidity, BOD and COD, generating results above 87%. *Yucca* starch was less efficient, generating a removal percentage higher than 65% with respect to the parameters studied.

**Keywords:** *coagulation, flocculation, removal, Opuntia ficus-Indica, Yucca starch.*

## 1. INTRODUCCIÓN

La industria petrolera es una de las industrias de más rápido crecimiento y juega un papel significativo en el desarrollo económico de países en vías de desarrollo, como lo indica [1]. Sin embargo, esta industria genera aguas residuales que contienen una amplia variedad de contaminantes, incluidos hidrocarburos de petróleo, mercaptanos, aceites, grasas y, de manera crítica, metales pesados [1] [2].

Esta industria constituye uno de los sectores más nocivos para el recurso hídrico, analizando la incidencia que actividades propias de las industrias extractivas han ocasionado o generan como un riesgo potencial en la afectación del medio ambiente y en especial en el agua. Teniendo en cuenta la importancia del agua como recurso natural que sustenta la vida, todos los esfuerzos deben estar dirigidos a protegerlo y prevenir su agotamiento, pero no pueden estar encaminados a detener el progreso, por el contrario, se necesitan encontrar las fórmulas que permitan un desarrollo conjunto que no solo estimula el crecimiento de la industria, sino que protege las fuentes hídricas.

Las técnicas actuales para el tratamiento de estas aguas residuales incluyen tecnologías basadas en biorreactores, como reactores agitados, de membrana, de lecho empacado y fluidizado (Kuyukina et al., 2020). Además, se han empleado otras técnicas como la tecnología de membrana, degradación fotocatalítica, procesos de oxidación avanzada y catálisis electroquímica (Varjani et al., 2019). Estas técnicas son vitales, especialmente cuando se trata de altas concentraciones de contaminantes, incluidos los metales pesados.

Ya que la producción genera alta carga contaminante que ocasiona el deterioro de la calidad de vida y el incumplimiento normativo, lo que obliga a la industria a buscar medidas de minimización de impactos ambientales. Por lo cual se hace necesaria esta investigación para reducir las cargas orgánicas en el efluente hacia la laguna de oxidación y así lograr el cumplimiento de la normatividad vigente [3], utilizando mecanismos en los procesos de coagulación como lo son los coagulantes naturales que busquen una optimización en la remoción de metales pesados.

Es esencial destacar que los metales pesados presentes en las aguas residuales, como el cadmio, plomo, níquel y vanadio, provienen de complejos organometálicos y representan un riesgo significativo para el medio ambiente y la salud humana [1]. Además, las aguas residuales de otros sectores, como la metalurgia de tierras raras, también contienen metales radiactivos, resaltando la necesidad de tratamientos efectivos [2].

La remoción de estos metales pesados ha demostrado ser efectiva utilizando biocatalizadores, como aserrín hidrofóbico co-inmovilizado con cultivos de *Rhodococcus*, lo que resultó en una remoción de hasta el 96% de ciertos metales pesados [2].

Por lo tanto, se estudiará el comportamiento de parámetros como pH, turbidez, demanda biológica de oxígeno (DBO), demanda química de oxígeno (DQO) y metales pesados, buscando darle una alternativa de solución a este tipo de aguas, utilizando herramientas de bajo costo como lo son la implementación de coagulantes naturales a base del almidón de la yuca y del *Opuntia ficus indica*.

## 2. MATERIALES Y METODO

En esta sección, se realizó un estudio con el objetivo de eliminar metales pesados presentes en las aguas residuales de pozos de perforación de petróleo y gas. Para llevarlo a cabo se exploraron alternativas naturales en lugar de los coagulantes químicos convencionales. Dos de estas fueron el almidón de yuca y la *Opuntia ficus indica* (también conocida como nopal o tuna)

El alcance de la investigación correlacional-longitudinal ya que tiene como propósito evaluar las relaciones que existen entre los coagulantes elaborados a partir del almidón de yuca y *Opuntia ficus indica*. La población corresponde a una carga másica de agua residual, extraída del lodo usado en la perforación de pozos de hidrocarburos, los cuales fueron suministrados por una empresa del sector, legalmente constituida y autorizada por la Agencia Nacional de Hidrocarburos para explorar y explotar yacimientos de petróleo y gas en Colombia, y dirige trabajos en diferentes Cuencas Sedimentarias en Colombia. La muestra correspondiente a las aguas residuales que provienen de los cortes de perforación del taladro las cuales serán evaluadas en los siguientes parámetros DBO, DQO, turbidez, pH, metales como, Hg, Fe y Pb. Para el Diseño experimental, se llevó a cabo en tres repeticiones y tres tratamientos correspondientes a aguas residuales provenientes de perforación de petróleo y gas, con diferentes pH; ya que dicha variable no se controló, se realizaron tres tratamientos y al último fue al que se le realizaron tres repeticiones. A partir de los datos obtenidos se realizó un estudio de medias, desviación estándar y a partir de estos realizar el análisis de varianza con soporte en la prueba de Dunnett, ya que dicha prueba es utilizada para realizar comparaciones planeadas, donde se compara cada uno de los grupos (en este caso cada jarra estudiada en cada uno de los tratamientos) con respecto a un grupo control, a través de este procedimiento se detecta los tratamientos que presentan condiciones eficaces con respecto al control. Esto permitió tener referencia para un total de 40 ensayos.

En la primera etapa, se caracterizó fisicoquímicamente la muestra de agua residual, siguiendo el protocolo de monitoreo de agua y guías del IDEAM. Se tomaron muestras utilizando muestras manuales simples en frascos plásticos herméticos y se realizaron análisis de pH, turbidez, DBO, DQO y concentración de metales pesados.

En la segunda etapa, se calcula la dosis óptima de los coagulantes naturales. Se recolectaron y procesaron yuca y *Opuntia ficus indica*, extrayendo almidón y pulverizando el coagulante. Se llevó a cabo un ensayo de prueba de jarras para determinar la dosis óptima de los coagulantes. Finalmente, en la tercera etapa, se evaluó la efectividad del coagulante. Se consideró la eficiencia del proceso mediante el porcentaje de remoción de turbidez y se comparó con las normativas ambientales vigentes.

### 3. RESULTADOS y DISCUSIONES

A continuación, se presentan los resultados obtenidos durante el desarrollo de esta investigación.

#### 3.1 CARACTERÍSTICAS FISICOQUÍMICAS DEL AGUA RESIDUAL PROVENIENTE DE POZOS DE PERFORACION DE PETROLEO Y GAS.

A continuación, se presentan los resultados obtenidos en las pruebas fisicoquímicas realizadas de cada uno de los parámetros en estudio y los rangos óptimos utilizados para los coagulantes naturales *Opuntia ficus indica* y almidón de yuca. Al igual que los parámetros para evaluar el desempeño en la remoción de la carga contaminante del agua residual proveniente de pozo de perforación de petróleo y gas en los vertimientos puntuales de aguas residuales no doméstica ARnD procedentes de aguas asociadas con hidrocarburos.

Los resultados obtenidos luego de analizar el efluente de agua residual proveniente de pozos de perforación de petróleo y gas se presentan en la siguiente tabla

Tabla 1. Resultados caracterización de aguas residuales de pozos de perforación petróleo y gas

PARÁMETROS	VALOR OBTENIDO	VALORES LÍMITES - Res. 0631 DE 2015
pH	11,48	6.00 – 9.00
Turbidez	15825	NR
DBO5	3168,75	200.00 mg O2/L
DQO	5216,14	400.00 mg O2/L
Hierro	1971	3,00 mg/L

Cobre	1,94	1,00 mg/L
Plomo	<LC (0.10)	0,20 mg/L
Cromo	2,66	0,50 mg/L
Níquel	0,51	0,50 mg/L
Arsénico	18,03	0,10 mg/L
Mercurio	0,74	0,01 mg/L

Fuente: Resultados de laboratorios,2022

En términos generales se puede observar que los parámetros pH, DQO, DBO, Hierro, Cobre, Cromo, Níquel, Arsénico y Mercurio no cumplen con los límites máximos permisibles según la legislación colombiana Resolución 0631 de 2015, por lo que se evidencia que las aguas provenientes de la actividad extractiva presentan una enorme concentración de contaminantes como se observa en la caracterización inicial realizada. Gracias a los resultados obtenidos se escogieron tres metales (Plomo, Mercurio, Hierro) con el fin de evaluar el porcentaje de remoción de estos a través de la aplicación de solución de coagulantes naturales.

### 3.2 Determinación de la Dosis Óptima de los Coagulantes naturales a base de almidón extraído de la yuca y *opuntia ficus indica*.

A continuación, se presentan los resultados obtenidos a diferentes concentraciones, en los tratamientos y corridas realizadas, las cuales aportaron el rango óptimo de la dosis del coagulante.

Para determinar el rango de mejor comportamiento se realizaron tres ensayos y tres repeticiones con diferentes concentraciones de la solución coagulante; la dosis óptima se estableció teniendo en cuenta la eficacia en la remoción con respecto a la turbiedad.

A continuación, se presentarán las tablas con cada uno de los valores de turbiedad hallados y en los cuales se observó que el coagulante obtuvo mayor eficiencia.

#### 3.2.1 Determinación de la dosis óptima para el *Opuntia ficus indica*.

Para determinar el rango de mejor comportamiento se realizaron tres ensayos y tres repeticiones con diferentes concentraciones de la solución coagulante; la dosis óptima se estableció teniendo en cuenta la eficacia en la remoción con respecto a la turbiedad

Para este coagulante orgánico el rango de mejor comportamiento fluctuó entre 12 y 15 mg/L al 1% para todas las concentraciones estudiadas, sin embargo, el mejor comportamiento se obtuvo con 15 mg/L.

En ese sentido, [4] obtuvieron buenos resultados en su proceso de tratamientos de aguas al aplicar una concentración de solución al 1%. La dosis óptima para la remoción de turbiedad y color respecto al coagulante fue de 5 mg/L.

A continuación, se presenta la tabla 2 con los valores de turbiedad hallados en la primera corrida.

**Tabla 2.-** Evaluación de turbiedad con el coagulante natural *opuntia ficus indica* en la corrida 1

Evaluación 1 – Valores de Turbiedad Alcanzada (NTU)						
DOSIS	5 mg/l	30 mg/l	55 mg/l	80 mg/l	105 mg/l	Control
Inicial (NTU)	14.500	14.500	14.500	14.500	14.500	14.500
Final (NTU)	110	170	300	650	1.200	3.400

Remoción	14.390	14.330	14.200	13.850	13.300	11.100
----------	--------	--------	--------	--------	--------	--------

Fuente: Autores, 2022

En las Tabla 3 y 4 se observa el comportamiento de la turbidez a medida que se le aplicaban las diferentes dosis del coagulante

**Tabla 3.-** Evaluación de turbiedad con el coagulante natural *opuntia ficus indica* en la corrida 2

Evaluación 2 – Valores de Turbiedad Alcanzada (NTU)						
DOSIS	5 mg/l	10 mg/l	15 mg/l	20 mg/l	25 mg/l	control
Inicial (NTU)	14.500	14.500	14.500	14.500	14.500	14.500
Final (NTU)	112	89,6	73,2	99,9	102	3.600
Remoción	14.388	14.410,4	14.426,8	14.400,1	14.398	10.900

Fuente: Autores, 2022

**Tabla 4-** Evaluación de turbiedad con el coagulante natural *opuntia ficus indica* en la corrida 3

Evaluación 3 – Valores de Turbiedad Alcanzada (NTU)						
DOSIS	5 mg/l	8 mg/l	12 mg/l	15 mg/l	20 mg/l	Control
Inicial (NTU)	14.500	14.500	14.500	14.500	14.500	14.500
Final (NTU)	110	92	85,4	71,6	99	3.600
Remoción	14.390	14.408	14.414,6	14.428,4	14.401	10.900

Fuente: Autores, 2022

En las tablas 2,3 y 4 se muestra el comportamiento del *opuntia ficus indica* durante los ensayos para obtener la dosis óptima, se puede observar que para las diferentes concentraciones la dosis de mejor comportamiento fue la de 15 mg/L donde se obtuvo el mejor resultado frente a la turbiedad.

### 3.2.2 Determinación de la dosis óptima para el coagulante natural a base de almidón de yuca

Para este coagulante orgánico el rango de mejor comportamiento fluctuó entre 7 y 10 mg/L al 1% para todas las concentraciones estudiadas, sin embargo, el mejor comportamiento se obtuvo con 8 mg/L.

En ese sentido [5] en su investigación Aplicación del clarificante de origen natural (almidón de yuca) para la remoción de la turbidez y color en aguas evaluaron el almidón de yuca a distintas concentraciones (1%, 2%, 3% 4% 5% 6%). La concentración óptima encontrada en el conjunto de ensayos realizados en la prueba de jarras, fue de 1%. Como se muestra continuación en las tablas 5, 6 y 7

**Tabla 5 -** Evaluación de turbiedad con el coagulante natural a base de almidón de yuca en la corrida 1

Evaluación 1 – Valores de Turbiedad Alcanzada (NTU)						
DOSIS	5 mg/l	30 mg/l	55 mg/l	80 mg/l	105 mg/l	control

Inicial (NTU)	14.500	14.500	14.500	14.500	14.500	14.500
Final (NTU)	135,7	350,6	983,4	1.126	1.500	3.200
Remoción	14.364,3	14.149,4	13.516,6	13.374	13.000	11.300

Fuente: Autores, 2022

**Tabla 6-** Evaluación de turbiedad con el coagulante natural a base de almidón de yuca en la corrida 2

Evaluación 2 – Valores de Turbiedad Alcanzada (NTU)						
DOSIS	5 mg/l	10 mg/l	15 mg/l	20 mg/l	25 mg/l	control
Inicial (NTU)	14.500	14.500	14.500	14.500	14.500	14.500
Final (NTU)	420	345	600	870,6	1600	3.400
Remoción	14.080	14.155	13.900	13.629,4	12.900	11.100

Fuente: Autores, 2022

**Tabla 7-** Evaluación de turbiedad con el coagulante natural a base de almidón de yuca en la corrida 3

Evaluación 3 – Valores de Turbiedad Alcanzada (NTU)						
DOSIS	6 mg/l	7 mg/l	8 mg/l	9 mg/l	10 mg/l	control
Inicial (NTU)	14.500	14.500	14.500	14.500	14.500	14.500
Final (NTU)	412,2	380,1	311	340	348,7	3.700
Remoción	14.087,8	14.119,9	14.189	14.160	14.151,3	10.800

Fuente: Autores, 2022

Las tablas 5,6 y 7 se muestra el comportamiento del almidón de yuca durante los ensayos para obtener la dosis óptima, se puede observar que para las diferentes concentraciones la dosis de mejor comportamiento fue la de 8 mg/L donde se obtuvo el mejor resultado frente a la turbiedad.

### 3.3 Evaluación de la efectividad de los coagulantes para la determinación de la remoción en cuanto a los parámetros fisicoquímicos y los metales pesados.

A continuación, se realiza el análisis de los resultados de los tratamientos realizados para aguas residuales provenientes de perforaciones hidráulicas. En primer lugar, se destaca la eficiencia en el tratamiento con los coagulantes naturales *Opuntia ficus indica* y Almidón de yuca. Eficiencias evaluadas para la reducción de la DQO, DBO, Metales pesados (Pb, Fe, Hg) y pH.

- Eficiencia del *Opuntia ficus indica* durante el tratamiento para aguas residuales provenientes de perforaciones hidráulicas. Se trabajó al 1% y con concentraciones de 5 mg/L hasta 105 mg/L, cabe resaltar que el pH no fue tomado como una variable controlada, sin embargo, se midió en cada una de las corridas.

- Remoción de los parámetros estudiados, Metales pesados (Pb, Fe, Hg), DQO, DBO, y pH a partir de la dosis optima hallada con el coagulante natural *Opuntia ficus indica*.

Como se puede observar en los Figura 1, 2 y 3 el comportamiento con respecto a la remoción de las variables estudiadas se puede afirmar que están directamente correlacionadas con la turbiedad, en este sentido parámetros como DQO y DBO 5 superan el 90% de remoción al aplicarle la dosis optima de coagulante *opuntia ficus indica* hallada en el último tratamiento, de el mismo modo se muestra que el pH disminuyó de 7,33 a 7,21 y el hierro presentó un 87,9% de remoción y la turbiedad más de un 95%. En el estudio [6], se presentan antecedentes donde se evidencia que el *opuntia ficus indica* presenta un mejor comportamiento para remoción de turbidez, metales pesados, DBO5 y DQO en pH bajos, manejando intervalos entre 3 - 8.

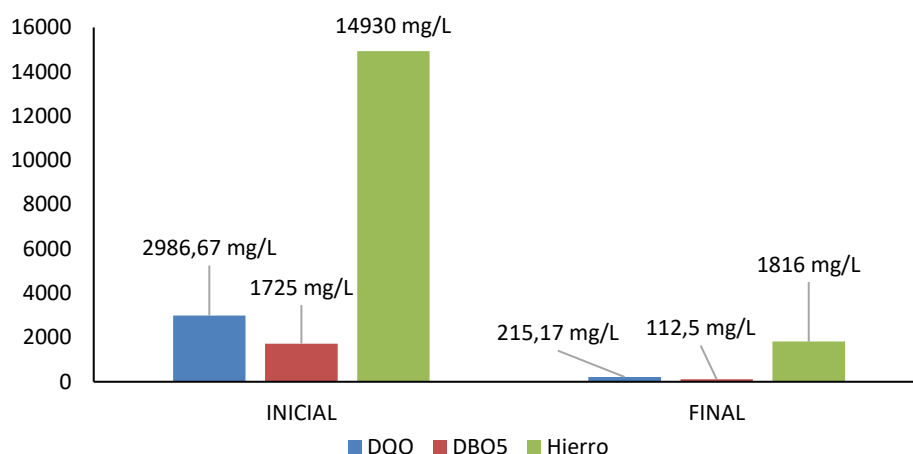


Figura 1. Evaluación inicial y final (DQO, DBO y HIERRO) aplicando *Opuntia ficus indica*

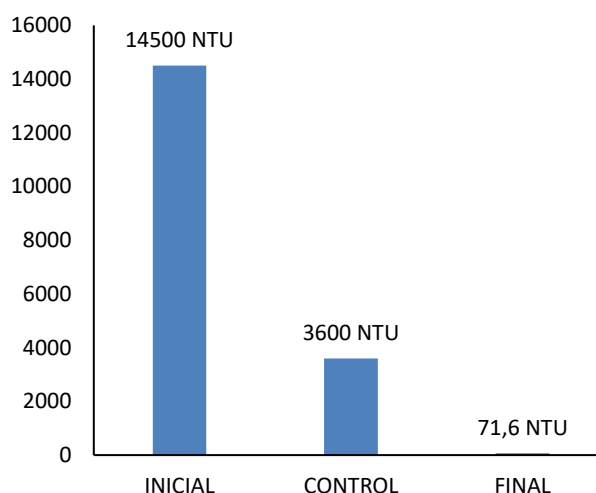
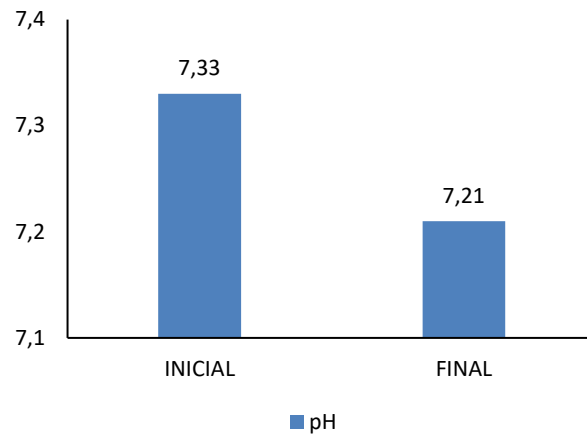


Figura 2. Evaluación de la turbiedad aplicando *Opuntia ficus indica*.



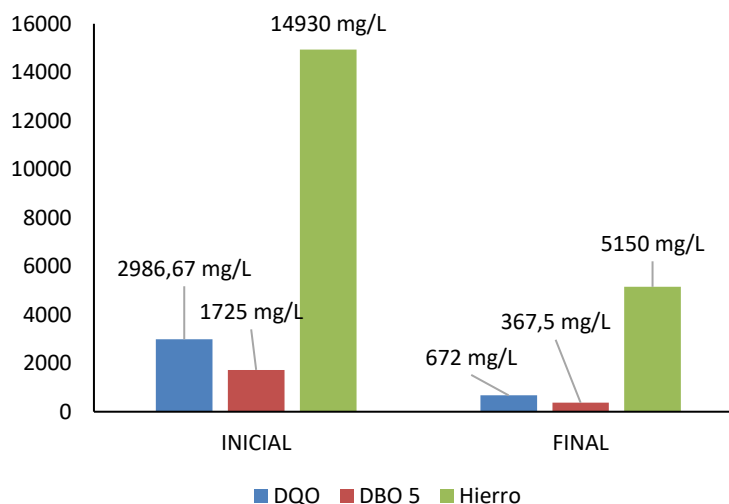
**Figura 3.** Evaluación inicial y final del pH aplicando *Opuntia ficus indica*

En la investigación de [4], al aplicar, *Opuntia ficus-indica*, a una concentración de solución al 1%. La dosis óptima para la remoción de turbiedad y color respecto al coagulante fue de 5 mg/L. Obtuvo un porcentaje de remoción del 76,85% de color y 92% de turbiedad.

Ahora bien, es necesario recalcar que, aunque en primera instancia se escogió estudiar otros metales tales como plomo (Pb) y mercurio (Mg) no salió rastro de dichos componentes en la segunda prueba enviada al laboratorio

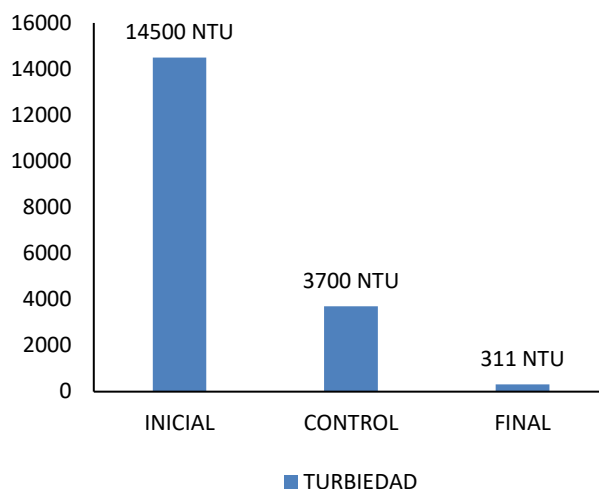
- Remoción de los parámetros estudiados, Metales pesados (Pb, Fe, Hg), DQO, DBO, y pH a partir de la dosis óptima hallada con el coagulante natural a base de almidón de yuca.

Como se puede observar en las figuras 4, 5 y 6 el comportamiento con respecto a la remoción de las variables estudiadas, en este sentido parámetros como DBO5, podemos observar que el porcentaje de remoción fue de 78,69% y aunque es un valor alto observamos que no es lo suficiente para cumplir con la legislación, de la misma manera se presentan con los otros factores como DQO cuyo porcentaje de remoción es 77,47%, hierro cuyo porcentaje es 65,50%, no obstante, ninguno de estos valores cumple lo establecido con la Resolución 0631 de 2015 Por la cual se establecen los parámetros y los valores límites máximos permisibles en los vertimientos puntuales a cuerpos de aguas superficiales y a los sistemas de alcantarillado público y se dictan otras disposiciones.

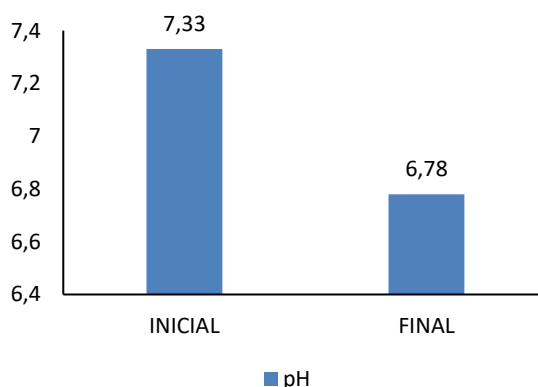




**Figura 4.** Evaluación inicial y final (DQO, DBO y HIERRO) aplicando almidón de yuca como coagulante



**Figura 5.** Evaluación de la turbiedad aplicando almidón de yuca como coagulante



**Figura 6.** Evaluación inicial y final del pH aplicando almidón de yuca como coagulante

En el estudio de [5] en su investigación Aplicación del clarificante de origen natural (almidón de yuca) para la remoción de la turbidez y color en aguas de consumo humano quebrada Juninguillo–La Mina, Moyobamba–San Martín. Evaluó el almidón de yuca a distintas concentraciones (1%, 2%, 3% 4% 5% 6%). La concentración óptima encontrada en el conjunto de ensayos realizados en la prueba de jarras, fue de 1%, es decir 1 mg de almidón /L de agua destilada (relación: peso/ volumen) de solución de almidón de yuca.

Ahora bien, es necesario recalcar que, aunque en primera instancia se escogió estudiar otros metales tales como plomo (Pb) y mercurio (Mg) no salió rastro de dichos componentes en la segunda prueba enviada al laboratorio

**Comparación del porcentaje de remoción de acuerdo con la normatividad ambiental vigente**

En la tabla 8, se pueden ver los cambios que presentan en el agua asociada con perforaciones hidráulica después de haberle aplicado el almidón 1%. Lo cual muestra una reducción carga contaminante, pero los parámetros DQO, DBO5 y Hierro no cumple con el valor máximo permisible exigido por la legislación colombiana a través de la Resolución 0631 de 2015 para aguas residuales no domésticas generadas por las actividades enfocadas en hidrocarburos.

**Tabla 8** Cuadro comparativo agua contaminada agua tratada con coagulante natural *Opuntia ficus indica* al 1% dosis optima de 15mg/l.

Parámetros	Agua contaminada	Agua tratada	Valores límite - res. 0631 de 2015
Ph	7,33	7,21	6,00 - 9,00
Turbiedad	14.500	71,6	NR
DQO	2.986,67	215,17	400 mg/L
DBO5	1725	112,50	200 mg/L
Mercurio	<LC (0,10)	<LC (0,10)	0,01 mg/L
Hierro	14.930	1.816	3 mg/L
Plomo	<LC (0,119)	<LC (0,119)	0,20 mg/L

Fuente: Resultados de Laboratorio, 2022

En la tabla anterior se pueden ver los cambios que presentan en el agua asociada con perforaciones hidráulica después de haberle aplicado el *opuntia ficus indica* al 1%. Lo cual muestra una reducción significativa de la carga contaminante.

Gracias a este tratamiento recibido la DQO presenta un 92,79% de remoción, la DBO5 presento remoción de 93,47%, el Hierro 87,83% y la turbiedad 99,5%.

Cabe resaltar que los parámetros DBO5, DQO y pH se encuentran dentro de los parámetros exigidos por la legislación colombiana a través de la Resolución 0631 de 2015 para aguas residuales no domésticas generadas por las actividades enfocadas en hidrocarburos.

A pesar de que el Hierro presento un 87,83% de remoción, no cumple con lo exigidos por la legislación colombiana a través de la Resolución 0631 de 2015 para aguas residuales no domésticas generadas por las actividades enfocadas en hidrocarburos.

Caracterización de metales realizada antes de la aplicación del coagulante no estaban presentes el mercurio ni el plomo, esto debido al ambiente de formación están sujetos a cambios y deformaciones dependiendo del ambiente de depósito encontrado en ese momento, o de factores ambientales externos e internos en la cuenca lo que pueden generar una variabilidad en la carga contaminante.

A partir del estudio realizado se puede inferir que los resultados que se obtuvieron en el laboratorio con respecto a la dosis optima del *opuntia ficus indica* diverge con [6]. Ya que, nuestra dosis para el *opuntia ficus indica* fue de 15mg/L mientras que en la monografía anterior las dosis optima estuvieron dentro del intervalo 4mg/l-10mg/l. De la misma manera se puede deducir que los resultados que se obtuvieron en el laboratorio con respecto a la dosis optima diverge [4]. Ya que, nuestra dosis para el *opuntia ficus indica* es de 15mg/L.

En la investigación se logró analizar que hay convergencia con [7]. En su tesis de investigación titulada "Eficiencia del coagulante natural *opuntia ficus*. Teniendo de mismo modo una eficiencia de remoción de turbidez de 99%. Del mismo modo se evidencio que el *opuntia ficus indica* tiene mejor comportamiento para remoción de turbidez, metales pesados, DBO5 y DQO en pH entre los intervalos 3-8 lo cual coincide con el estudio de [6].

En la última caracterización de metales realizada antes de la aplicación del coagulante no estaban presentes el mercurio ni el plomo, esto debido al ambiente de formación están sujetos a cambios y deformaciones dependiendo del ambiente de depósito encontrado en ese momento, o de factores ambientales externos e internos en la cuenca lo que pueden generar una variabilidad en la carga contaminante.

En la tabla 9, se evidencia, un porcentaje de remoción de la dosis de 71,6 de un 98% con respecto al control, lo que garantiza la efectividad del *Opuntia ficus indica* en la remoción de turbiedad.

**Tabla 9-** Tabla de rangos de turbiedad al aplicar *Opuntia ficus indica*

Turbiedad Inicial	Turbiedad de Jarra control	Turbiedad al Aplicar dosis optima de 15mg/l
14500 NTU	3600NTU	71,6NTU

Fuente: Autores, 2022

En la tabla 10, se puede observar que el pH si cumple con el valor máximo permisible exigido por la legislación colombiana a través de la Resolución 0631 de 2015 para aguas residuales no domésticas generadas por las actividades enfocadas en hidrocarburos.

**Tabla 10-** Cuadro comparativo agua contaminada agua tratada con coagulante natural Almidón de yuca al 1% donde la dosis optima es de 8 mg/l.

Parámetros	Agua contaminada	Agua tratada	Valores límite - res. 0631 de 2015
Ph	7,33	6,78	6,00 - 9,00
Turbiedad	14.500	311	NR
DQO	2.986,67	672	400 mg/L
DBO5	1725	367,50	200 mg/L
Mercurio	<LC (0,10)	<LC (0,10)	0,01 mg/L
Hierro	14.930	5150	3 mg/L
Plomo	<LC (0,119)	<LC (0,119)	0,20 mg/L

Fuente: Autores, 2022

La reducción porcentual de la turbiedad fue de 97,85%, DQO 77,5%, DBO5 78,7%, Hierro 65%,639. Cabe resaltar que los parámetros DBO5, DQO y pH se encuentran dentro de los parámetros exigidos por la legislación colombiana a través de la Resolución 0631 de 2015 para aguas residuales no domésticas generadas por las actividades enfocadas en hidrocarburos.

Cabe resaltar, que se pudo analizar primera vista un alto valor de remoción con respecto a la turbiedad mostrado mayor porcentaje de eficiencia comparación con [8], donde se afirma y estudia que el porcentaje de remoción en cuanto turbiedad con almidón de yuca es de 68,5%.

Además, a partir del estudio realizado se puede inferir que los resultados que se obtuvieron en el laboratorio con respecto a la dosis optima divergen con [5]. Ya que, nuestra dosis óptima para el almidón de yuca es de 8 mg/L, esta discrepancia puede presentarse debido a que la carga contaminante es distinta.

Se analizó que hay convergencia [5]. En su investigación Aplicación del clarificante de origen natural (almidón de yuca) para la remoción de la turbidez y color en aguas de consumo humano quebrada Juninguillo–La Mina, Moyobamba–San Martín. Evaluó el almidón de yuca a distintas concentraciones (1%, 2%, 3% 4% 5% 6%). La concentración óptima encontrada en el conjunto de ensayos realizados en la prueba de jarras, fue de 1%, es decir 1 mg de almidón /L de agua destilada (relación: peso/ volumen) de solución de almidón de yuca.

**Tabla 12-** Tabla de rangos de turbiedad al aplicar almidón de yuca

<b>Turbiedad Inicial</b>	<b>Turbiedad de Jarra control</b>	<b>Turbiedad al Aplicar dosis optima de 8 mg/l</b>
14500 NTU	3700NTU	311NTU

Fuente: Autores, 2022

Se evidencia también, un porcentaje de remoción de la dosis de 311 de un 91% con respecto al control, lo que garantiza la efectividad del almidón en la remoción de turbiedad.

## 5. CONCLUSIONES

De acuerdo con los resultados esperados en el proyecto y los resultados obtenidos, podemos afirmar; que el *Opuntia ficus indica* es un coagulante efectivo que remueve de manera eficiente parámetros como DQO, DBO5, turbidez y metales como el Hierro donde se obtuvo remoción de hasta el 90%.

Al momento de caracterizar el agua se observa que no cumple con los valores permisibles de la resolución 0631 excepto el pH, sin embargo, después de hallar dosis optima con el *Opuntia ficus indica* se logró que se cumpliera con los valores permisibles en los parámetros de DQO, DBO5.

Se puede concluir que en comparación de ambos coagulantes el más efectivo fue el *Opuntia ficus indica* teniendo un porcentaje de remoción de turbiedad de 99,5%, DQO presentó un 92,79% de remoción, la DBO5 con un 93,47% de remoción y el Hierro 87,83%.

El rango de pH en el que mejor actuó el Almidón de yuca fue a pH 7,12 mostrando que a pH bajos su rendimiento y efectividad es mucho más notorio, pudiendo eliminar un porcentaje de remoción de DBO5 de 78,69, DQO cuyo porcentaje de remoción fue 77,47 y el hierro con un porcentaje de 65,50, no obstante, ninguno de estos valores cumple lo establecido en la resolución 0631.

En la última caracterización de metales realizada antes de la aplicación del coagulante no estaban presentes el mercurio ni el plomo, esto debido al ambiente de formación están sujetos a cambios y deformaciones dependiendo del ambiente de depósito encontrado en ese momento, o de factores ambientales externos e internos en la cuenca lo que pueden generar una variabilidad en la carga contaminante.

## 6. AGRADECIMIENTOS

Queremos agradecer a Dios en primera instancia, A nuestros padres, a los cuales nos sobran las palabras para agradecerles por tanto amor y tolerancia en estos años de preparación. A nuestros familiares y amigos, porque cuando requerimos de su ayuda extendieron su mano para apoyarnos. A nuestros tutores Karina Torres, Alcides Torregrosa, Yim Rodríguez y Adriana Royerio, gracias por su ayuda, su tiempo, su dedicación y sus consejos en cada fase del proyecto

## 7. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Varjani S, et al. Avances en la producción y aplicación de biocarbón a partir de materias primas lignocelulósicas para la remediación de contaminantes ambientales. *ELSEVIER*. 2019;292(Nov).
- [2] Kuyukina MS, Krivoruchko AV, Ivshina IB. Advanced bioreactor treatments of hydrocarbon-containing wastewater. *Applied Sciences (Switzerland)*. 2020;10(3):1–19. doi:10.3390/app10030831
- [3] Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. Resolución 0631 de 2015, Por la cual se establecen los parámetros y los valores límites máximos permisibles en los vertimientos puntuales a cuerpos de aguas superficiales y a los sistemas de alcantarillado público y se dictan otras disposiciones

[Internet]. 2015 Mar [citado el año mes día]. Disponible en:

[https://www.minambiente.gov.co/images/normativa/app/resoluciones/d1-res\\_631\\_marz\\_2015.pdf](https://www.minambiente.gov.co/images/normativa/app/resoluciones/d1-res_631_marz_2015.pdf)

- [4] Padilla Arévalo OG, Zarate Moran JR. Determinación de las características coagulantes del almidón de papa y de la tuna opuntia ficus indica para remoción de turbidez en el proceso de tratamiento de aguas superficiales. Universidad de Guayaquil. Facultad de ingeniería Química; 2020.
- [5] Maldonado Ushiñahua AR. Aplicación del clarificante de origen natural (almidón de yuca) para la remoción de la turbidez y color en aguas de consumo humano quebrada Juninguillo–La Mina, Moyobamba–San Martín. 2018.
- [6] Bravo E. Los impactos de la explotación petrolera en ecosistemas tropicales y la biodiversidad [Internet]. 2017 [citado el año mes día]. Disponible en:  
[https://www.inredh.org/archivos/documentos\\_ambiental/impactos\\_explotacion\\_petrolera\\_esp.pdf](https://www.inredh.org/archivos/documentos_ambiental/impactos_explotacion_petrolera_esp.pdf)
- [7] Palacios J, Zenobia N. Eficiencia del coagulante natural Opuntia ficus indica (L.) Miller con un sistema de filtración para la remoción de parámetros fisicoquímicos y biológicos en el agua residual domestica del centro urbano Hornillos, Ancash 2016 [Internet]. 2016 [citado el año mes día]. Disponible en:  
[http://repositorio.ucv.edu.pe/bitstream/handle/UCV/841/Jaimes\\_PNZ.pdf?sequence=1&isAllowed=y](http://repositorio.ucv.edu.pe/bitstream/handle/UCV/841/Jaimes_PNZ.pdf?sequence=1&isAllowed=y)
- [8] Calle, Adolfo. Identificación de un Coagulante Orgánico para el Tratamiento del Agua en el Acueducto veredal Rancho Largo del Municipio de Samaná. 2021.