



Universidad de San Carlos de Guatemala
Facultad de Ingeniería
Escuela de Ingeniería Sanitaria y
Recursos Hidráulicos (ERIS)

**USO DE LA SEMILLA DE TAMARINDO (*TAMARINDUS INDICA*) COMO COAGULANTE
ORGÁNICO EN PROCESOS DE COAGULACIÓN-FLOCULACIÓN EN EL TRATAMIENTO DE
AGUA PARA POTABILIZACIÓN**

Inga. Tania Yoselin Álvarez Suazo

Asesorado por el M. Sc. Ing. Félix Alan Douglas Aguilar Carrera

Guatemala, septiembre de 2016

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**USO DE LA SEMILLA DE TAMARINDO (*TAMARINDUS INDICA*) COMO COAGULANTE
ORGÁNICO EN PROCESOS DE COAGULACIÓN-FLOCULACIÓN EN EL TRATAMIENTO DE
AGUA PARA POTABILIZACIÓN**

ESTUDIO ESPECIAL

PRESENTADO A LA ESCUELA REGIONAL DE INGENIERÍA SANITARIA Y
RECURSOS HIDRÁULICOS (ERIS)

POR

INGA. TANIA YOSSELIN ÁLVAREZ SUAZO

ASESORADO POR EL M.SC. ING. FÉLIX AGUILAR CARRERA

COMO REQUISITO PREVIO PARA OPTAR AL GRADO ACADÉMICO DE
**MAESTRA (*MAGISTER SCIENTIFICAE*) EN CIENCIAS DE
INGENIERÍA SANITARIA**

GUATEMALA, SEPTIEMBRE DE 2016

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE INGENIERÍA



NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA

DECANO	Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco
VOCAL I	Ing. Ángel Roberto Sic García
VOCAL II	Ing. Pablo Christian de León Rodríguez
VOCAL III	Ing. Elvia Miriam Ruballos Samayoa
VOCAL IV	Br. Raúl Eduardo Ticún Córdova
VOCAL V	Br. Henry Fernando Duarte García
SECRETARIO	Ing. Lesbia Magalí Herrera López

TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN DE ESTUDIO ESPECIAL

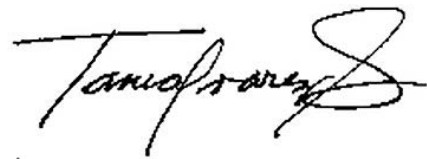
EXAMINADOR	M.Sc. Ing. Félix Alan Douglas Aguilar Carrera
EXAMINADOR	M.Sc. Ing. Adán Ernesto Artemio Pocasangre Collazos
EXAMINADOR	M.Sc. Ing. Zenón Much Santos

HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR

En cumplimiento con los preceptos que establece la Ley de la Universidad de San Carlos de Guatemala, presento para su consideración mi trabajo de graduación titulado:

USO DE LA SEMILLA DE TAMARINDO (*TAMARINDUS INDICA*) COMO COAGULANTE ORGÁNICO EN PROCESOS DE COAGULACIÓN-FLOCULACIÓN EN EL TRATAMIENTO DE AGUA PARA POTABILIZACIÓN

Tema que me fue asignado por la Comisión de Admisión y Otorgamiento de Grado de la Escuela Regional de Ingeniería Sanitaria y Recursos Hidráulicos (ERIS), con fecha de noviembre de 2015.



Inga. Tania Yoselin Álvarez Suazo

alvareztania18@hotmail.com

Carné No. 201590312



Guatemala 19 de septiembre de 2016

M.Sc. Ing. Adán Pocasangre
Coordinador de la Maestría en Ingeniería Sanitaria
Escuela Regional de Ingeniería Sanitaria y Recursos Hidráulicos (ERIS)
Facultad de ingeniería, USAC

Habiendo revisado el documento titulado:

**USO DE LA SEMILLA DE TAMARINDO (TAMARINDUS INDICA) COMO
COAGULANTE ORGÁNICO EN PROCESOS DE COAGULACIÓN-FLOCULACIÓN
EN EL TRATAMIENTO DE AGUA PARA POTABILIZACIÓN**

Elaborado por la Ingeniera Civil Tania Yoselin Álvarez Suazo, como parte de su Estudio Especial, y como requisito para optar al grado académico de Maestra en Ciencias en Ingeniería Sanitaria, mediante la presente me permito informarle mi satisfacción con su contenido y revisión de lingüística, por lo tanto, le comunico que dicho documento cuenta con mi aprobación.

Agradeciendo la atención prestada a la presente me suscribo de usted.
Atentamente.

“ID Y ENSEÑAD A TODOS”

M.Sc. Ing. Félix Aguilar Carrera
Asesor del estudio



Guatemala, 21 de septiembre 2016

Señores Comisión de Admisión y Otorgamiento de Grado
Escuela Regional de Ingeniería Sanitaria y Recursos Hidráulicos (ERIS):

Respetuosamente les comunico que he revisado y aprobado, en mi calidad de coordinador de la Maestría en Ciencias en Ingeniería Sanitaria, el informe final del Estudio Especial titulado:

**USO DE LA SEMILLA DE TAMARINDO (TAMARINDUS INDICA) COMO
COAGULANTE ORGÁNICO EN PROCESOS DE COAGULACIÓN-FLOCULACIÓN
EN EL TRATAMIENTO DE AGUA PARA POTABILIZACIÓN**

Presentado por la estudiante:

Inga. Tania Yoselin Álvarez Suazo

Les manifiesto que la estudiante cumplió en forma satisfactoria con todos los requisitos establecidos por la Escuela Regional de Ingeniería Sanitaria y Recursos Hidráulicos - ERIS- y por la Universidad de San Carlos de Guatemala en la realización de su estudio. Agradeciéndoles de antemano la atención a la presente, se suscribe de ustedes,

Atentamente,
“ID Y ENSEÑAD A TODOS”

M.Sc. Ing. Adán Pocasangre
Coordinador Maestría en Ciencias en Ingeniería Sanitaria

Msc. Ing. Adán Ernesto Pocasangre Collantes
Coordinador Maestría Ingeniería Sanitaria
ERIS / USAC





Guatemala, 23 de septiembre de 2016

El director de la Escuela Regional de Ingeniería Sanitaria y Recursos Hidráulicos - ERIS- después de conocer el dictamen del tribunal examinador integrado por los profesores siguientes: M.Sc. Ing. Adán Pocasangre, M.Sc. Ing. Félix Aguilar Carrera y , M.Sc. Ing. Zenón Much Santos, así como el visto bueno del Coordinador de la Maestría en Ciencias en Ingeniería Sanitaria; M.Sc. Ing. Adán Pocasangre y la revisión lingüística realizada por la Licenciada Brenda Celeste Cetino Diéguez, colegiada No. 10559, al trabajo de la estudiante Inga. Tania Yoselin Álvarez Suazo, titulado: **USO DE LA SEMILLA DE TAMARINDO (TAMARINDUS INDICA) COMO COAGULANTE ORGÁNICO EN PROCESOS DE COAGULACIÓN-FLOCULACIÓN EN EL TRATAMIENTO DE AGUA PARA POTABILIZACIÓN**. En representación de la Comisión de Admisión y Otorgamiento de Grado, procede a la autorización del mismo, en Guatemala a los 23 días del mes de septiembre de 2016.

Imprimase

“ID Y ENSEÑAD A TODOS”

M.Sc. Ing. Pedro Cipriano Saravia Celis
DIRECTOR



ACTO QUE DEDICO A:

- Dios** Por ser mi guía y mi motor, por darme la fuerza y la oportunidad de estudiar esta maestría y alcanzar este logro profesional.
- Mi esposo** Roberto Bueso, por su amor, comprensión, paciencia y apoyo incondicional.
- Mis padres** Roberto Álvarez y Fátima de Álvarez, por su amor, apoyo y por estar siempre pendientes de mí.
- Mis hermanos** Tito y Tatiana, por su cariño, buenos deseos y oraciones.
- Mi abuelita Elsa** Por sus consejos, buenos deseos y por estar siempre pendiente de mí.

Tania Yoselin Álvarez Suazo

AGRADECIMIENTOS A:

**Catedráticos de la Escuela
Regional de Ingeniería Sanitaria y
Recursos Hidráulicos**

Por su dedicación y conocimientos
brindados, que serán muy útiles en mi
vida profesional.

A mis compañeros Villasol

Eduardo, Rafael y Roberto, por su
apoyo, colaboración y amistad.

**A los ingenieros Zenón Much y
Moisés Dubón**

Por el apoyo brindado en el
Laboratorio Unificado de Química y
Microbiología Sanitaria “Dra. Alba
Tabarini Molina”.

Compañeros de ERIS

Por su amistad, paciencia, cariño y
hospitalidad.

Tania Yoselin Álvarez Suazo

	1.2.2.1.	Propiedades electrocinéticas	11
	1.2.2.2.	Propiedades cinéticas.....	11
	1.2.2.3.	Propiedades ópticas	12
	1.2.2.4.	Propiedad de superficie	13
1.3.		Polímeros	13
	1.3.1.	Definición de polímero	13
	1.3.2.	Clasificación de los polímeros	14
		1.3.2.1. De acuerdo con su carga eléctrica	14
		1.3.2.2. De acuerdo con su origen.....	15
		1.3.2.2.1. Polímeros naturales.....	15
		1.3.2.2.2. Polímeros sintéticos	17
1.4.		Coagulación.....	17
	1.4.1.	Mecanismos de remoción de turbiedad	19
	1.4.2.	Mecánica del proceso de coagulación.....	20
	1.4.3.	Etapas de la coagulación.....	21
	1.4.4.	Mecanismos de coagulación.....	22
	1.4.5.	Factores que afectan la coagulación	24
		1.4.5.1. Influencia del pH.....	24
		1.4.5.2. Influencia de la temperatura del agua..	24
		1.4.5.3. Influencia de la concentración del coagulante	25
		1.4.5.4. Influencia de la mezcla	25
		1.4.5.5. Influencia de la turbiedad.....	26
1.5.		Floculación	27
	1.5.1.	Factores que influyen en la floculación.....	28
		1.5.1.1. Naturaleza del agua.....	28
		1.5.1.2. Influencia del tiempo de floculación	28
		1.5.1.3. Influencia del gradiente de velocidad...	29
		1.5.1.4. Influencia de la variación del caudal	30

1.6.	Coagulantes naturales.....	31
1.6.1.	Almidones.....	32
1.6.1.1.	Aplicación de almidones como agentes floculantes.....	33
1.6.2.	Semillas de tamarindo como coagulante	33
2.	METODOLOGÍA.....	35
2.1.	Materiales.....	35
2.1.1.	Obtención del coagulante tamarindo (<i>Tamarindus indica</i>).....	35
2.1.2.	Obtención del agua empleada para el estudio	36
2.2.	Método.....	37
2.2.1.	Preparación de la prueba de jarras.....	37
2.2.2.	Preparación del sistema de filtración	38
2.3.	Fase experimental	39
2.3.1.	Determinación de la dosis óptima con sulfato de aluminio	39
2.3.2.	Determinación del número de muestras	41
2.3.3.	Combinación del $Al_2(SO_4)_3$ y la semilla de tamarindo (<i>Tamarindus indica</i>) para el tratamiento de agua.....	42
2.3.4.	Procedimiento de filtración.....	43
3.	RESULTADOS	45
3.1.	Rendimiento de la semilla de tamarindo (<i>Tamarindus indica</i>) como coagulante orgánico en la remoción de turbiedad y color.....	45
3.2.	Combinación del $Al_2(SO_4)_3$ y la semilla de tamarindo (<i>Tamarindus indica</i>).....	50

3.3.	Eficiencia en la remoción de turbiedad y color utilizando la semilla de tamarindo (<i>Tamarindus indica</i>) para el tratamiento de agua.....	58
3.4.	Eficiencia en la remoción de turbiedad y color usando una combinación del $Al_2(SO_4)_3$ y la semilla de tamarindo (<i>Tamarindus indica</i>) para el tratamiento de agua.	63
3.5.	Costos de coagulantes	67
4.	DISCUSIÓN DE RESULTADOS	69
4.1.	Análisis de la efectividad de la semilla de tamarindo (<i>Tamarindus indica</i>) en la remoción de turbiedad.....	69
4.2.	Análisis de la efectividad de la semilla de tamarindo (<i>Tamarindus indica</i>) en la remoción de color.....	73
4.3.	Análisis de la efectividad de la combinación del $Al_2(SO_4)_3$ y la semilla de tamarindo (<i>Tamarindus indica</i>) en la remoción de turbiedad.....	76
4.4.	Análisis de la efectividad de la combinación del $Al_2(SO_4)_3$ y la semilla de tamarindo (<i>Tamarindus indica</i>) en la remoción de color.....	81
4.5.	Factibilidad técnica y económica del uso de la semilla de tamarindo (<i>Tamarindus indica</i>) en el proceso de tratamiento de agua.....	82
5.	CONCLUSIONES.....	85
6.	RECOMENDACIONES	89
7.	BIBLIOGRAFÍA	91

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

FIGURAS

1.	Doble capa de una partícula coloidal	7
2.	Energía potencial de interacción entre dos coloides	9
3.	Clasificación y ejemplos de algunos polímeros.....	14
4.	Proceso de coagulación	18
5.	Diagrama de remoción de turbiedad	20
6.	Fases de la coagulación	22
7.	Coagulación por adsorción	23
8.	Coagulación por barrido	23
9.	Efecto del periodo de floculación en la sedimentación	29
10.	Efecto de la variación del gradiente de velocidad en la turbiedad residual según TeKippe y Ham	30
11.	Aparato de prueba de jarra convencional para el tratamiento de agua	37
12.	Equipo de filtración	38
13.	Turbiedad final del agua aplicando la semilla de tamarindo (<i>Tamarindus indica</i>) para rangos de turbiedad de 100-200 NTU.....	69
14.	Turbiedad final del agua aplicando la semilla de tamarindo (<i>Tamarindus indica</i>) para rangos de turbiedad de 201-300 NTU.....	70
15.	Turbiedad final del agua aplicando la semilla de tamarindo (<i>Tamarindus indica</i>) para rangos de turbiedad de 301-400 NTU.....	71
16.	Turbiedad final del agua aplicando la semilla de tamarindo (<i>Tamarindus indica</i>) para rangos de turbiedad de 401-500 NTU.....	72
17.	Color final del agua aplicando la semilla de tamarindo (<i>Tamarindus indica</i>) para rangos de turbiedad de 100-214 UC	74
18.	Color final del agua aplicando la semilla de tamarindo (<i>Tamarindus indica</i>) para rangos de turbiedad de 215-300 UC	74
19.	Color final del agua aplicando la semilla de tamarindo (<i>Tamarindus indica</i>) para rangos de turbiedad de 301-415 UC	75
20.	Color final del agua aplicando la semilla de tamarindo (<i>Tamarindus indica</i>) para rangos de turbiedad de 416-500 UC	75

21.	Sustitución de sulfato de aluminio por almidón de tamarindo para turbiedad de 100 a 200 después del proceso de coagulación-floculación.....	76
22.	Sustitución de sulfato de aluminio por almidón de tamarindo para color de 100 a 214 después del proceso de coagulación-floculación.....	77
23.	Sustitución de sulfato de aluminio por almidón de tamarindo para turbiedad de 201 a 300 después del proceso de coagulación-floculación.....	77
24.	Sustitución de sulfato de aluminio por almidón de tamarindo para color de 215 a 300 después del proceso de coagulación-floculación.....	78
25.	Sustitución de sulfato de aluminio por almidón de tamarindo para turbiedad de 301 a 400 después del proceso de coagulación-floculación.....	78
26.	Sustitución de sulfato de aluminio por almidón de tamarindo para color de 301 a 415 después del proceso de coagulación-floculación.....	79
27.	Sustitución de sulfato de aluminio por almidón de tamarindo para turbiedad de 401 a 500 después del proceso de coagulación-floculación.....	79
28.	Sustitución de sulfato de aluminio por almidón de tamarindo para color de 416 a 500 después del proceso de coagulación-floculación.....	80

TABLAS

I.	Separación de partículas	3
II.	Tiempos de decantación según el tipo de partícula	4
III.	Polímeros naturales que tienen propiedades coagulantes o floculantes	16
IV.	Composición química de la semilla de tamarindo (en base seca)	34
V.	Dosis óptima de sulfato de aluminio en relación con la turbiedad	40
VI.	Dosis óptima de sulfato de aluminio en relación con el color.....	40
VII.	Combinaciones de sustitución de sulfato de aluminio con tamarindo (<i>Tamarindus indica</i>)	42
VIII.	Turbiedad final del agua aplicando la semilla de tamarindo (<i>Tamarindus indica</i>) luego del proceso de coagulación-floculación.....	46
IX.	Turbiedad final del agua aplicando la semilla de tamarindo (<i>Tamarindus indica</i>) luego del proceso de filtración	47
X.	Color final del agua aplicando la semilla de tamarindo (<i>Tamarindus indica</i>) luego del proceso de coagulación-floculación.....	48
XI.	Color final del agua aplicando la semilla de tamarindo (<i>Tamarindus indica</i>) luego del proceso de filtración.....	49
XII.	Sustitución de sulfato de aluminio por almidón de tamarindo para turbiedad de 100 a 200 después del proceso coagulación-floculación.....	50
XIII.	Sustitución de sulfato de aluminio por almidón de tamarindo para turbiedad de 100 a 200 después de filtrado	51
XIV.	Sustitución de sulfato de aluminio por almidón de tamarindo para color de 100 a 214 después del proceso coagulación-floculación.....	51
XV.	Tabla XV Sustitución de sulfato de aluminio por almidón de tamarindo para color de 100 a 214 después de filtrado	52
XVI.	Sustitución de sulfato de aluminio por almidón de tamarindo para turbiedad de 201 a 300 después del proceso coagulación-floculación.....	52
XVII.	Sustitución de sulfato de aluminio por almidón de tamarindo para turbiedad de 201 a 300 después de filtrado	53
XVIII.	Sustitución de sulfato de aluminio por almidón de tamarindo para color de 215 a 300 después del proceso coagulación-floculación.....	53
XIX.	Sustitución de sulfato de aluminio por almidón de tamarindo para color de 215 a 300 después de filtrado	54

XX.	Sustitución de sulfato de aluminio por almidón de tamarindo para turbiedad de 301 a 400 después del proceso coagulación-floculación	54
XXI.	Sustitución de sulfato de aluminio por almidón de tamarindo para turbiedad de 301 a 400 después de filtrar	55
XXII.	Sustitución de sulfato de aluminio por almidón de tamarindo para color de 301 a 415 después del proceso coagulación-floculación	55
XXIII.	Sustitución de sulfato de aluminio por almidón de tamarindo para color de 301 a 415 después de filtrar	56
XXIV.	Sustitución de sulfato de aluminio por almidón de tamarindo para turbiedad de 401 a 500 después del proceso coagulación-floculación	56
XXV.	Sustitución de sulfato de aluminio por almidón de tamarindo para turbiedad de 401 a 500 después de filtrar	57
XXVI.	Sustitución de sulfato de aluminio por almidón de tamarindo para color de 416 a 500 después del proceso coagulación-floculación	57
XXVII.	Sustitución de sulfato de aluminio por almidón de tamarindo para color de 416 a 500 después de filtrar	58
XXVIII.	Eficiencia en la remoción de turbiedad utilizando la semilla de tamarindo (<i>Tamarindus indica</i>) después del proceso de coagulación-floculación	59
XXIX.	Eficiencia en la remoción de turbiedad utilizando la semilla de tamarindo (<i>Tamarindus indica</i>) después del proceso de filtración	60
XXX.	Eficiencia en la remoción de color utilizando la semilla de tamarindo (<i>Tamarindus indica</i>) después del proceso de coagulación-floculación	61
XXXI.	Eficiencia en la remoción de color utilizando la semilla de tamarindo (<i>Tamarindus indica</i>) después del proceso de filtración	62
XXXII.	Porcentaje de eficiencia en la remoción de turbiedad para rangos entre 100-200 NTU	63
XXXIII.	Tabla XXXIII Porcentaje de eficiencia en la remoción de color para rangos entre 100-214 UC.....	64
XXXIV.	Porcentaje de eficiencia en la remoción de turbiedad para rangos entre 201-300 NTU	64
XXXV.	Porcentaje de eficiencia en la remoción de color para rangos entre 301-415 UC	66
XXXVI.	Porcentaje de eficiencia en la remoción de turbiedad para rangos entre 401-500 NTU	66

XXXVII.	Porcentaje de eficiencia en la remoción de color para rangos entre 416-500 UC	67
XXXVIII.	Comparación de costos de coagulantes	67

GLOSARIO

Agua potable	Agua apta para el consumo humano, de acuerdo con los requisitos físicos, químicos y microbiológicos establecidos por la normativa vigente que aseguran su inocuidad y aptitud para el consumo humano.
Almidón	Polisacárido de reserva alimenticia predominante en las plantas, construido por glucosa en sus dos formas poliméricas: amilosa y amilopectina.
Coagulación	Proceso de desestabilización química de las partículas coloidales que se producen al neutralizar las fuerzas que los mantienen separados, por medio de la adición de los coagulantes químicos y la aplicación de la energía de mezclado.
Coagulante	Son sales metálicas que reaccionan con la alcalinidad del agua, para producir un flóculo de hidróxido del metal, insoluble en agua, que incorpore a las partículas coloidales y favorezca la aglomeración de las partículas para su posterior eliminación de color.

Color del agua	Es una propiedad física que se debe a una percepción visual del agua, producida principalmente por la presencia de iones metálicos naturales (hierro y manganeso), humus materia orgánica, plancton y residuos industriales. El color verdadero es el debido a sustancias disueltas o en estado coloidal, aquel cuya turbiedad ha sido eliminada. Y el color aparente es el causado por sustancias disueltas y por materia suspendida.
Enfermedades de origen hídrico	Son las enfermedades causadas por organismos patógenos presentes en el agua y que pueden ingresar al organismo a través de la boca o la piel.
Flóculos	Partículas desestabilizadas y aglomeradas por acción del coagulante.
Floculación	Es la aglomeración (aglutinación) de partículas suspendidas en el agua para formar partículas de mayor tamaño (flóculos) que se pueden eliminar por medio de sedimentación o flotación.
Normas de calidad del agua	Serie de lineamientos que se establecen para asegurar un suministro de agua limpia y saludable para el consumo humano y, de este modo, proteger la salud de las personas. Estas normas se basan normalmente en unos niveles de toxicidad científicamente aceptables tanto para los humanos como para los organismos acuáticos.

Parámetros	Variable que se utiliza como referencia para determinar la calidad del agua.
Polímeros	Son cadenas de monómeros individuales, ligados entre sí en una configuración lineal o ramificada con grupos funcionales, unidos a lo largo de la cadena por enlaces covalentes que pueden poseer carga negativa, carga positiva o una carga neutral, o con muy baja tendencia a desarrollar carga en una solución acuosa.
Tratamiento de agua	Remoción por métodos naturales o artificiales de todas las materias objetables presentes en el agua, para alcanzar las metas especificadas en las normas de calidad de agua para consumo humano.
Turbiedad	Propiedad óptica del agua basada en la medida de luz reflejada por las partículas en suspensión.

RESUMEN

El propósito de este estudio es evaluar la eficiencia de remoción de la turbiedad y el color del agua cruda utilizando un coagulante orgánico a base de semilla de tamarindo (*Tamarindus indica*) que pueda sustituir al sulfato de aluminio en los procesos de coagulación-floculación y de esta manera tener una alternativa eficiente, económica, que no afecte al medio ambiente y a la salud de las personas.

Para llevar a cabo el estudio se tomaron muestras de agua de un grifo, las cuales fueron modificadas con caolín para obtener los valores de turbiedad y color requeridos, con el fin de que tuviera características similares al agua, antes de ser tratadas en una planta. Los análisis se llevaron a cabo en el Laboratorio Unificado de Química y Microbiología Sanitaria “Doctora Alba Estela Tabarini Molina”, en la ERIS de la Facultad de Ingeniería, en la Universidad de San Carlos de Guatemala, durante abril de 2016. Esta investigación se desarrolló con el objetivo de evaluar la capacidad de la semilla de tamarindo (*Tamarindus indica*) como coagulante orgánico en la remoción de turbiedad y color.

Como resultado de la evaluación del rendimiento de la semilla de tamarindo (*Tamarindus indica*) como coagulante en el proceso de coagulación- floculación, esta alcanzó un porcentaje promedio de remoción de turbiedad del 67.8% y luego de la filtración, de un 99.31%. Para el parámetro de color se obtuvo un porcentaje promedio de remoción de color en el proceso de coagulación- floculación del 49.7% y del 98.6% después de la filtración.

Al realizar las combinaciones del sulfato de aluminio con el coagulante orgánico a base de semilla de tamarindo (*Tamarindus indica*), se obtuvo que es posible sustituir hasta en un 20% este coagulante orgánico por el sulfato de aluminio en el proceso de coagulación-floculación, para cumplir con los límites establecidos por las normas de calidad del agua de Guatemala y Honduras.

Con esta investigación se comprobó que el coagulante a base de tamarindo (*Tamarindus indica*) es capaz de remover hasta en 70% la turbiedad para rangos entre 400-500 NTU luego del proceso de coagulación-floculación y hasta un 99% luego de la filtración, y de color hasta un 60% después del proceso de coagulación-floculación y del 98% después de la filtración para valores mayores a las 416 UC. Para obtener valores de turbiedad y color que cumplan con los permitidos por la Norma Técnica de Calidad del Agua de Honduras y la de calidad de agua COGUANOR NTG 29001 para Guatemala, para que el líquido sea apto para el consumo humano.

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Los coagulantes tienen un papel importante en el tratamiento del agua potable, especialmente para el consumo del ser humano. Los coagulantes químicos más usados en el tratamiento de las aguas son el sulfato de aluminio, el cloruro férrico, el sulfato ferroso y férrico y el cloro-sulfato férrico (CEPIS/OPS 2004). Entre estos el más utilizado es el sulfato de aluminio. Este producto es altamente efectivo en la reducción de la turbiedad del agua; sin embargo no es producido en la región, lo que representa un costo en el tratamiento del agua. Además, hay estudios que relacionan el uso de este coagulante con la enfermedad de Alzheimer, tal como se menciona en los antecedentes de esta investigación. De aquí se deriva una serie de preguntas para investigación:

- ¿Es posible sustituir el sulfato de aluminio por el coagulante orgánico a base de tamarindo (*Tamarindus indica*) y que este brinde resultados mejores o iguales al sulfato de aluminio sobre los parámetros de turbiedad y color?
- ¿En qué porcentaje se podrá sustituir el sulfato de aluminio con las semillas de tamarindo y cuáles serán los efectos en términos de costo al utilizar ambos coagulantes?
- ¿Será posible mantener el valor mínimo de 5 NTU permitidos de turbiedad al utilizar semillas de tamarindo como coagulante?
- ¿Será posible mantener el valor mínimo de 15 UC permitido por la Norma Técnica de Calidad del Agua para Honduras de color y de 35 UC para la Norma COGUANOR NTG 29001 al utilizar semillas de tamarindo como coagulante?
- ¿De cuánto será la reducción de costos en porcentaje al utilizar semillas de tamarindo en lugar de sulfato de aluminio?

JUSTIFICACIÓN

Según datos de OMS (2004), solo el 24% de la población urbana de América Latina y el Caribe dispone de algún tipo de sistema de vigilancia y control de la calidad del agua. En Honduras, Nicaragua, Haití, Guyana y Bolivia más del 50% de la población solo tiene acceso a agua corriente potable menos del 50% del tiempo. Además, la población protegida por sistemas adecuados de vigilancia y de control de la calidad del agua es muy limitada en las zonas urbanas e insignificantes en las rurales.

UNICEF (2007) informa que la mejora en sistemas de agua potable puede llegar a reducir la incidencia de las enfermedades diarreicas entre un 25 y un 84%, y que alrededor de dos millones de niños menores de cinco años de todo el mundo mueren anualmente por esa causa. En muchos países la proporción de muertes infantiles ocasionadas principalmente por diarreas es de alrededor de un 20%. Las enfermedades de origen hídrico siguen representando el primer lugar de morbilidad y el segundo en tasas de mortalidad infantil, con gran impacto en el deterioro de la salud de niños menores de un año («UNICEF y el Agua en Honduras» [sin fecha]).

Estos datos reflejan la necesidad de mejorar el acceso a los servicios de abastecimiento de agua y su saneamiento, y es la clarificación del líquido una de las etapas más importantes en el proceso de potabilización, ya que permite la remoción de materiales de naturaleza coloidal en suspensión, tales como arcilla, limo y lodos, y para poder llevar a cabo la clarificación del agua es necesaria la aplicación de agentes coagulantes.

Entre los agentes coagulantes más utilizados hoy en día se encuentra el sulfato de aluminio, aunque algunos estudios han concluido en que el aluminio residual en el agua de consumo humano puede ser peligroso para la salud, con efectos graves en el sistema nervioso central, al punto de que se considera que existe una relación entre los agentes etiológicos del mal de Alzheimer y la concentración de aluminio en el organismo, además de que podría ocasionar envejecimiento prematuro (Universidad de Zulia 2009).

En ese sentido se abre la posibilidad a nuevas tecnologías con el uso de coagulantes naturales obtenidos de especies vegetales o animales, como una alternativa viable, menos perjudicial para la salud y amigable con el medio ambiente. Por lo tanto, en esta investigación se propone la utilización de coagulante orgánico extraído de las semillas de tamarindo (*Tamarindus indica*) como una alternativa orientada a mejorar la calidad del agua destinada al consumo humano.

OBJETIVOS

General

Evaluar la capacidad de la semilla de tamarindo (*Tamarindus indica*) como coagulante orgánico en la remoción de turbiedad y color del agua destinada al consumo humano y comparar los resultados de los análisis con las normativas de calidad de agua potable de Guatemala y Honduras.

Específicos

1. Comprobar la eficiencia de la semilla de tamarindo (*Tamarindus indica*) como coagulante orgánico del agua para remover turbiedad y color.
2. Comprobar la eficiencia de remoción de color y turbiedad de la combinación de $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ y coagulante orgánico a base de semilla de tamarindo.
3. Establecer en qué porcentaje se puede sustituir el coagulante orgánico a base de tamarindo (*Tamarindus indica*) por el sulfato de aluminio.
4. Establecer la factibilidad técnica y económica del uso de semillas de tamarindo en el proceso de coagulación-floculación.

HIPÓTESIS

El coagulante orgánico a base de semillas de tamarindo (*Tamarindus indica*) es capaz de remover hasta en 60% la turbiedad y en 50% el color del agua, cumpliendo con el límite máximo permisible establecido en la Norma COGUANOR 29001 de Guatemala y el límite máximo admisible en la Norma Técnica de Calidad del Agua de Honduras al final del tratamiento de potabilización.

ANTECEDENTES

El tratamiento de potabilización convencional comprende básicamente la clarificación del agua luego de la captación. Esta se realiza a través de las etapas de coagulación-floculación, sedimentación, filtración y desinfección. Sin embargo, en zonas de escasos recursos y de tecnología limitada no es viable ni adecuado, debido principalmente al elevado costo de inversión y gestión y al mantenimiento que requiere.

Además, este tipo de instalaciones requieren de un importante desarrollo en infraestructura, personal cualificado para su adecuado manejo y operación, así como la adición de productos químicos necesarios para su funcionamiento. Precisamente este último requisito representa una limitante en la aplicación de la tecnología de potabilización convencional, ya que los reactivos químicos pueden alcanzar un costo económico considerable si no son producidos a nivel local, ya que deben ser importados, lo que incrementa considerablemente su valor.

La historia en el uso de los coagulantes naturales es larga. Los polímeros orgánicos de origen natural se han utilizado por más de dos mil años en India, África y China como coagulantes eficientes y ayudantes de coagulación en aguas con alta turbiedad (Kawamura 1991). Estos polímeros orgánicos naturales son interesantes porque, en comparación con el uso de polímeros orgánicos sintéticos que contienen monómeros acrilamida, no existe peligro a la salud humana y serían menos costosos que los productos químicos convencionales, ya que se encuentran disponibles localmente (Asrafuzzaman et al. 2011).

Entre algunos coagulantes alternativos empleados en América Latina están las semillas de la planta moringa oleífera, usada como coagulante primario en la clarificación de aguas. Son diversos los coagulantes naturales (papa, cactus, maíz, trigo y yuca) que han sido utilizados en la clarificación de agua, dentro de la extensa gama de productos estudiados hasta ahora en el mundo (Ramirez y Jaramillo 2014).

Una serie de efectivos coagulantes naturales de origen vegetal han sido identificados; entre ellos nirmali, okra, moringa oleífera, *Cicer arietinum*. Los coagulantes naturales tienen un futuro brillante y están siendo considerados por muchos investigadores, debido a que son abundantes, de bajo precio, amigables con el medio ambiente, por su multifuncionalidad y su naturaleza biodegradable en la purificación del agua (Asrafuzzaman et al. 2011).

Mejía (1986) realizó el estudio de la utilización de la semilla de moringa oleífera como coagulante natural y obtuvo como resultado un mejor comportamiento al compararla con el sulfato de aluminio. El mismo estudio determinó que se pueden utilizar como ayudantes de coagulación el garbanzo, la soya, la yuca, el maíz y la avena. Martínez (1987) presentó un estudio sobre el uso de la fécula de maíz como una alternativa en el proceso de coagulación del agua, empleando el sulfato de aluminio, y concluyó que es factible su uso como polielectrolito natural para sustituir hasta un 25% el sulfato de aluminio en el proceso de tratamiento de agua. Ndabigengesere y Narasiah (1998) desarrollaron un modelo utilizando agua turbia para el proceso coagulación-floculación y sedimentación empleando semillas de moringa oleífera, con y sin cáscara, las que compararon con aluminio en la remoción de turbiedad, y con la dosis óptima la turbiedad disminuyó de 105 a 10 NTU, correspondiente a un 90% de remoción de turbiedad, en el caso del aluminio, las semillas de moringa con y sin cáscara.

Díaz et al. (1999) evaluaron la efectividad del cactus latifaria y las semillas de *Prosopis juliflora* como coagulantes naturales en agua sintética modificada con caolín. Para ello manejaron turbiedades altas (100-200 NTU) y bajas (30-40 NTU), en donde para el cactus latifaria se obtuvieron valores finales menores a 10 NTU y para la *Prosopis juliflora* valores menores a 5NTU.

Centro de Investigación y Estudios en Medio Ambiente, Universidad Nacional de Ingeniería de Managua (2004) analizó la efectividad del polímero extraído de las pencas de *Tuna opuntia cochinellífera*, denominado “Cochifloc”, en el lago de Managua, el cual fue comparado con el sulfato de aluminio, cloruro férrico y el polímero sintético Quimifloc, se obtuvo un porcentaje de remoción para el Cochifloc de 42%. Yang et al. (2007) trabajaron con cactus opuntia, evaluando la eficacia de dicho coagulante para la eliminación de turbiedad en aguas provenientes de estuario y río. La turbiedad inicial fue de 499 y 547 NTU, respectivamente, y se redujeron en 98% para el agua de estuario y en 70% para la de río.

En el Instituto de Estudios Ambientales, Universidad de la Sierra Juárez, Oaxaca (2007), se llevó a cabo un estudio con cinco semillas naturales para la remoción de turbiedad. Los resultados mostraron que el que podría tener una aplicación como coagulante primario es el extracto de la semilla de huizache, con una remoción de la turbiedad de 60% en aguas con turbiedad baja (50 UTN) y de 30% en aguas con turbiedad alta (100 UTN).

Nuñez (2007) estudió muestras de agua del río Neteapa, que abastece el casco urbano del municipio de Morocelí, Honduras, y con semillas de moringa oleífera provenientes de la zona sur de este país. Se realizaron ensayos con cuatro dosis de la semilla de moringa oleífera en tres rangos de turbiedad, entre 0 – 500 UNT, obteniendo una eficiencia de reducción de hasta el 98%.

Šcíban et al. (2009) evaluaron la efectividad de los extractos de diferentes especies de semillas de castaña y bellotas como coagulantes naturales, utilizando agua turbia sintética, y el resultado fue una actividad de coagulación de entre 80 y 70%, respectivamente.

Sandoval y Laines (2013) trabajaron con moringa oleífera, con agua destilada, con agua de mar y con cloruro de sodio, en comparación con el sulfato de aluminio. Luego del tratamiento obtuvieron un máximo de remoción de color de 95.27% para la moringa oleífera con cloruro de sodio y de remoción de turbiedad de 92.03%. En el caso de la moringa oleífera con agua destilada, la turbiedad inicial fue de 36 NTU y la final, de 15.83 NTU, con una remoción de turbiedad del 56.02% y para el valor de color la remoción fue de un 49.03%.

Hernández et al. (2013) evaluaron la efectividad de las semillas de tamarindo (*Tamarindus indica*) en aguas con alta turbiedad. Los ensayos se efectuaron a escala de laboratorio, utilizando agua proveniente del grifo. Los resultados mostraron la eficiencia del coagulante, obteniéndose porcentajes de remoción para la turbiedad después del tratamiento de entre 72,45% y 89,09% antes de filtrar; y entre 98,78% y 99,71% después del proceso de filtración. Los porcentajes de remoción de color oscilan entre 67,47% y 99,60%.

Moscozo (2015) realizó una investigación en la que evaluó el uso de almidón de yuca como coagulante natural para remoción de turbiedad y concluyó que es posible sustituir el sulfato de aluminio hasta en un 60%, logrando valores de turbiedad inferiores al límite máximo permisible por la Norma COGUANOR NTG 29001.

ALCANCES Y LIMITANTES

Alcance

El estudio está enfocado en evaluar la capacidad de la semilla de tamarindo (*tamarindus indica*) como coagulante orgánico en la remoción de turbiedad y color del agua destinada al consumo humano y determinar el porcentaje máximo en que puede ser sustituido el sulfato de aluminio por almidón de tamarindo (*Tamarindus indica*) para cumplir con el requerimiento de límite máximo permisible establecido en la Norma NTG COGUANOR 29,001 de Guatemala y con el admisible de la Norma Técnica de Calidad del Agua de Honduras.

Limitante

No se trabajó con el agua en condiciones naturales, ya que por la época en que se efectuó la investigación, los valores de turbiedad eran muy bajos; por consiguiente, sus propiedades físicas fueron modificadas de acuerdo con los valores requeridos.

INTRODUCCIÓN

El agua es esencial para la vida, es uno de los recursos fundamentales para las actividades agrícola, económica e industrial, que contribuyen al desarrollo de las comunidades. Es reconocida su importancia para beber, para cocinar los alimentos y para el aseo personal y de la casa; asimismo, es esencial para preservar la salud. El agua también es necesaria para la fabricación de productos industriales, la generación de energía y para el transporte humano, entre otros muchos usos, lo cual refleja que es vital, tanto para el funcionamiento de las sociedades modernas desarrolladas como para los países en desarrollo. Además, es fundamental para garantizar la integridad y sostenibilidad de los ecosistemas.

En la actualidad, la escasez de agua dulce en el planeta es una problemática causada principalmente por las pocas lluvias, producto del cambio climático; la sobreexplotación de los mantos acuíferos y la contaminación del medio natural. Los avances tecnológicos del último siglo han aumentado la actividad industrial, agrícola y turística en todo el mundo, particularmente en los países desarrollados, lo que ha permitido un incremento en la actividad económica, el nivel de desarrollo y la calidad de vida de sus pobladores, pero al mismo tiempo ha generado un grave impacto en el medio ambiente, especialmente sobre el agua.

Debido al uso excesivo que se hace de los recursos y los efectos que esto tiene a corto y largo plazos en el entorno, se han desarrollado estrategias y políticas orientadas a la protección del medioambiente, a la gestión sostenible y al uso racional del agua.

UNESCO (2003), en la primera evaluación de los recursos hídricos mundiales, declaró que en los últimos 50 años el consumo de agua se duplicó y la calidad de esta sigue empeorando. Cada día seis mil personas mueren por enfermedades diarreicas; la mayoría menores de cinco años. Esta situación hace indispensable la aplicación de mecanismos de pre-tratamiento y desinfección de ese recurso, así como tecnologías para su tratamiento. Estas deben ser eficientes, económicas y sencillas..

El agua destinada al consumo humano y a la preparación de alimentos debe estar exenta de microorganismos causantes de enfermedades y de sustancias minerales y orgánicas que puedan tener efectos fisiológicos perjudiciales. Ese líquido debe ser aceptable desde el punto de vista estético; es decir, debe estar libre de turbiedad, color y sabor perceptibles. La coagulación-floculación es uno de los procesos más importantes que participan en el tratamiento convencional del agua. Este es capaz de lograr la remoción de la turbiedad, mediante la aplicación de coagulantes que permitan la formación de flóculos que posteriormente son sedimentados.

Los coagulantes se pueden clasificar en inorgánicos, polímeros orgánicos sintéticos o ser de origen natural. Entre los más utilizados para el tratamiento de agua se encuentran el sulfato de aluminio, las sales férricas y los polímeros sintéticos orgánicos.

Algunos informes relacionan la presencia de aluminio residual en el agua potable con varias enfermedades, y existe un interés global por investigar coagulantes sustitutos de los actuales que sean más seguros para el ser humano. En los últimos años se ha prestado mayor atención a la relación teórica entre la exposición del aluminio y la incidencia de la enfermedad de Alzheimer. Las evidencias corrientes no implican al aluminio como la primera causa de este mal.

Existe, sin embargo, un debate en la comunidad científica sobre si este elemento participa activamente en la progresión de la enfermedad. Gran cantidad de estudios epidemiológicos han reportado un incremento incidente de Alzheimer en comunidades donde el agua potable es alta en aluminio (Terán y Valdés 2011). Otros estudios desarrollados en varios países informan que el aluminio que permanece en el agua después de la coagulación puede incidir en el mal de Alzheimer o en el deterioro cognitivo (Flaten 2001).

De acuerdo con la OMS (2006), el nivel máximo permitido de turbiedad del agua para ser consumida es de cinco unidades nefelométricas (UNT). Las enfermedades diarreicas, relacionadas con el consumo de agua y alimentos contaminados con bacterias, son una de las dos principales causas de mortalidad infantil en el mundo y por las que cada día mueren más de 5,500 niñas y niños (UNICEF 2012).

Estos resultados han propiciado el desarrollo de tecnologías amigables con el medio ambiente, que sean de bajo costo e inocuas para la salud humana, dirigiendo el interés hacia los coagulantes naturales, los cuales pueden reemplazar a los sintéticos en tratamiento de aguas. Este tipo de coagulantes alternativos pueden tener rendimientos similares e incluso superiores a los de origen sintético, además del valor agregado que proporciona su aporte en la biodegradabilidad de su composición.

Esta investigación pretende validar los efectos de la semilla de tamarindo (*Tamarindus indica*) como coagulante orgánico en aguas destinadas al consumo humano y analizar hasta qué porcentaje puede sustituir este al sulfato de aluminio en la dosis óptima para diferentes valores de turbiedad y color, así como el análisis de la factibilidad técnica y económica del uso del almidón.

1. MARCO TEÓRICO

1.1. Proceso de coagulación-floculación del agua

1.1.1. La necesidad de la coagulación- floculación

Los tratamientos para la purificación del agua superficial son de gran importancia para el adecuado funcionamiento de las sociedades, ya que de ello depende la calidad de ese líquido para consumo humano, doméstico y sus diferentes usos.

Guerrero (1979) afirma que 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, como se cita en Solís Silvan et al. (2012). En el proceso de potabilización del agua, 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 es necesario utilizar agentes coagulantes, así como coadyuvantes de coagulación que permitan eliminar un porcentaje significativo de las partículas en suspensión (típicamente entre 80 y 90 %) (Solís Silvan et al. 2012).

La turbiedad y el color del agua se deben principalmente a partículas muy pequeñas llamadas coloidales. Estas permanecen en suspensión en el agua por tiempo prolongado y pueden atravesar un medio filtrante muy fino (Cárdenas 2000). La turbiedad es una característica del agua debida a la presencia de partículas suspendidas cuyo tamaño varía desde suspensiones groseras hasta coloides. La presencia de esas partículas provoca la dispersión y absorción de la luz, lo que da una apariencia turbia, estéticamente indeseable y potencialmente peligrosa (Sáenz y Sepúlveda 1993).

Para eliminar estas partículas se recurre a los procesos de coagulación y floculación. La coagulación tiene por objeto desestabilizar las partículas en suspensión; es decir, facilitar su aglomeración. En la práctica este procedimiento se caracteriza por la inyección y dispersión rápida de productos químicos. La floculación tiene por objetivo favorecer, con la ayuda de la mezcla lenta, el contacto entre las partículas desestabilizadas. Estas partículas se aglutinan para formar un floc que pueda ser fácilmente eliminado por los procedimientos de decantación y filtración. Es muy importante que los procedimientos de coagulación y floculación sean utilizados correctamente, ya que la producción de un floc muy pequeño o muy ligero produce una decantación insuficiente, mientras que el agua que llega a los filtros contiene gran cantidad de partículas de floc que rápidamente ensucian los filtros y es necesario lavarlos con frecuencia. Por otro lado, cuando el floc es frágil, se rompe en pequeñas partículas que pueden atravesar el filtro y alterar la calidad del agua producida (Cárdenas 2000).

Las aguas superficiales pueden contener gran variedad de materias. El tamaño de las partículas de estas materias y su naturaleza determinan los tipos de tratamiento dentro de las plantas de agua.

Las partículas muy grandes, como los detritus orgánicos, algas protozoarios, grava, arena, limo, etc., así como los bichos en la materia en suspensión del tamaño de 10 micrómetros a 10 mm y más se pueden eliminar con los tratamientos de separación física, que conlleva aproximadamente los siguientes:

Tabla I. Separación de partículas

Tamaño de la partícula	Tipo de proceso
10 a 100 mm	Separados por medio de los sistemas de rejillas
0.2 a 10 mm	Separados por desarenación, sedimentación, decantación y
0.01 a 0.1 mm	Separados por filtración (macro y

Fuentes: Cárdenas, Yolanda. Tratamiento de agua coagulación y floculación

Dorea (2006) plantea como alternativa que los países en vías de desarrollo han adaptado una serie de tecnologías tradicionales para eliminar la turbiedad del agua en el ámbito doméstico. De ellas, la más estudiada es la utilización de extractos naturales de plantas para la clarificación del agua cruda (Ramirez y Jaramillo 2015). Los coagulantes naturales son sustancias solubles en agua, procedentes de materiales de origen vegetal o animal, que actúan de modo similar a los coagulantes sintéticos, aglomerando las partículas en suspensión que contiene el agua cruda, lo que facilita su sedimentación y reduce la turbidez inicial del líquido. Algunos de estos coagulantes poseen, además, propiedades antimicrobianas, por lo que reducen o eliminan el contenido de microorganismos patógenos susceptibles de producir enfermedades (GANJIDOUST et al. 1997).

1.2. Partículas en suspensión

Cárdenas (2000) establece que las partículas en suspensión de una fuente de agua superficial provienen de la erosión de suelos, de la disolución de sustancias minerales y de la descomposición de sustancias orgánicas. A este aporte natural se deben adicionar las descargas de desagües domésticos, industriales y agrícolas. En general, la turbiedad del agua es causada por las partículas de materias inorgánicas (arcillas, partículas de lo), en tanto que el color está formado por las partículas de materias orgánicas e hidróxidos de metal (hierro, por ejemplo).

Las partículas se clasifican de acuerdo a su tamaño. Así, las que tienen un diámetro inferior a 1 micrómetro, que corresponden a partículas de materias orgánicas o inorgánicas, se depositan muy lentamente. La tabla siguiente indica los tiempos de decantación de las diferentes partículas en función de sus dimensiones, densidad y la temperatura del agua.

Tabla II. **Tiempos de decantación según el tipo de partícula**

Tipo de partícula	Diámetro (mm)	Tiempo de caída	
		Densidad 2.65	Densidad 1.1
Grava	10	0.013	0.2 s.
Arena gruesa	1.0	s.	20.9
Arena fina	0.1	1.266	s.
Lodo fino	0.01	s.	34.83
Bacterias	0.001	126.66	min.
	0.0001	s.	58 h.
		3.52 h.	249.1

Fuentes: Cárdenas, Yolanda. Tratamiento de agua coagulación y floculación

Se observa fácilmente que a la misma densidad las partículas más pequeñas tienen un tiempo de duración de caída más grande, esto imposibilita la decantación sin la adición de un factor externo.

1.2.1. Coloides

Los coloides son suspensiones estables, por lo que es imposible su sedimentación natural; son sustancias responsables de la turbiedad y del color del agua. Los sistemas coloidales presentan una superficie de contacto inmensa entre la fase sólida y la líquida; por ejemplo, un cubo de 1 cm^3 tiene una superficie total de 6 cm^2 ; si está dividido en pequeños cubos elementales, la superficie total de todos aquellos es mucho más grande (Cárdenas 2000).

1.2.1.1. Clasificación de los coloides

En el tratamiento del agua es común referirse a los sistemas coloidales como hidrófobos o suspensores cuando repelen el agua, e hidrófilos o emulsores cuando presentan afinidad con ella. Obviamente, los coloides hidrófobos no la repelen completamente, pues una película del líquido es absorbida por ellos.

En los sistemas coloidales hidrófobos, las propiedades de la superficie de las partículas son muy importantes, principalmente en las aguas naturales, que pueden contener varios tipos de arcillas. Las arcillas y algunos óxidos metálicos son coloides hidrófobos muy importantes en el tratamiento del agua. Se caracterizan por ser termodinámicamente inestables respecto de la formación de grandes cristales no coloidales. Los coloides hidrofílicos comprenden soluciones verdaderas, ya sea de moléculas grandes o de agregados de moléculas pequeñas (llamados micelas), cuyas dimensiones están dentro de los límites coloidales.

Abarcan varios polímeros, tanto sintéticos como naturales, y numerosas sustancias de significación biológica como proteínas, ácidos nucleicos, almidones y otras macromoléculas. Las diferencias de opinión entre los investigadores sobre la naturaleza del color orgánico en el agua —solución verdadera o coloide— pueden resolverse si consideramos que el color orgánico es un coloide hidrofílico compuesto de moléculas grandes en solución. Las soluciones de coloides hidrofílicos y las de moléculas más pequeñas difieren únicamente en que, por su tamaño, las pequeñas o micelas tienen diferentes propiedades y suponen distintas técnicas de estudio (Arboleda 1972).

1.2.1.2. Estabilidad de los coloides

Las suspensiones coloidales están sujetas a ser estabilizadas y desestabilizadas. Entre las fuerzas de estabilización o repulsión podemos mencionar las siguientes:

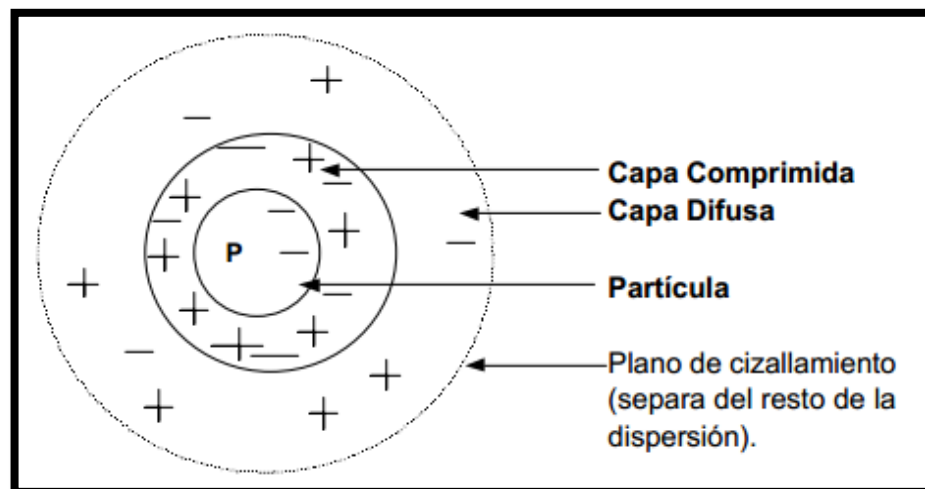
- a) La carga de las partículas.
- b) La hidratación, que generalmente es importante para los coloides hidrofílicos, aunque tienen menor importancia en este caso (CEPIS/OPS 2004).

La estabilidad puede ser considerada como la resistencia del coloide a dejarse remover por sedimentación o filtración. La estabilidad de los coloides depende de su tamaño y propiedades eléctricas, y está afectada por la naturaleza química del medio de dispersión (e.g. fuerza iónica, pH y contenido orgánico en el agua). Para remover los coloides es necesario que serán desestabilizados de algún modo (Sawyer, McCarty y Parkin 2001).

1.2.1.2.1. Carga eléctrica y doble capa

Dentro del agua superficial, las partículas coloidales son las causantes de la turbiedad y del color, por lo que el tratamiento de ese recurso está orientado a la remoción de estas partículas, las cuales poseen normalmente una carga eléctrica negativa en la superficie. Estas cargas, llamadas primarias, atraen los iones positivos del agua, que se adhieren fuertemente a las partículas y atraen a su alrededor iones negativos acompañados de una débil cantidad de iones positivos (fig. 1.) (Cárdenas 2000).

Figura 1. Doble capa de una partícula coloidal



Fuente: Manual de laboratorio –Coagulación-floculación–. Universidad de Castilla, La Mancha

Los iones que se adhieren fuertemente a la partícula y se desplazan con ella forman la capa adherida o comprimida, mientras que los que se adhieren débilmente constituyen la capa difusa; por lo tanto, hay un gradiente o potencial electrostático entre la superficie de la partícula y la solución, llamado potencial zeta (Cárdenas 2000).

1.2.1.2.2. Fuerzas de Van der Waals

Coto (2011) define que las fuerzas de Van der Waals son la principal fuerza atractiva entre las partículas coloidales. Son de origen eléctrico y de débil magnitud, en tanto que disminuyen rápidamente con la distancia; ocurren por la interacción de dipolos permanentes o inducidos en las partículas (Pompilio 2013).

1.2.1.2.3. Mecanismos de desestabilización de los coloides

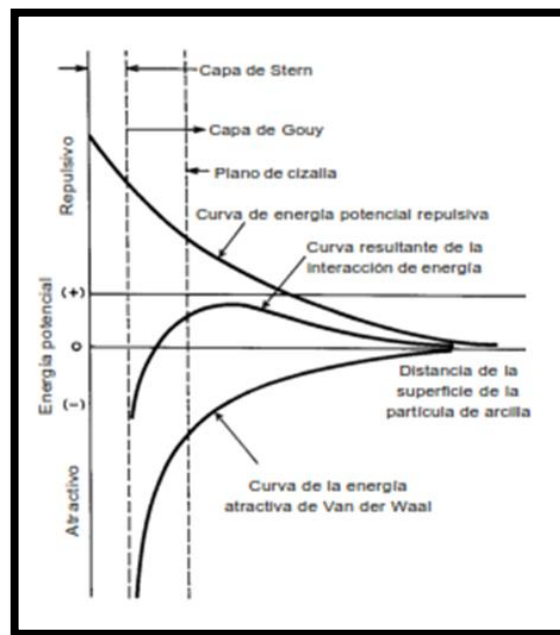
De acuerdo con el Manual sobre el tratamiento de agua para consumo humano (CEPIS/OPS 2004), existen cuatro mecanismos para describir la acción de los coagulantes en la remoción de las partículas coloidales.

- Compresión de capa difusa
- Adsorción y neutralización
- Barrido
- 4.) Adsorción y formación del puente

Compresión de la doble capa: este modelo físico de doble capa puede explicar el fenómeno de la desestabilización de un coloide por un coagulante, y la figura 2 ayuda a explicar el fenómeno de desestabilización: la curva de atracción de Van der Waals es fija, mientras que la de repulsión eléctrica disminuye si se incrementan en la solución los iones de carga opuesta.

En consecuencia, si se reduce el potencial repulsivo, decrece también la curva resultante de interacción. Por lo tanto, las partículas pueden acercarse suficientemente para ser desestabilizadas por la energía atractiva de Van der Waals.

Figura 2. **Energía potencial de interacción entre dos coloides**



Fuente: Manual I CEPIS/OPS (2004)

Destacan dos aspectos interesantes sobre ese mecanismo de coagulación:

a) La concentración del electrolito que causa la coagulación es prácticamente independiente de la concentración de coloides en el agua.

b) Es imposible causar la reestabilización de las partículas coloidales con la adición de mayores cantidades de electrolitos, debido a que ha ocurrido una reversión de la carga de estas, que pasa a ser positiva.

Adsorción y neutralización de la carga: la desestabilización de una dispersión coloidal consiste en las interacciones entre coagulante-coloides, coagulante-solvente y coloides-solvente. El efecto de adsorción y neutralización de la carga se encuentra estrechamente ligado al de compresión de la doble capa.

Captura en un precipitado de hidróxido metálico o captura por barrido: Cuando la dosis de un coagulante de sales metálicas en solución como el $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ y FeCl_3 excede el producto de solubilidad de sus hidróxidos metálicos como el $\text{Al}(\text{OH})_3$ y el $\text{Fe}(\text{OH})_3$, se produce una precipitación rápida de los hidróxidos gelatinosos que explica el fenómeno de remoción de turbiedad. En este caso, las partículas coloidales son envueltas por los precipitados y, como este mecanismo no depende de la neutralización de la carga de los coloides, la condición óptima de la coagulación puede no corresponder a aquella donde es mínimo el potencial zeta.

Adsorción y puente interparticular: la coagulación puede realizarse también usando una variedad significativa de compuestos orgánicos sintéticos y naturales caracterizados por grandes cadenas moleculares que gozan de la propiedad de presentar sitios ionizables a lo largo de la cadena y de actuar como coagulantes.

Los polímeros pueden ser clasificados como:

- Catiónicos: presentan sitios ionizables positivos
- Aniónicos: presentan sitios ionizables negativos
- No iónicos: no presentan sitios ionizables
- Anfóteros: presentan sitios ionizables positivos y negativos

1.2.2. Propiedades de los coloides

De acuerdo con Mendoza y Ibáñez (2006), las propiedades de los coloides son las siguientes:

1.2.2.1. Propiedades electrocinéticas

Electroforesis: es un fenómeno que permite demostrar que las partículas coloidales tienen carga eléctrica. Consiste en hacer pasar una corriente directa a través de una solución coloidal, experimento que permite observar que las partículas son atraídas por el electrodo positivo o por el negativo, lo que demuestra que poseen carga eléctrica. Este fenómeno es muy importante porque permite comprender la estabilidad de las dispersiones coloidales.

1.2.2.2. Propiedades cinéticas

Las cinéticas son las propiedades que definen el comportamiento de las partículas coloidales referidas a su movimiento en el agua.

Movimiento browniano: las partículas coloidales, dentro de la fase líquida, están sometidas a un bombardeo continuo por las moléculas del agua y la poca masa que poseen. Este bombardeo le imprime un movimiento constante y desordenado, denominado browniano, por lo que son desplazadas de un lugar a otro dentro de la solución, sin que lleguen a sedimentar. Su nombre proviene de su descubridor, el botánico escocés Robert Brown (1773-1858), quien observó por primera vez a través del microscopio este movimiento constante en las partículas provenientes del polen.

Es importante recordar que el movimiento browniano solo puede explicar la estabilidad de las dispersiones coloidales más pequeñas. Para tamaños de partículas mayores, los factores más importantes son las corrientes de convección termal y las velocidades bajas de sedimentación.

Difusión: debido al movimiento browniano, es decir el movimiento constante de las moléculas o partículas en el agua, las partículas coloidales tienden a dispersarse por todas partes en el sistema hídrico. A este fenómeno se le llama difusión.

Presión osmótica: la ósmosis es el flujo espontáneo que se produce cuando un disolvente (agua) atraviesa una membrana que la separa de un sistema coloidal (agua + coloides). Esta membrana es permeable al solvente pero no a los coloides; por tanto, ocurre una circulación natural de agua de la solución menos concentrada hacia la más concentrada para regular las concentraciones finales. A la presión hidrostática necesaria para detener el flujo osmótico, que alcanza así un estado de equilibrio, se le denomina osmótica.

1.2.2.3. Propiedades ópticas

Efecto Tyndall – Faraday: es un fenómeno por el cual las partículas coloidales provocan la dispersión de la luz cuando esta pasa a través de una suspensión coloidal. Esta dispersión es directamente proporcional al tamaño de las partículas. La determinación nefelométrica de la turbiedad utiliza el efecto de Tyndall-Faraday para su medición.

1.2.2.4. Propiedad de superficie

Adsorción: las partículas coloidales se caracterizan por tener una gran superficie específica, definida como la relación entre el área superficial y la masa. La propiedad de adsorción indica la capacidad de concentrar o retener componentes en la superficie del coloide, adsorbiendo inclusive iones que les confieren cargas positivas o negativas y, por tanto, no resulta práctico sedimentar las partículas coloidales sin tratamiento químico previo.

1.3. Polímeros

1.3.1. Definición de polímero

Un polímero puede definirse como una sustancia química compuesta de cierta cantidad de unidades básicas que se repiten, llamadas monómeros, unidas consecutivamente por enlaces covalentes. El grado de polimerización está dado por el número de monómeros que conforman la cadena polimérica, y puede variar en un amplio rango hasta llegar a 10^4 o 10^6 unidades en su estructura molecular. Un compuesto polimérico puede contener diversos tipos de unidades monoméricas en su cadena. La policondensación en la formación de los polímeros depende de la naturaleza de los grupos funcionales de las moléculas que interaccionan entre sí. Todos los monómeros capaces de formar polímeros deben tener por lo menos dos núcleos activos para que la nueva molécula formada conserve su configuración activa semejante a la original. Cuando las cadenas poliméricas tienen múltiples grupos funcionales iónicos, sean libres o esterificados, se les denomina polielectrolitos (Kirchmer, Arboleda y Castro 1975).

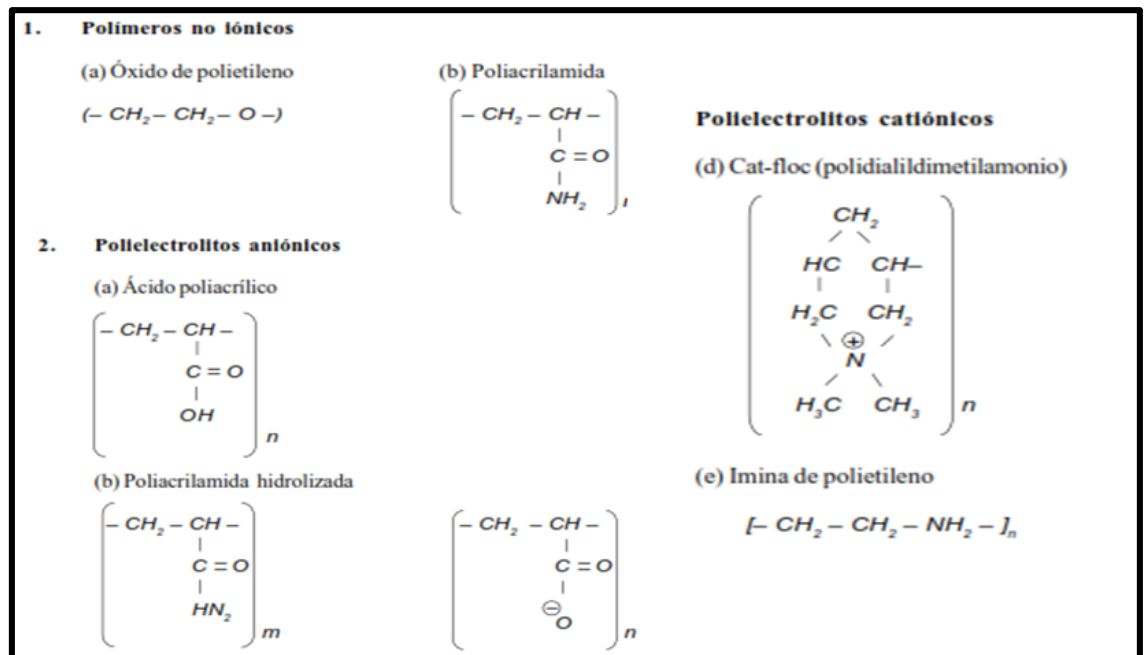
1.3.2. Clasificación de los polímeros

Los polímeros de importancia en el tratamiento del agua pueden clasificarse, según su carga, en aniónicos, catiónicos o no iónicos, y según su origen, en naturales o sintéticos (Kirchmer, Arboleda y Castro 1975).

1.3.2.1. De acuerdo con su carga eléctrica

Los polímeros pueden o no tener carga eléctrica. Los que no la tienen se denominan no iónicos, los demás pueden ser catiónicos (carga positiva) o aniónicos (carga negativa). La figura 3 muestra ejemplos de cada una de las clases de polímeros (Kirchmer, Arboleda y Castro 1975).

Figura 3. Clasificación y ejemplos de algunos polímeros



Fuente: Manual I CEPIS/OPS (2004)

1.3.2.2. De acuerdo con su origen

De acuerdo con su origen los polímeros pueden ser naturales o sintéticos, y tener características que los diferencian entre sí, las cuales se explican a continuación:

1.3.2.2.1. Polímeros naturales

Son aquellos que se producen debido a las reacciones bioquímicas naturales en animales y plantas. Son polímeros que muchas veces no tienen una sola composición química bien definida, pues están constituidos principalmente por varios tipos de polisacáridos (almidón, celulosa, glucósidos, etc.) y proteínas (caseína, olieratina, gelatina, etc.). Algunos de ellos tienen propiedades coagulantes o floculantes y en muchos lugares son usados en forma empírica por los nativos, para aclarar el agua turbia, con resultados satisfactorios, como en el caso del mucilago de la penca de la tuna (que se emplea en México y en la sierra del Perú) o de las semillas del nirmali (que se emplean en la India). Para el aprovechamiento de estos polímeros es necesario extraerlos o separarlos del resto de la materia prima (Kirchmer, Arboleda y Castro 1975).

En la siguiente tabla se presenta una lista de los polímeros naturales comúnmente utilizados para el tratamiento de agua.

Tabla III. **Polímeros naturales que tienen propiedades coagulantes o floculantes**

Nombre común	Parte de donde se extrae	Parte de donde se obtiene
Alginato de sodio	Algas pardas marinas	Toda la planta
Goma de tuna	Tuna o nopal	Hojas o pencas
Almidones solubles en agua fría	Maíz, papa, yuca, trigo	Grano o tubérculo
Goma de semillas de nirmali	Nirmali	Semillas
Pulpa de algarrobo	Algarrobo	Corteza del árbol
Gelatina común	Animales	Huesos y residuos de animales
Carboximetil celulosa	Árboles	Corteza del árbol
Goma de guar	Planta de guar	Semillas
Goma de red sorrela	“Red sorrela”	Semilla
Sílice activada	Silicato de sodio	Activación con un ácido
Lenteja	Planta	Semillas
Tamarindo	Árbol de fruto tropical	Semillas
Fenogreco, alholva	Planta con flor	Semillas

Fuente: Polímeros naturales y su aplicación como ayudantes de floculación (1975)

Para obtener un polímero natural existen varios métodos de extracción, aun cuando se trate de la misma especie de planta, grano o animal de donde se quiera extraer. Todos consisten, principalmente, en la extracción del polímero por medio de un álcali y la precipitación del mismo por medio ácido. Los pasos que se siguen para la obtención del polímero están en la disolución, filtración, refinación y aplicación del polímero (Mártinez 2015).

1.3.2.2. Polímeros sintéticos

Lo Sasso (1927) indica que los polímeros sintéticos son los compuestos orgánicos producidos mediante la transformación química del carbón y del petróleo e incluyen a la mayoría de los polímeros de manufactura industrial que comúnmente se expenden en el comercio (Kirchmer, Arboleda, & Castro, 1975).

Muchos se encuentran en forma de polvo seco, generalmente constituidos por poliacrilamida (no iónicos) o poliacrilamida hidrolizada (aniónicos). Los polímeros catiónicos son derivados de bases de amonio cuaternario o de imina de polietileno que generalmente se expenden en solución acuosa, en concentraciones del 10 al 60% (Kirchmer, Arboleda y Castro 1975). Los polímeros sintéticos pueden ser agrupados básicamente en dos grupos:

- Polímeros catiónicos coagulantes de bajo peso molecular
- Polímeros que actúan como floculantes, ayudantes de filtración y como ayuda para acondicionar los lodos con alto o muy alto peso molecular (Dentel et al. 1989).

La toxicidad de los polielectrolitos sintéticos debe investigarse y someterse a un exigente control de calidad, pues a veces los monómeros utilizados en la producción de polímeros son tóxicos. Debido a esto, algunos polímeros sintéticos no pueden usarse en el tratamiento de agua potable (Kirchmer, Arboleda y Castro 1975).

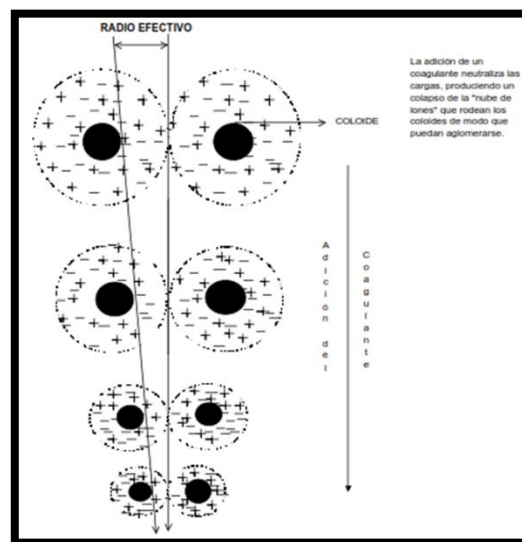
1.4. Coagulación

Es un proceso de desestabilización química de las partículas coloidales que se producen al neutralizar las fuerzas que los mantienen separados, por medio de la adición de los coagulantes químicos y la aplicación de la energía de mezclado.

En la siguiente figura se muestra cómo las sustancias químicas anulan las cargas eléctricas de la superficie del coloide, permitiendo que las partículas coloidales se aglomeren formando flóculos. La coagulación es el tratamiento más eficaz pero también el que representa un gasto elevado cuando no se hace correctamente. Es también el método universal porque elimina gran cantidad de sustancias de diversas naturalezas y de peso de materia que son desechadas al menor costo, en comparación con otros métodos (Cárdenas 2000).

El proceso de coagulación inadecuado también puede conducir a una degradación rápida de la calidad del agua y representa gastos de operación no justificados. Por lo tanto se considera que la dosis del coagulante condiciona el funcionamiento de las unidades de decantación y que es imposible efectuar una clarificación si la cantidad de coagulante está mal ajustada. En esta figura se muestra cómo las sustancias químicas anulan las cargas eléctricas sobre la superficie del coloide, permitiendo que las partículas coloidales se aglomeren formando flóculos (Cárdenas 2000).

Figura 4. **Proceso de coagulación**



Fuente: Tratamiento de agua: coagulación y floculación (2000)

1.4.1. Mecanismos de remoción de turbiedad

La turbiedad puede ser removida por adsorción química en los precipitados poliméricos de los productos de hidrólisis de los coagulantes, formándose una interacción entre estos y los grupos carboxílicos de las moléculas orgánicas que producen el color. Lo anterior es posible solo a pH altos. A pH bajos, los compuestos húmicos interaccionan con los compuestos de aluminio cargados positivamente para formar un precipitado de sulfato de aluminio. Cuando con el color está presente la turbiedad, la superficie de los coloides se incrementa y con esto se estimula la adsorción de las moléculas del color, lo que implica una menor dosis de coagulantes (Arboleda 2000).

La aplicación de una dosis creciente del coagulante al agua presenta diferentes zonas de coagulación, como se puede observar en la Fig. 5:

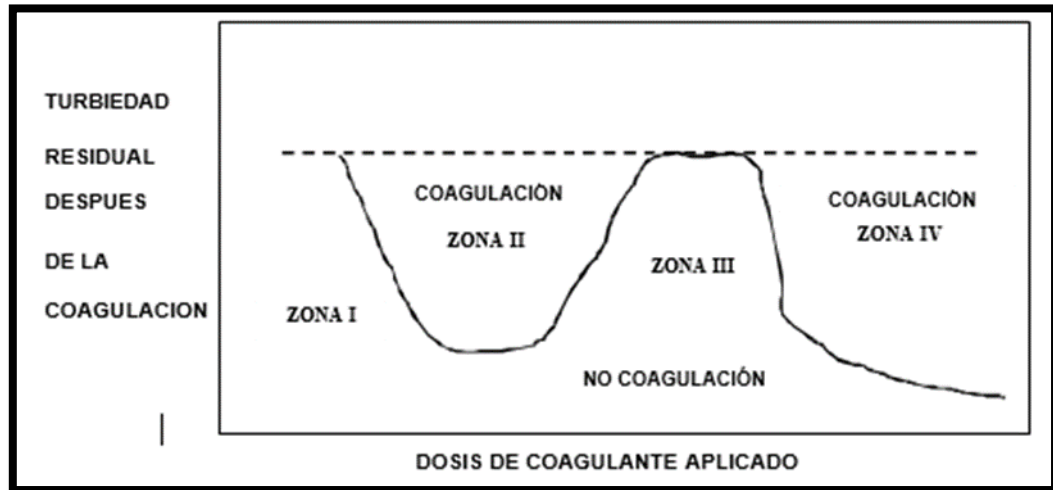
Zona 1. La dosis de coagulante no es suficiente para desestabilizar las partículas y por lo tanto no se produce coagulación.

Zona 2. Al incrementar la dosis de coagulantes se produce una rápida aglutinación de los coloides.

Zona 3. Si se sigue incrementando la dosis, llega un momento en que no se produce una buena coagulación, ya que los coloides se re-estabilizan.

Zona 4. Al aumentar aún más la dosis hasta producir una supersaturación, se produce de nuevo una rápida precipitación de los coagulantes, lo que tiene un efecto de barrido, arrastrando en su descenso las partículas que conforman la turbiedad (Cárdenas 2000).

Figura 5. **Diagrama de remoción de turbiedad**



Fuente: Tratamiento de agua: coagulación y floculación (2000)

1.4.2. **Mecánica del proceso de coagulación**

Arboleda (2000) indica que, normalmente, la floculación se analiza como un proceso causado por la colisión entre partículas. En ella intervienen, en forma secuencial, tres mecanismos de transporte:

- Floculación pericinética o browniana: se debe a la energía térmica del fluido.
- Floculación ortocinética o gradiente de velocidad: se produce en la masa del fluido en movimiento.
- Sedimentación diferencial: se debe a las partículas grandes, que al precipitarse colisionan contra las más pequeñas, que van descendiendo lentamente, y ambas se aglomeran.

Al dispersarse el coagulante en la masa de agua y desestabilizarse las partículas se precisa de la floculación pericinética para que las partículas coloidales cuyo tamaño es menor a un micrómetro empiecen a aglutinarse.

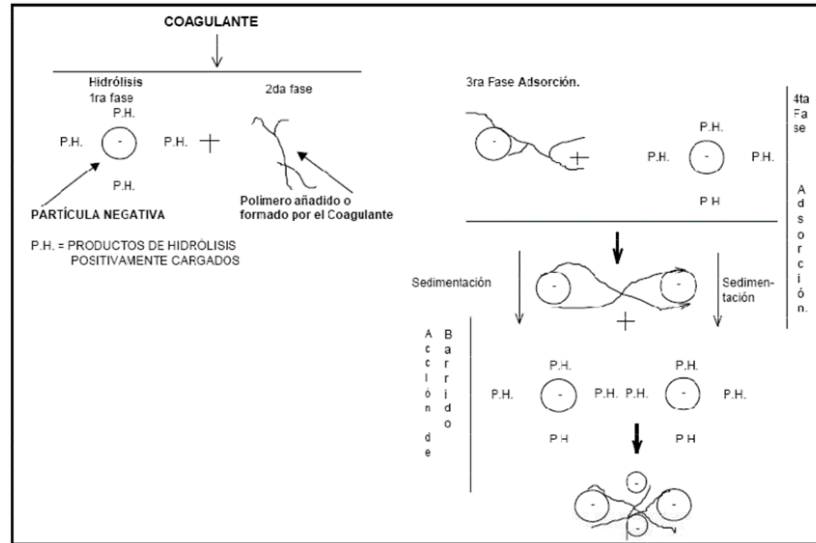
El movimiento browniano actúa en este rango de tamaño de partículas y forma el microflóculo inicial. Recién cuando este alcanza el tamaño de un micrómetro empieza a actuar la floculación ortocinética, promoviendo un desarrollo mayor del microflóculo. Este mecanismo ha sido estudiado en lugares donde la temperatura baja alrededor de cero grados, rango dentro del cual el movimiento browniano se anula y, por consiguiente, también lo hace la floculación pericinéctica. En este caso se comprobó que la floculación ortocinéctica es totalmente ineficiente y no tiene importancia alguna sobre partículas tan pequeñas.

1.4.3. Etapas de la coagulación

El proceso de coagulación se desarrolla en un tiempo muy corto (casi instantáneo), en el que se presentan las siguientes etapas. (Fig. 6):

- Hidrólisis de los coagulantes y desestabilización de las partículas en suspensión
- Formación de compuestos químicos poliméricos
- Adsorción de cadenas poliméricas por los coloides
- Adsorción mutua de coloides
- Acción de barrido (Cárdenas 2000)

Figura 6. Fases de la coagulación



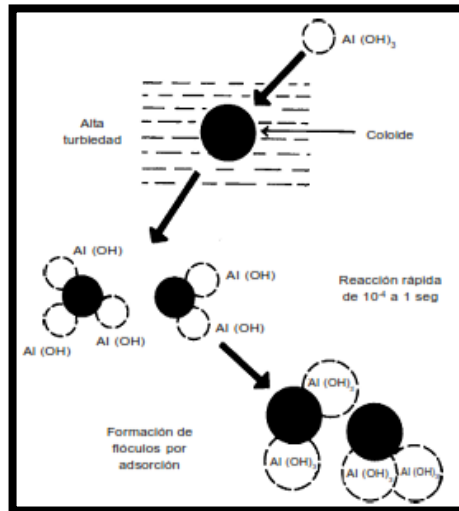
Fuente: Tratamiento de agua: coagulación y floculación (2000)

1.4.4. Mecanismos de coagulación

Se presentan dos tipos básicos de coagulación:

Coagulación por adsorción: cuando el agua presenta una alta concentración de partículas al estado coloidal. Cuando el coagulante es adicionado al agua turbia, los productos solubles de los coagulantes son absorbidos por los coloides y forman los floculos en forma casi instantánea.

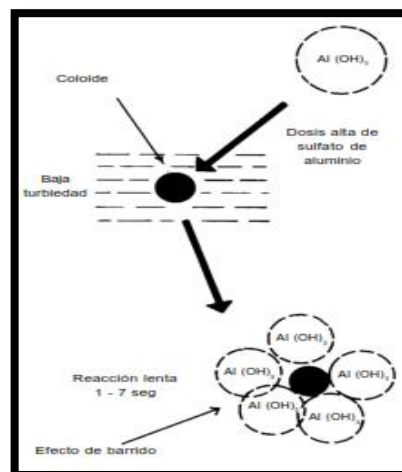
Figura 7. **Coagulación por adsorción**



Fuente: Manual I CEPIS/OPS (2004)

Coagulación por barrido: este tipo de coagulación se presenta cuando el agua es clara (es de baja turbiedad) y la cantidad de partículas coloides es pequeña. En este caso las partículas son entrampadas al producirse una sobresaturación de precipitado de sulfato de aluminio o cloruro férrico (Cárdenas 2000).

Figura 8. **Coagulación por barrido**



Fuente: Manual I CEPIS/OPS (2004)

1.4.5. Factores que afectan la coagulación

Es necesario tener en cuenta los siguientes factores, con la finalidad de optimizar el proceso de coagulación:

1.4.5.1. Influencia del pH

El pH es una medida de la actividad del ion hidrógeno en una solución y es igual a:

$$\text{pH} = -\log\{\text{H}^+\}$$

El pH es la variable más importante al momento de la coagulación. Para cada agua existe un rango de pH óptimo, para la cual la coagulación tiene lugar de manera rápida. Ello depende de la naturaleza de los iones y de la alcalinidad del agua. El rango de pH es función del tipo de coagulante que se utilice y de la naturaleza del agua por tratar. Si la coagulación se realiza fuera del rango de pH óptimo entonces se debe aumentar la cantidad del coagulante; por lo tanto, la dosis requerida es alta (Moscozo 2015).

1.4.5.2. Influencia de la temperatura del agua

La variación de 1°C en la temperatura del agua conduce a la formación de corrientes de densidad (variación de la densidad del agua) de diferentes grados que afectan a la energía cinética de las partículas en suspensión, por lo que la coagulación se hace más lenta. Temperaturas muy elevadas desfavorecen igualmente a la coagulación. Una disminución de la temperatura del agua en una unidad de decantación conlleva a un aumento de su viscosidad. Esto explica las dificultades de la sedimentación de un floc (Cárdenas 2000).

1.4.5.3. Influencia de la concentración del coagulante

La cantidad del coagulante a utilizar tiene influencia directa en la eficiencia de la coagulación, así:

- Poca cantidad del coagulante no neutraliza totalmente la carga de la partícula, la formación de los microfloculos es muy escasa y por lo tanto la turbiedad residual es elevada.
- Alta cantidad de coagulante produce la inversión de la carga de la partícula y conduce a la formación de gran cantidad de microfloculos muy pequeños, cuyas velocidades de sedimentación es muy baja; por lo tanto, la turbiedad residual es igualmente elevada.
- La selección del coagulante y la cantidad óptima de aplicación se determina mediante los ensayos de pruebas de jarra (Moscozo 2015).

1.4.5.4. Influencia de la mezcla

El grado de agitación que se da a la masa de agua durante la adición del coagulante, determina si la coagulación es completa; turbulencias desiguales hacen que cierta porción de agua tenga mayor concentración de coagulantes y la otra parte, poco o casi nada. La agitación debe ser uniforme e intensa en toda la masa de agua, para asegurar que la mezcla entre el agua y el coagulante haya sido adecuada y se haya producido la reacción química de neutralización de cargas correspondiente.

En el transcurso de la coagulación y floculación se procede a la mezcla de productos químicos en dos etapas. En la primera, la mezcla es enérgica y de corta duración (60 s, máx.), llamado mezcla rápida. Esta mezcla tiene por objeto dispersar la totalidad del coagulante dentro del volumen del agua por tratar. En la segunda etapa, la mezcla es lenta y tiene por objetivo desarrollar los microfloculos. La mezcla rápida se efectúa para la inyección de productos químicos en la zona de fuerte turbulencia, una inadecuada mezcla rápida conlleva a un incremento de productos químicos (Cárdenas 2000).

1.4.5.5. Influencia de la turbiedad

Turbiedad es una forma indirecta de medir la concentración de las partículas suspendidas en un líquido; mide el efecto de la dispersión que estas partículas presentan al paso de la luz y es función del número, tamaño y forma de partículas.

La turbiedad del agua superficial se debe, en gran parte, a partículas de lodos de sílice de diámetros que varían entre 0.2 a 5 μm . La coagulación de estas partículas es muy fácil cuando el pH se mantiene dentro del rango óptimo. La variación de la concentración de las partículas permite hacer las siguientes predicciones:

- Para cada turbiedad existe una cantidad de coagulante con el que se obtiene la turbiedad residual más baja, que corresponde a la dosis óptima.
- Cuando la turbiedad aumenta, no es mucha la cantidad de coagulante que se debe adicionar, debido a que la probabilidad de colisión entre las partículas es muy elevada, por lo que la coagulación se lleva a cabo con facilidad; por el

contrario, cuando la turbiedad es baja, la coagulación es difícil y la cantidad del coagulante es igual o mayor a la que se adiciona si la turbiedad es alta.

- Cuando la turbiedad es muy alta conviene hacer una presedimentación natural o forzada. En este caso, con el empleo de un polímero aniónico. (En la Planta de la Atarjea se realiza este último, en época de alta turbiedad).
- Es siempre más fácil coagular las aguas de baja turbiedad y las contaminadas por desagües domésticos industriales porque requieren más coagulante que los no contaminados (Cárdenas 2000).

1.5. Floculación

La floculación es el proceso que sigue a la coagulación y consiste en la agitación de la masa coagulada que sirve para permitir el crecimiento y aglomeración de los flóculos recién formados, con la finalidad de aumentar el tamaño y peso necesarios para sedimentar con facilidad. Estos flóculos, inicialmente pequeños, crean al juntarse aglomerados mayores que son capaces de sedimentar (Arboleda 2000).

La floculación es favorecida por el mezclado lento, que permite juntar poco a poco los flóculos. Un mezclado demasiado intenso los rompe y raramente se vuelven a formar en su tamaño y fuerza óptimos. La floculación no solo incrementa el tamaño de las partículas del flóculo, sino también aumenta su peso. La floculación se puede mejorar por la adición de un reactivo de floculación o ayudante de floculación (Cárdenas 2000).

1.5.1. Factores que influyen en la floculación

De acuerdo con el manual de CEPIS/OPS (2004), los principales factores que influyen en la eficiencia de este proceso son:

- La naturaleza del agua
- Las variaciones de caudal
- La intensidad de agitación
- El tiempo de floculación
- El número de compartimentos de la unidad

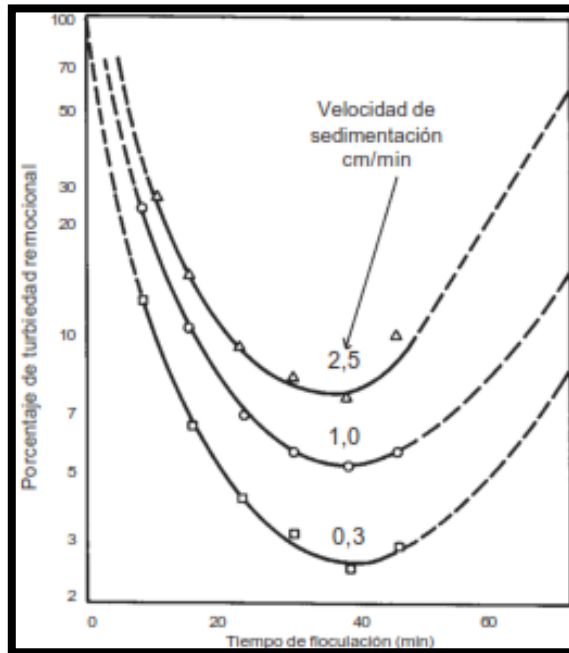
1.5.1.1. Naturaleza del agua

La coagulación y, por consiguiente, la floculación son extremadamente sensibles a las características fisicoquímicas del agua cruda, tales como la alcalinidad, el pH y la turbiedad. Algunos iones presentes en el agua pueden influir en el equilibrio fisicoquímico del sistema, en la generación de cadenas poliméricas de los hidróxidos que se forman o en la interacción de estos polímeros con las partículas coloidales, lo que afectará el tiempo de floculación.

1.5.1.2. Influencia del tiempo de floculación

En todos los modelos propuestos para la floculación, la velocidad de aglomeración de las partículas es proporcional al tiempo. Bajo determinadas condiciones existe un tiempo óptimo para la floculación, normalmente entre 20 y 40 minutos. Mediante ensayos de prueba de jarras (jaar tests) se puede determinar este tiempo, que, en la figura 9, resultó ser de alrededor de 37 minutos.

Figura 9. Efecto del periodo de floculación en la sedimentación



Fuente: Manual I CEPIS/OPS (2004)

1.5.1.3. Influencia del gradiente de velocidad

La resistencia de los flóculos depende de una serie de factores:

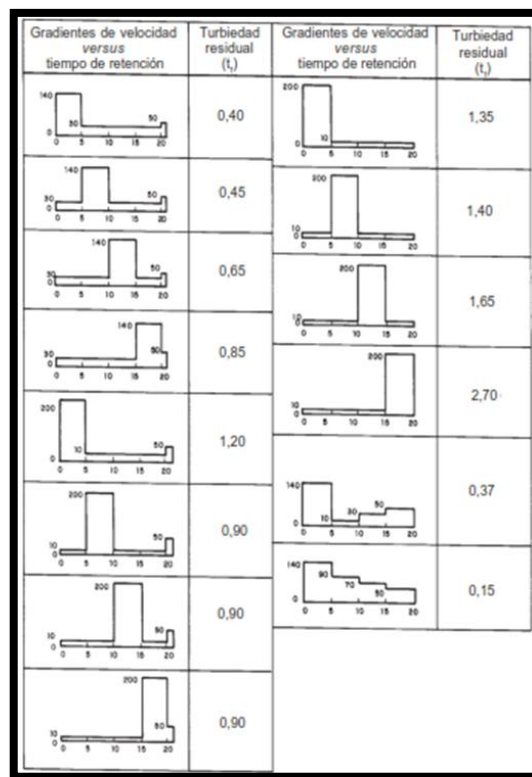
- De su tamaño, forma y compactación
- Del tamaño, forma y naturaleza de las micropartículas
- Del número y forma de los ligamentos que unen a las partículas

Los valores recomendados de gradientes de velocidad para floculación se encuentran dentro de un rango de 100 a 10 s⁻¹. Naturalmente, conviene realizar una compartimentalización con gradientes escalonados en forma decreciente.

1.5.1.4. Influencia de la variación del caudal

Es conocido que al variar el caudal de operación de la planta se modifican los tiempos de residencia y gradientes de velocidad en los reactores. El floculador hidráulico es algo flexible a estas variaciones. Al disminuir el caudal, aumenta el tiempo de retención y disminuye el gradiente de velocidad. Al aumentar el caudal, el tiempo de retención disminuye, el gradiente de velocidad se incrementa y viceversa. En el floculador mecánico, el efecto es más perjudicial, debido a su poca flexibilidad, ya que la velocidad permanece constante y el tiempo de residencia aumenta o disminuye de acuerdo con la variación del caudal.

Figura 10. Efecto de la variación del gradiente de velocidad en la turbiedad residual según TeKippe y Ham



Fuente: Manual I CEPIS/OPS (2004)

1.6. Coagulantes naturales

Diamadopolus (2009) establece que los agentes coagulantes y floculantes naturales, principalmente polisacáridos, son considerados ambientalmente amigables en comparación con los orgánicos e inorgánicos, debido a su biodegradabilidad. En la actualidad existe gran variedad de estudios relacionados con la aplicación de agentes vegetales para la remoción de sólidos suspendidos y coloidales para el tratamiento de agua potable y aguas residuales (Vidal, Laines y Hernández 2012).

A raíz de las consecuencias negativas que producen los coagulantes primarios sobre el ser humano y los ecosistemas, en los últimos años se buscan opciones limpias (con efecto nocivo mínimo) y económicas, con las que se puedan sustituir las sustancias tradicionalmente empleadas en la potabilización del agua. Entre los coagulantes naturales que se estudian en la actualidad están las semillas de tamarindo (*Tamarindus indica*), morango (*Moringa oleífera*), nirmali (*Strychnos potarum*), planta de guar (*Cyamopsis psoraloides*), planta de sorela roja (*Hibiscus sabdariffa*), fenogreco (*Trigonella foenum*) y las lentejas (*Lens esculenta*), y entre los polímeros se encuentra el quitosano (Gurdián, Coto y Salgado 2009).

Otro coagulante comúnmente utilizado para el tratamiento de aguas es la moringa oleífera. El árbol de moringa oleífera produce semillas con contenidos elevados de proteínas solubles en agua de bajo peso y carga positiva que actúan como los polímeros sintéticos utilizados en la industria para el tratamiento de aguas, los resultados de la eficiencia de las semillas de *Moringa stenopetala* y de la oleífera demostraron que ambas semillas son efectivas en la remoción de turbiedad en aguas con altas turbiedades (Sutherland, Folkard y Grant 1990).

De acuerdo con Ndabigengesere, Narasiah y Talbot (1995) los coagulantes derivados de moringa oleífera ofrecen excelentes ventajas a los coagulantes convencionales, tales como $Al_2(SO_4)_3$.

- La acción de coagulante de la semilla no tiene ninguna influencia en los niveles de pH
- La alcalinidad natural del agua no se ve afectada con la coagulación que ejerce la semilla en el agua
- La producción del lodo se reduce y se puede convertir en un acondicionador en los suelos, al carecer de residuos de metales

1.6.1. Almidones

Méndez (2010) define que el almidón es un compuesto que se encuentra en raíces, tubérculos, frutas y semillas de las plantas. Es un polisacárido sintetizado a partir del dióxido de carbono que toman las plantas de la atmósfera y del agua que absorben del suelo, formada por una mezcla de dos sustancias: la amilasa y la amilopectina, las cuales solo difieren en su estructura (Vidal, Laines y Hernández 2012).

Los almidones pueden obtenerse de una variedad grande de productos vegetales como la papa, el maíz, la yuca y el trigo, y su composición varía según el caso. Los granos de almidón se hinchan en presencia de agua caliente y forman una masa gelatinosa llamada engrudo. La temperatura de formación de engrudos varía, según el caso, entre 55.y 80 °C (Kirchmer, Arboleda y Castro 1975).

1.6.1.1. Aplicación de almidones como agentes floculantes

Los polímeros naturales, tales como almidón, quitosán y celulosa, han sido investigados como una alternativa atractiva en los procesos de coagulación-floculación para la remoción de partículas suspendidas y coloidales, y una de las ventajas que presentan es que dichos polímeros naturales y sus derivados son biodegradables; asimismo, su degradación intermedia es inofensiva para el ser humano y el ambiente (Vidal, Laines y Hernández 2012).

1.6.2. Semillas de tamarindo como coagulante

La semilla de tamarindo se encuentra en el fruto que produce el árbol del mismo nombre, el cual pertenece a la familia Leguminosae y a la subfamilia Caesalpinioideae. Su nombre científico es *Tamarindus indica L.* Es un árbol tropical de tamaño mediano (hasta 12 m de altura), con un diámetro promedio de 0.50 m. Tiene una copa redondeada, grande, extendida y abierta, con una cobertura de 6 a 10 m. La composición química de la semilla de tamarindo está compuesta, en su mayoría, por carbohidratos (57.1%), proteína (13.3%) y agua (11.3 %), como muestra la tabla XX. Las proteínas, a su vez, se componen sobre todo de ácido glutámico y aspártico, glicina y leucina (Gurdián, Coto y Salgado 2009).

El árbol del tamarindo tiene en su composición varias sales minerales, vitaminas y sustancias beneficiosas para la salud. El fruto del tamarindo está constituido por varias sustancias azucaradas, las cuales se encuentran en un 20% y 30% del fruto. Por otra parte, cerca de un 18% del tamarindo corresponde a ácidos orgánicos, entre los cuales destaca el ácido tartárico, málico y ascórbico.

Alrededor del 25% del total del fruto del tamarindo es agua. Además, el tamarindo es rico en sales minerales, entre las que sobresalen las de potasio, hierro y fósforo. Este fruto tiene propiedades medicinales, una de ellas es la de ser diurético, debido a su alto contenido de potasio y agua. El tamarindo posee gran cantidad de fibras, las cuales favorecen los procesos digestivos. Alrededor del 8% del fruto corresponde a fibra, y de esta cantidad, cerca del 50% es fibra insoluble («Composición del tamarindo» 2016).

Tabla IV **Composición química de la semilla de tamarindo (en base seca)**

Componente		Promedio (%)
Agua		11.3
Grasa		5.4
Carbohidratos		57.1
Ceniza		4.1
Fibra cruda		8.8
Proteína		13.3
Aminoácidos contenidos en el 13.3% de proteína	Ácido glutámico	18.0
	Ácido aspártico	11.6
	Glicina	9.1
	Leucina	8.2
	Metionina, treonina, valina, cisteína, entre otros	53.1

Fuente: (Vasquez, Batis y Alcocer 1999)

2. METODOLOGÍA

2.1. Materiales

A continuación se describen las características técnicas de los materiales empleados en la fase experimental

2.1.1. Obtención del coagulante tamarindo (*Tamarindus indica*)

Inicialmente las semillas fueron adquiridas en un mercado local, para luego obtener la parte coagulante.

Los pasos para la extracción de la parte coagulante de la semilla de tamarindo (*Tamarindus indica*) fueron los siguientes:

- Se separaron las semillas de tamarindo de la pulpa y la cáscara, ya que esta última puede agregar materia orgánica.
- Las semillas fueron sometidas a hidratación por aproximadamente dos días.
- Se colocaron en un recipiente con agua hirviendo por unos 40 minutos, con el fin de retirar la membrana que cubre la semilla
- Se retiró la membrana que cubre la semilla para obtener el cotiledón.
- Se trituraron los cotiledones con la ayuda de un procesador, hasta obtener un polvo blanquecino.
- Una vez en el laboratorio se pesaron cinco gramos del polvo obtenido y se colocaron en un vaso de precipitar que contenía 100 ml de agua destilada. Se calentó hasta alcanzar los 65°C y se dejó reposar a temperatura ambiente.

- La suspensión coagulante se extrajo del sobrenadante de la parte viscosa de la mezcla.

Esta suspensión coagulante fue posteriormente colocada en jeringas de acuerdo con diferentes dosis para proceder a la fase experimental.

2.1.2. Obtención del agua empleada para el estudio

El agua por utilizar en esta investigación se tomó del grifo del Laboratorio Unificado de Química y Microbiología Sanitaria “Dra. Alba Tabarini Molina”, a la cual se le agregaron diferentes dosis de caolín, para obtener los valores de turbiedad y color deseados. Para ello se hizo una serie de pruebas de manera aleatoria con diferentes pesos de caolín, en un recipiente con seis litros del agua de grifo.

Estos fueron los pasos para la obtención del agua sintética para obtener las turbiedades requeridas:

- Se pesaron los gramos de caolín en una balanza digital.
- Se colocaron seis litros de agua de grifo en un recipiente.
- Se agregó el caolín al agua y se mezcló por aproximadamente cinco minutos hasta obtener una mezcla homogénea.
- Se tomó una muestra del agua preparada y se midieron la turbiedad y el color.

2.2. Método

2.2.1. Preparación de la prueba de jarras

La prueba de jarras es el método experimental más ampliamente utilizado para la simulación del proceso coagulación-floculación. La prueba de jarras desarrollada en esta investigación corresponde a lo establecido en la Norma ASTM D 2035-08 Standard Practice for Coagulation-Flocculation Jar Test of Water. Se utilizó un aparato convencional de prueba de jarras como se muestra en la figura 11.

Figura 11 **Aparato de prueba de jarra convencional para el tratamiento de agua**



Fuente: Tania Álvarez 2016

Para la preparación de la prueba de jarras se siguieron estos pasos:

- Se distribuyó el agua preparada en las seis jarras de un litro cada una.
- Se ajustó la velocidad de las paletas a 100 revoluciones por minuto para efectuar la mezcla rápida.

- Se dosificó el coagulante, con un tiempo de mezcla rápida de un minuto.
- Se ajustó la velocidad de las paletas a 30 revoluciones por minuto para simular la mezcla lenta, por 20 minutos.
- Se simuló la fase de sedimentación del floc en un tiempo de 30 minutos.
- Se tomaron las muestras para medir la turbiedad y color residual. La turbiedad residual se midió con un turbidímetro y, por lo tanto, las unidades de turbiedad han sido expresadas en unidades nefelométricas (UN). El color residual se midió con colorímetro en unidades de color (UC).

2.2.2. Preparación del sistema de filtración

Para el proceso de filtración se utilizó un filtro, una bomba de vacío, un embudo y un matraz para filtrar, como se muestra en la figura 12.

Figura 12 **Equipo de filtración**



Fuente: Tania Álvarez 2016

2.3. Fase experimental

Una vez preparado el coagulante orgánico a base de tamarindo (*Tamarindus indica*) y la solución de sulfato de aluminio al 1%, así como el agua sintética con los valores de turbiedad y color requeridos, se procedió con la fase experimental de la investigación.

2.3.1. Determinación de la dosis óptima con sulfato de aluminio

Para determinar la dosis óptima de sulfato de aluminio se preparó una solución madre de sulfato de aluminio al 1%. Esto quiere decir que en un litro de agua destilada se disolvieron 10 gramos de sulfato de aluminio. Igualmente se prepararon las muestras de agua a diferentes valores de turbiedad y color. Luego se siguió el proceso de la prueba de jarras, adicionando diferentes dosis de sulfato de aluminio, usando una inicial de 20 mg/L hasta 75mg/L, en incrementos de 5mg/L en cada jarra.

Los valores obtenidos de las dosis óptimas de sulfato de aluminio, en términos de turbiedad y color, se muestran en las tablas 5 y 6:

Tabla V Dosis óptima de sulfato de aluminio en relación con la turbiedad

Rangos de turbiedad (NTU)		Dosis en mg/L de sulfato de aluminio $Al_2(SO_4)_3$												Turbiedad final (NTU)
Rangos	To	20	25	30	35	40	45	50	55	60	65	70	75	
100-130	105	1.35	1.06	0.68	1.21	0.73	0.46							
	115	1.51	1.24	1.09	0.60	0.46	0.87							
	130	1.36	1.19	0.81	0.72	0.43	0.62							
200-231	205			1.44	1.03	0.85	0.69	0.82	0.82					
	220			2.24	2.40	2.06	1.75	0.94	0.77					
	231			1.45	1.67	1.09	0.83	0.72	0.68					
300-311	301					1.99	1.49	1.59	1.40	1.27	1.12			
	302					1.78	1.55	1.71	1.7	1.28	0.95			
	311					1.74	1.4	1.67	1.11	1.04	1.06			
400-499	401							1.76	1.28	1.44	1.11	1.00	1.09	
	408							1.81	1.76	1.36	1.25	1.26	1.15	
	421							2.62	1.86	1.66	1.13	1.15	1.01	

Fuente: Elaboración propia

Tabla VI Dosis óptima de sulfato de aluminio en relación con el color

Rangos de color (UC)		Dosis en mg/L de sulfato de aluminio $Al_2(SO_4)_3$												Color final (UC)
Rangos	Color	20	25	30	35	40	45	50	55	60	65	70	75	
100-130	139	5.0	3.0	1.0	2.0	1.0	1.0							
	149	7.0	6.0	6.0	1.0	1.0	1.0							
	163	2.0	2.0	1.0	1.0	1.0	1.0							
200-231	228			5.0	3.0	1.0	1.0	1.0	1.0					
	246			4.0	5.0	3.0	1.0	1.0	1.0					
	256			5.0	6.0	3.0	1.0	1.0	1.0					
300-311	322					7.0	6.0	6.0	6.0	4.0	3.0			
	323					7.0	6.0	7.0	7.0	4.0	2.0			
	331					7.0	6.0	6.0	4.0	2.0	2.0			
400-499	415							6.0	3.0	4.0	2.0	2.0	2.0	
	421							7.0	6.0	6.0	3.0	3.0	2.0	
	433							4.0	4.0	4.0	3.0	2.0	2.0	

Fuente: Elaboración propia

2.3.2. Determinación del número de muestras

Para la determinación del número de muestras de esta investigación, primero se debe responder la siguiente pregunta: ¿La reducción de turbiedad/color hasta llegar a cumplir con la norma es un evento aleatorio o producto del tratamiento con semilla de tamarindo (*Tamarindus indica*)?

El cálculo de muestras para esta investigación se basa en la prueba de distribución binomial, asumiendo un nivel de significancia de $\alpha = 0.01$, con un valor de la probabilidad de éxito del 50%.

$$H_0: \pi = 0.50$$

$$H_a: \pi > 0.50$$

Si se sabe que el tratamiento con la semilla de tamarindo (*Tamarindus indica*) debe tener un efecto positivo en la disminución de la turbiedad/color en la muestra a los rangos que la norma establece, esa posibilidad de éxito de entrada es mayor de 50%. Para fines del cálculo del número de muestras se puede asumir que esa probabilidad será, como mínimo, de 80% de éxito.

$$H_0: \pi = 0.80$$

$$H_a: \pi > 0.80$$

Por lo tanto, con una cantidad de muestras $n=24$ para $\alpha = 0.01$ y $\pi = 0.80$ es suficiente, esperando que el número de éxitos no sea mayor a 1. Cálculo con base en la prueba binomial (Nave 2016)

2.3.3. Combinación del $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ y la semilla de tamarindo (*Tamarindus indica*) para el tratamiento de agua

Después de las pruebas de dosis óptima con el sulfato de aluminio se efectuaron las de jarras; se combinaron estos dos compuestos, utilizando al $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ y la solución coagulante de la semilla de tamarindo (*Tamarindus indica*), sustituyendo el sulfato de aluminio con el coagulante orgánico en intervalos de 20%.

Por lo tanto, se tienen las siguientes combinaciones para determinar hasta qué porcentaje puede ser sustituido el sulfato de aluminio por coagulante a base de tamarindo (*Tamarindus indica*), cumpliendo con la normativa de límite máximo permisible establecida en la Norma NTG COGUANOR 29001 de Guatemala y el límite máximo admisible por la Norma Técnica de Calidad de Agua de Honduras para los parámetros de color y turbiedad.

Tabla VII **Combinaciones de sustitución de sulfato de aluminio con tamarindo (*Tamarindus indica*)**

Prueba	Porcentaje de $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$	Porcentaje de almidón de tamarindo (<i>Tamarindus indica</i>)
1	100 %	0 %
2	80 %	20 %
3	60 %	40 %
4	40 %	60 %
5	20 %	80 %
6	0 %	100 %

Fuente: Elaboración propia

2.3.4. Procedimiento de filtración

Luego de efectuar las pruebas de jarras con las diferentes combinaciones, utilizando sulfato de aluminio y la solución coagulante de la semilla de tamarindo (*Tamarindus indica*), las muestras de agua se filtraron, a través de una membrana, para simular el proceso de filtración y posteriormente medir los valores de turbiedad y color.

3. RESULTADOS

A continuación se describen los resultados del proceso de sustitución del sulfato de aluminio por la solución coagulante a base de la semilla de tamarindo (*Tamarindus indica*). Se desarrollaron 24 pruebas de jarras en total, a diferentes valores de turbiedad y color. Las cantidades del coagulante fueron dosificadas a partir de los 40mg/L hasta los 70mg/L, de acuerdo con las dosis óptimas previamente obtenidas. Los parámetros de turbiedad y el color se midieron antes y después del tratamiento y después de la filtración.

3.1. Rendimiento de la semilla de tamarindo (*Tamarindus indica*) como coagulante orgánico en la remoción de turbiedad y color

En las siguientes tablas se describen los resultados en la remoción de turbiedad y color luego de aplicar la semilla de tamarindo (*Tamarindus indica*) como coagulante al final del proceso coagulación-floculación y después del proceso de filtrado.

Tabla VIII **Turbiedad final del agua aplicando la semilla de tamarindo (Tamarindus indica) luego del proceso de coagulación-floculación**

Rangos	Caolín (g/lt)	Turbiedad inicial	Turbiedad después del proceso coagulación-floculación		
100-200	0.25	106	43.7	40 mg/L	Dosis de tamarindo (<i>Tamarindus indica</i>)
	0.36	120	44.1		
	0.40	139	7.9		
	0.48	148	40.9		
	0.45	163	51.6		
	0.40	187	79.2		
201-300	0.61	202	76.3	55 mg/L	
	0.66	221	83.1		
	0.68	230	76.7		
	0.75	250	91.4		
	0.80	270	75.2		
	0.85	289	101.0		
301-400	0.80	302	90.6	60 mg/L	
	0.85	317	83.10		
	0.95	359	169.6		
	1.00	372	120.0		
	1.05	385	97.8		
	1.07	398	147.0		
401-500	1.07	405	84.5	70 mg/L	
	1.10	419	98.30		
	1.12	433	154.0		
	1.15	450	137.0		
	1.20	476	177.0		
	1.28	492	167.0		

Fuente: Elaboración propia

Tabla IX **Turbiedad final del agua aplicando la semilla de tamarindo (*Tamarindus indica*) luego del proceso de filtración**

Rangos	Caolín (g/lt)	Turbiedad inicial	Turbiedad después del proceso de filtración		
100-200	0.25	106	0.92	40 mg/L	Dosis de tamarindo (<i>Tamarindus indica</i>)
	0.36	120	4.69		
	0.40	139	0.72		
	0.48	148	2.05		
	0.45	163	2.50		
	0.40	187	0.48		
201-300	0.61	202	0.60	55 mg/L	
	0.66	221	0.47		
	0.68	230	0.77		
	0.75	250	1.40		
	0.80	270	0.39		
	0.85	289	0.86		
301-400	0.80	302	1.18	60 mg/L	
	0.85	317	1.24		
	0.95	359	3.16		
	1.00	372	1.97		
	1.05	385	4.65		
	1.07	398	0.85		
401-500	1.07	405	2.85	70 mg/L	
	1.10	419	1.16		
	1.12	433	1.01		
	1.15	450	0.98		
	1.20	476	2.21		
	1.28	492	3.11		

Fuente: Elaboración propia

Tabla X **Color final del agua aplicando la semilla de tamarindo (*Tamarindus indica*) luego del proceso de coagulación-floculación**

Rangos	Caolín (g/lt)	Color inicial	Color después del proceso coagulación-floculación		
100-214	0.25	129	96.1	40 mg/L	Dosis de tamarindo (<i>Tamarindus indica</i>)
	0.36	142	98.5		
	0.40	161	18.2		
	0.48	179	97.0		
	0.45	183	100		
	0.40	214	144.7		
215-300	0.61	215	143.1	55 mg/L	
	0.66	229	152.0		
	0.68	259	149.8		
	0.75	275	157.4		
	0.80	286	136.3		
	0.85	298	176.9		
301-415	0.80	318	158.8	60 mg/L	
	0.85	325	148.2		
	0.95	376	193.9		
	1.00	388	182.4		
	1.05	400	167.1		
	1.07	412	197.9		
416-500	1.07	419	136.6	70 mg/L	
	1.10	432	157.1		
	1.12	445	197.2		
	1.15	460	185.6		
	1.20	485	207.2		
	1.28	500	200.5		

Fuente: Elaboración propia

Tabla XI **Color final del agua aplicando la semilla de tamarindo (*Tamarindus indica*) luego del proceso de filtración**

Rangos	Caolín (g/lt)	Color inicial	Color después del proceso de filtración		
100-214	0.25	129	0.6	40 mg/L	Dosis de tamarindo (<i>Tamarindus indica</i>)
	0.36	142	8.4		
	0.40	161	0.2		
	0.48	179	3.0		
	0.45	183	6.8		
	0.40	214	0.4		
215-300	0.61	215	1.6	55 mg/L	
	0.66	229	0.2		
	0.68	259	1.0		
	0.75	275	3.0		
	0.80	286	1.0		
	0.85	298	1.2		
301-415	0.80	318	3.5	60 mg/L	
	0.85	325	6.2		
	0.95	376	9.8		
	1.00	388	5.1		
	1.05	400	14.5		
	1.07	412	1.8		
416-500	1.07	419	8.3	70 mg/L	
	1.10	432	3.8		
	1.12	445	3.2		
	1.15	460	3.0		
	1.20	485	6.7		
	1.28	500	12.3		

Fuente: Elaboración propia

3.2. Combinación del $Al_2(SO_4)_3$ y la semilla de tamarindo (*Tamarindus indica*).

A continuación se describen los resultados del proceso de combinación del sulfato de aluminio y el coagulante a base de semilla de tamarindo (*Tamarindus indica*), para poder determinar el porcentaje de sustitución del sulfato de aluminio por el coagulante a base de semilla de tamarindo (*Tamarindus indica*).

Tabla XII Sustitución de sulfato de aluminio por almidón de tamarindo para turbiedad de 100 a 200 después del proceso coagulación-floculación

Turbiedad inicial	Porcentaje de almidón de tamarindo					
	0%	20.0%	40.0%	60.0%	80.0%	100.0%
	Valores de turbiedad después del proceso de coagulación-floculación					
120	1.28	3.71	20.5	39.5	46.6	44.1
163	1.4	3.6	22.9	45.5	57.6	51.6
148	2.5	1.9	20.2	35.3	44.7	40.9
139	0.9	1.2	5.1	26.0	46.2	7.9
106	0.6	0.9	1.6	5.6	29.9	43.7
187	0.8	1.5	3.1	9.4	42.6	79.2
Promedio	1.26	2.13	12.24	26.89	44.60	44.56
Desviación estándar	0.6825	1.2272	9.9274	16.3348	8.8956	22.8441

Fuente: Elaboración propia

Tabla XIII **Sustitución de sulfato de aluminio por almidón de tamarindo para turbiedad de 100 a 200 después de filtrado**

Turbiedad inicial	Porcentaje de almidón de tamarindo					
	0%	20.0%	40.0%	60.0%	80.0%	100.0%
	Valores de turbiedad después filtrar					
120	0.34	0.78	1.09	4.55	8.31	4.69
163	0.70	0.90	2.02	3.42	2.70	2.50
148	2.5	1.2	0.8	1.2	1.0	2.1
139	0.5	0.4	0.1	0.9	0.8	0.7
106	0.4	0.7	0.5	0.4	0.5	0.9
187	0.4	0.4	0.5	0.6	0.6	0.5
Promedio	0.81	0.72	0.83	1.85	2.34	1.89
Desviación estándar	0.8427	0.3233	0.6692	1.7150	3.0344	1.5831

Fuente: Elaboración propia

Tabla XIV **Sustitución de sulfato de aluminio por almidón de tamarindo para color de 100 a 214 después del proceso coagulación-floculación**

Color inicial	Porcentaje de almidón de tamarindo					
	0%	20.0%	40.0%	60.0%	80.0%	100.0%
	Valores de color después del proceso de coagulación-floculación					
142	4.6	3.6	56.3	93.7	114.4	98.5
183	4.7	7.6	53.6	97.2	105	100
179	3.0	3.3	57.1	104.0	99.9	97.0
161	1.0	1.0	10.9	53.8	103.6	18.2
129	1.0	0.9	2.4	12.5	64.8	96.1
214	1.0	2.5	7.0	21.5	84.5	144.7
Promedio	2.55	3.15	31.22	63.78	95.37	92.42
Desviación estándar	1.8019	2.4550	26.9435	40.3648	17.8651	40.9164

Fuente: Elaboración propia

Tabla XV **Sustitución de sulfato de aluminio por almidón de tamarindo para color de 100 a 214 después de filtrado**

Color inicial	Porcentaje de almidón de tamarindo					
	0%	20.0%	40.0%	60.0%	80.0%	100.0%
	Valores de color después filtrar					
142	1.0	1.0	6.0	10.8	13.8	8.4
183	1.0	2.0	3.0	7.1	5.9	6.8
179	2.8	1.6	1.0	1.9	1.4	3.0
161	4.9	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
129	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
214	0.8	1.0	0.5	0.3	1.0	0.4
Promedio	1.92	1.27	2.08	3.68	4.02	3.43
Desviación estándar	1.6400	0.4320	2.1075	4.2743	5.1654	3.3833

Fuente: Elaboración propia

Tabla XVI **Sustitución de sulfato de aluminio por almidón de tamarindo para turbiedad de 201 a 300 después del proceso coagulación-floculación**

Turbiedad inicial	Porcentaje de almidón de tamarindo					
	0%	20.0%	40.0%	60.0%	80.0%	100.0%
	Valores de turbiedad después del proceso de coagulación-floculación					
221	1.05	2.79	6.75	50.3	70.3	83.1
202	0.7	1.6	12.3	52.0	75.9	76.3
250	1.1	2.0	5.8	52.8	93.6	91.4
289	1.4	1.5	10.7	71.5	110.0	101.0
270	1.0	1.8	13.5	56.6	67.1	75.2
230	1.0	1.5	4.5	54.2	88.2	76.7
Promedio	1.03	1.86	8.92	56.23	84.18	83.95
Desviación estándar	0.2022	0.4929	3.7320	7.7750	16.2758	10.3400

Fuente: Elaboración propia

Tabla XVII **Sustitución de sulfato de aluminio por almidón de tamarindo para turbiedad de 201 a 300 después de filtrado**

Turbiedad inicial	Porcentaje de almidón de tamarindo					
	0%	20.0%	40.0%	60.0%	80.0%	100.0%
	Valores de turbiedad después filtrar					
221	0.372	0.354	0.75	0.57	0.904	0.473
202	0.5	0.5	0.9	0.4	0.9	0.6
250	0.4	0.4	0.6	1.0	1.9	1.4
289	0.3	0.3	0.2	0.4	0.7	0.9
270	0.4	0.4	0.4	0.6	0.6	0.4
230	0.5	0.9	1.6	0.9	1.8	0.8
Promedio	0.42	0.48	0.74	0.65	1.13	0.75
Desviación estándar	0.0998	0.2311	0.4771	0.2459	0.5538	0.3638

Fuente: Elaboración propia

Tabla XVIII **Sustitución de sulfato de aluminio por almidón de tamarindo para color de 215 a 300 después del proceso coagulación-floculación**

Color inicial	Porcentaje de almidón de tamarindo					
	0%	20.0%	40.0%	60.0%	80.0%	100.0%
	Valores de color después del proceso de coagulación-floculación					
229	1	3.7	14.4	116.1	139.1	152
215	1	1.0	27.8	117.2	140.6	143.1
275	1.0	2.1	12.1	112.6	160.8	157.4
298	1.5	1.6	26.6	145.4	178.0	176.9
286	1.0	2.5	28.5	114.6	124.2	136.3
259	1.0	1.8	9.8	124.3	158.5	149.8
Promedio	1.08	2.12	19.87	121.70	150.20	152.58
Desviación estándar	0.2041	0.9239	8.6528	12.2742	19.2118	13.9833

Fuente: Elaboración propia

Tabla XIX **Sustitución de sulfato de aluminio por almidón de tamarindo para color de 215 a 300 después de filtrado**

Color inicial	Porcentaje de almidón de tamarindo					
	0%	20.0%	40.0%	60.0%	80.0%	100.0%
	Valores de color después filtrar					
229	0.4	0.5	0.8	0.7	1	0.6
215	0.7	0.6	1	0.6	0.9	1.5
275	1.0	1.0	1.0	2.0	4.0	3.0
298	1.1	0.5	0.5	0.5	1.3	1.2
286	1.4	1.0	1.0	1.0	0.7	1.0
259	1.0	2.0	3.0	2.0	4.0	1.0
Promedio	0.88	0.85	1.13	1.05	2.08	1.42
Desviación estándar	0.2787	0.5958	0.9416	0.7396	1.4932	0.8305

Tabla XX **Sustitución de sulfato de aluminio por almidón de tamarindo para turbiedad de 301 a 400 después del proceso coagulación-floculación**

Turbiedad inicial	Porcentaje de almidón de tamarindo					
	0%	20.0%	40.0%	60.0%	80.0%	100.0%
	Valores de turbiedad después del proceso de coagulación-floculación					
317	1.3	2.4	44.6	108.0	139.0	83.1
302	1.0	2.7	90.2	15.1	114.0	90.6
359	1.2	2.3	13.0	99.0	150.0	169.6
385	0.9	1.8	13.0	90.9	147.0	97.8
372	1.4	1.4	1.5	27.3	33.3	120.0
398	0.8	2.2	7.6	72.7	141.0	147.0
Promedio	1.11	2.11	28.32	68.83	120.72	118.02
Desviación estándar	0.2254	0.4717	33.8000	38.8799	44.6784	34.3056

Fuente: Elaboración propia

Tabla XXI **Sustitución de sulfato de aluminio por almidón de tamarindo para turbiedad de 301 a 400 después de filtrar**

Turbiedad inicial	Porcentaje de almidón de tamarindo					
	0%	20.0%	40.0%	60.0%	80.0%	100.0%
	Valores de turbiedad después de filtrar					
317	0.2	0.5	0.3	0.3	0.2	1.2
302	0.7	1.3	1.1	0.6	0.9	1.2
359	1.1	0.8	0.8	1.1	1.6	3.2
385	0.6	0.5	0.5	0.7	2.2	4.7
372	1.3	0.5	0.7	0.6	1.1	2.0
398	0.7	0.4	0.5	0.4	2.2	0.8
Promedio	0.77	0.67	0.66	0.61	1.35	2.17
Desviación estándar	0.3959	0.3213	0.2870	0.2773	0.7811	1.4670

Fuente: Elaboración propia

Tabla XXII **Sustitución de sulfato de aluminio por almidón de tamarindo para color de 301 a 415 después del proceso coagulación-floculación**

Color inicial	Porcentaje de almidón de tamarindo					
	0%	20.0%	40.0%	60.0%	80.0%	100.0%
	Valores de color después del proceso de coagulación-floculación					
325	1.0	4.7	103.5	174.0	188.7	148.2
318	1.6	5.9	163.2	39.3	174.5	158.8
376	3.5	4.4	32.5	167.9	169.6	193.9
400	1.0	2.7	3.7	165.8	197.0	167.1
388	1.4	2.0	2.3	70.3	85.3	182.4
412	1.0	3.1	17.4	149.3	192.8	197.9
Promedio	1.58	3.80	53.77	127.77	167.98	174.72
Desviación estándar	0.9725	1.4505	65.3901	57.9434	41.8775	19.8947

Fuente: Elaboración propia

Tabla XXIII **Sustitución de sulfato de aluminio por almidón de tamarindo para color de 301 a 415 después de filtrar**

Color inicial	Porcentaje de almidón de tamarindo					
	0%	20.0%	40.0%	60.0%	80.0%	100.0%
	Valores de color después de filtrar					
325	6.9	2.3	1.3	4.5	2.2	6.2
318	1.0	3.4	2.0	1.0	2.0	3.5
376	1.1	2.2	0.9	2.1	3.8	9.8
400	2.6	0.5	0.4	1.1	6.7	14.5
388	2.6	0.6	0.4	1.1	6.7	14.5
412	1.2	1.0	1.0	1.0	6.1	1.8
Promedio	2.57	1.68	1.00	1.79	4.58	8.38
Desviación estándar	2.2474	1.1321	0.6033	1.3869	2.2013	5.4551

Fuente: Elaboración propia

Tabla XXIV **Sustitución de sulfato de aluminio por almidón de tamarindo para turbiedad de 401 a 500 después del proceso coagulación-floculación**

Turbiedad inicial	Porcentaje de almidón de tamarindo					
	0%	20.0%	40.0%	60.0%	80.0%	100.0%
	Valores de turbiedad después del proceso de coagulación-floculación					
419	0.712	1.2	6.67	55.2	116	98.3
450	0.65	1.42	9.46	65.70	166.00	137.00
476	0.6	1.5	7.8	79.0	169.0	177.0
405	0.6	1.1	7.6	58.3	121.0	84.5
433	1.0	1.5	8.1	91.0	147.0	154.0
492	0.7	3.7	70.8	129.0	181.0	167.0
Promedio	0.71	2.06	18.40	79.70	150.00	136.30
Desviación estándar	0.1583	1.7777	25.6857	27.6148	26.7731	37.5233

Fuente: Elaboración propia

Tabla XXV **Sustitución de sulfato de aluminio por almidón de tamarindo para turbiedad de 401 a 500 después de filtrar**

Turbiedad inicial	Porcentaje de almidón de tamarindo					
	0%	20.0%	40.0%	60.0%	80.0%	100.0%
	Valores de turbiedad después filtrar					
419	0.325	0.328	0.391	0.593	0.85	1.16
450	0.53	0.37	0.95	1.68	1.67	0.98
476	0.8	0.5	0.5	0.6	0.6	2.2
405	0.3	0.5	0.9	0.5	1.8	2.9
433	0.7	0.6	0.7	0.6	3.5	1.0
492	0.5	1.0	1.9	1.0	1.4	3.1
Promedio	0.52	0.54	0.88	0.83	1.64	1.89
Desviación estándar	0.1819	0.2613	0.5284	0.4546	1.0454	0.9649

Fuente: Elaboración propia

Tabla XXVI **Sustitución de sulfato de aluminio por almidón de tamarindo para color de 416 a 500 después del proceso coagulación-floculación**

Color inicial	Porcentaje de almidón de tamarindo					
	0%	20.0%	40.0%	60.0%	80.0%	100.0%
	Valores de color después del proceso de coagulación-floculación					
432	0.8	1.7	16.4	119	170.5	157.1
460	1.00	1.80	21.50	134.00	198.40	185.60
485	1.0	2.4	19.8	152.9	205.0	207.2
419	1.0	1.0	16.5	115.6	154.3	136.6
445	1.0	2.8	19.9	163.1	195.3	197.2
500	1.0	8.3	147.5	184.1	203.9	200.5
Promedio	0.97	3.00	40.27	144.78	187.90	180.70
Desviación estándar	0.0837	2.6691	52.5725	26.7578	20.7130	27.9010

Fuente: Elaboración propia

Tabla XXVII **Sustitución de sulfato de aluminio por almidón de tamarindo para color de 416 a 500 después de filtrar**

Color inicial	Porcentaje de almidón de tamarindo					
	0%	20.0%	40.0%	60.0%	80.0%	100.0%
	Valores de color después filtrar					
432	5.6	0.6	1.2	1.7	3.1	3.8
460	3.80	1.00	2.40	4.60	4.90	3.00
485	1.9	0.5	0.9	1.3	1.7	6.7
419	1.3	0.7	2.0	1.2	5.1	8.3
445	1.3	0.7	2.0	1.2	5.1	8.3
500	1.0	2.7	3.2	2.3	4.2	12.3
Promedio	2.48	1.03	1.95	2.05	4.02	7.07
Desviación estándar	1.8324	0.8335	0.8289	1.3187	1.3688	3.3992

Fuente: Elaboración propia

3.3. Eficiencia en la remoción de turbiedad y color utilizando la semilla de tamarindo (*Tamarindus indica*) para el tratamiento de agua

A continuación se describen los resultados de la eficiencia del uso de semilla de tamarindo (*Tamarindus indica*) en la remoción de turbiedad y color:

Tabla XXVIII Eficiencia en la remoción de turbiedad utilizando la semilla de tamarindo (*Tamarindus indica*) después del proceso de coagulación-floculación

Rangos de turbiedad		Porcentaje de eficiencia de remoción		
Rangos	To			
100-200	106	58.8	40 mg/L	Dosis de tamarindo (<i>Tamarindus indica</i>)
	120	63.3		
	139	94.3		
	148	72.4		
	163	68.3		
	187	57.6		
201-300	202	62.2	55 mg/L	
	221	62.4		
	230	66.7		
	250	63.4		
	270	72.1		
	289	65.1		
301-400	302	70.0	60 mg/L	
	317	73.8		
	359	52.8		
	372	67.7		
	385	74.6		
	398	63.1		
401-500	405	79.1	70 mg/L	
	419	76.5		
	433	64.4		
	450	69.6		
	476	62.8		
	492	66.1		

Fuente: Elaboración propia

Tabla XXIX Eficiencia en la remoción de turbiedad utilizando la semilla de tamarindo (*Tamarindus indica*) después del proceso de filtración

Rangos de turbiedad		Porcentaje de eficiencia de remoción		
Rangos	To			
100-200	106	99.1	40 mg/L	Dosis de tamarindo (<i>Tamarindus indica</i>)
	120	96.1		
	139	99.5		
	148	98.6		
	163	98.5		
	187	99.7		
201-300	202	99.7	55 mg/L	
	221	99.8		
	230	99.7		
	250	99.4		
	270	99.9		
	289	99.7		
301-400	302	99.6	60 mg/L	
	317	99.6		
	359	99.1		
	372	99.5		
	385	98.8		
	398	99.8		
401-500	405	99.3	70 mg/L	
	419	99.7		
	433	99.8		
	450	99.8		
	476	99.5		
	492	99.4		

Tabla XXX Eficiencia en la remoción de color utilizando la semilla de tamarindo (*Tamarindus indica*) después del proceso de coagulación-floculación

Rangos de color		Porcentaje de eficiencia de remoción		
Rangos	Co			
100-214	129	25.5	40 mg/L	Dosis de tamarindo (<i>Tamarindus indica</i>)
	142	30.6		
	161	88.7		
	179	45.8		
	183	45.4		
	214	32.4		
215-300	215	33.4	55 mg/L	
	229	33.6		
	259	42.2		
	275	42.8		
	286	52.3		
	298	40.6		
301-415	318	50.1	60 mg/L	
	325	54.4		
	376	48.4		
	388	53.0		
	400	58.2		
	412	52.0		
416-500	419	67.4	70 mg/L	
	432	63.6		
	445	55.7		
	460	59.7		
	485	57.3		
	500	59.9		

Fuente: Elaboración propia

Tabla XXXI **Eficiencia en la remoción de color utilizando la semilla de tamarindo (*Tamarindus indica*) después del proceso de filtración**

Rangos de color		Porcentaje de eficiencia de remoción		
Rangos	Co			
100-214	129	99.5	40 mg/L	Dosis de tamarindo (<i>Tamarindus indica</i>)
	142	94.1		
	161	99.9		
	179	98.3		
	183	96.3		
	214	99.8		
215-300	215	99.3	55 mg/L	
	229	99.7		
	259	99.6		
	275	98.9		
	286	99.7		
	298	99.6		
301-415	318	98.9	60 mg/L	
	325	98.1		
	376	97.4		
	388	98.7		
	400	96.4		
	412	99.6		
416-500	419	98.0	70 mg/L	
	432	99.1		
	445	99.3		
	460	99.3		
	485	98.6		
	500	97.5		

Fuente: Elaboración propia

3.4. Eficiencia en la remoción de turbiedad y color usando una combinación del $Al_2(SO_4)_3$ y la semilla de tamarindo (*Tamarindus indica*) para el tratamiento de agua.

A continuación se describen los resultados de la eficiencia del proceso de sustitución del sulfato de aluminio por almidón de tamarindo en la remoción de turbiedad y color después del proceso de coagulación-floculación y de filtración.

Tabla XXXII Porcentaje de eficiencia en la remoción de turbiedad para rangos entre 100-200 NTU

Turbiedad inicial	Porcentaje de eficiencia en la remoción de turbiedad después del proceso de coagulación-floculación					
120	98.93	96.91	82.92	67.08	61.17	63.25
163	99.13	97.80	85.95	72.09	64.66	68.34
148	98.30	98.69	86.35	76.15	69.80	72.36
139	99.33	99.15	96.33	81.29	66.76	94.33
106	99.42	99.15	98.49	94.70	71.79	58.77
187	99.57	99.22	98.34	94.96	77.22	57.65
Turbiedad inicial	Porcentaje de eficiencia en la remoción de turbiedad después del proceso de filtración					
120	99.72	99.35	99.09	96.21	93.08	96.09
163	99.57	99.45	98.76	97.90	98.34	98.47
148	98.30	99.19	99.45	99.18	99.30	98.61
139	99.66	99.74	99.92	99.34	99.40	99.48
106	99.62	99.33	99.57	99.62	99.53	99.13
187	99.77	99.81	99.72	99.68	99.66	99.74

Fuente: Elaboración propia

Tabla XXXIII **Porcentaje de eficiencia en la remoción de color para rangos entre 100-214 UC**

Color inicial	Porcentaje de eficiencia en la remoción de color después del proceso de coagulación-floculación					
142	96.76	97.46	60.35	34.01	19.44	30.63
183	97.43	95.85	70.71	46.89	42.62	45.36
179	98.32	98.16	68.10	41.90	44.19	45.81
161	99.38	99.38	93.23	66.58	35.65	88.70
129	99.22	99.30	98.14	90.31	49.77	25.50
214	99.53	98.83	96.73	89.95	60.51	32.38
Color inicial	Porcentaje de eficiencia en la remoción de color después del proceso de filtración					
142	99.30	99.30	95.77	92.39	90.28	94.08
183	99.45	98.91	98.36	96.12	96.78	96.28
179	98.44	99.11	99.44	98.94	99.22	98.32
161	96.96	99.38	99.38	99.38	99.38	99.38
129	99.22	99.22	99.22	99.22	99.22	99.22
214	99.63	99.53	99.77	99.86	99.53	99.81

Fuente: Elaboración propia

Tabla XXXIV **Porcentaje de eficiencia en la remoción de turbiedad para rangos entre 201-300 NTU**

Turbiedad inicial	Porcentaje de eficiencia en la remoción de turbiedad después del proceso de coagulación-floculación					
221	99.52	98.74	96.95	77.24	68.19	62.40
202	99.63	99.21	93.91	74.26	62.43	62.23
250	99.58	99.20	97.68	78.88	62.56	63.44
289	99.53	99.47	96.30	75.26	61.94	65.05
270	99.64	99.35	95.00	79.04	75.15	72.15
230	99.57	99.35	98.05	76.43	61.65	66.65
Turbiedad inicial	Porcentaje de eficiencia en la remoción de turbiedad después del proceso de filtración					
221	99.83	99.84	99.66	99.74	99.59	99.79
202	99.73	99.77	99.58	99.80	99.54	99.70
250	99.86	99.84	99.76	99.62	99.26	99.44
289	99.89	99.90	99.92	99.86	99.74	99.70
270	99.85	99.85	99.84	99.76	99.79	99.86
230	99.77	99.60	99.30	99.59	99.22	99.67

Fuente: Elaboración propia

Tabla XXXV

**Porcentaje de eficiencia en la remoción de color para
rangos entre 215-300 UC**

Color inicial	Porcentaje de eficiencia en la remoción de color después del proceso de coagulación-floculación					
229	99.56	98.38	93.71	49.30	39.26	33.62
215	99.53	99.53	87.07	45.49	34.60	33.44
275	99.64	99.24	95.60	59.05	41.53	42.76
298	99.50	99.46	91.07	51.21	40.27	40.64
286	99.65	99.13	90.03	59.93	56.57	52.34
259	99.61	99.31	96.22	52.01	38.80	42.16
Color inicial	Porcentaje de eficiencia en la remoción de color después del proceso de filtración					
229	99.83	99.78	99.65	99.69	99.56	99.74
215	99.67	99.72	99.53	99.72	99.58	99.30
275	99.64	99.64	99.64	99.27	98.55	98.91
298	99.63	99.83	99.83	99.83	99.56	99.60
286	99.51	99.65	99.65	99.65	99.76	99.65
259	99.61	99.23	98.84	99.23	98.46	99.61

Fuente: Elaboración propia

Tabla XXXVI

**Porcentaje de eficiencia en la remoción de turbiedad
para rangos entre 301-400 NTU**

Turbiedad inicial	Porcentaje de eficiencia en la remoción de turbiedad después del proceso de coagulación-floculación					
317	99.58	99.24	85.93	65.93	56.15	73.79
302	99.67	99.12	70.13	95.00	62.25	70.00
359	99.67	99.36	96.38	72.42	58.22	52.76
385	99.75	99.55	96.62	76.39	61.82	74.60
372	99.63	99.63	99.60	92.66	91.05	67.74
398	99.80	99.45	98.09	81.73	64.57	63.07
Turbiedad inicial	Porcentaje de eficiencia en la remoción de turbiedad después del proceso de filtración					
317	99.94	99.84	99.90	99.91	99.95	99.61
302	99.76	99.58	99.62	99.81	99.71	99.61
359	99.70	99.77	99.78	99.70	99.56	99.12
385	99.85	99.86	99.86	99.81	99.43	98.79
372	99.65	99.87	99.82	99.85	99.69	99.47
398	99.82	99.89	99.87	99.89	99.46	99.79

Fuente: Elaboración propia

Tabla XXXVII **Porcentaje de eficiencia en la remoción de color para rangos entre 301-415 UC**

Color inicial	Porcentaje de eficiencia en la remoción de color después del proceso de coagulación-floculación					
325	99.69	98.55	68.15	46.46	41.94	54.40
318	99.50	98.14	48.68	87.64	45.13	50.06
376	99.07	98.83	91.36	55.35	54.89	48.43
400	99.75	99.33	99.08	58.55	50.75	58.23
388	99.64	99.48	99.41	81.88	78.02	52.99
412	99.76	99.25	95.78	63.76	53.20	51.97
Color inicial	Porcentaje de eficiencia en la remoción de color después del proceso de filtración					
325	97.88	99.29	99.60	98.62	99.32	98.09
318	99.69	98.93	99.37	99.69	99.37	98.90
376	99.71	99.41	99.76	99.45	98.99	97.39
400	99.35	99.88	99.90	99.73	98.33	96.38
388	99.33	99.85	99.90	99.72	98.27	96.26
412	99.71	99.76	99.76	99.76	98.52	99.56

Fuente: Elaboración propia

Tabla XXXVIII **Porcentaje de eficiencia en la remoción de turbiedad para rangos entre 401-500 NTU**

Turbiedad inicial	Porcentaje de eficiencia en la remoción de turbiedad después del proceso de coagulación-floculación					
419	99.83	99.71	98.41	86.83	72.32	76.54
450	99.85	99.68	97.90	85.40	63.11	69.56
476	99.88	99.69	98.36	83.40	64.50	62.82
405	99.85	99.74	98.13	85.60	70.12	79.14
433	99.77	99.65	98.14	78.98	66.05	64.43
492	99.85	99.25	85.61	73.78	63.21	66.06
Turbiedad inicial	Porcentaje de eficiencia en la remoción de turbiedad después del proceso de filtración					
419	99.92	99.92	99.91	99.86	99.80	99.72
450	99.88	99.92	99.79	99.63	99.63	99.78
476	99.84	99.90	99.89	99.88	99.88	99.54
405	99.93	99.89	99.78	99.87	99.55	99.30
433	99.85	99.86	99.84	99.87	99.18	99.77
492	99.89	99.79	99.62	99.79	99.71	99.37

Fuente: Elaboración propia

Tabla XXXIX

**Porcentaje de eficiencia en la remoción de color para
rangos entre 416-500 UC**

Color inicial	Porcentaje de eficiencia en la remoción de color después del proceso de coagulación-floculación					
432	99.81	99.61	96.20	72.45	60.53	63.63
460	99.78	99.61	95.33	70.87	56.87	59.65
485	99.79	99.51	95.92	68.47	57.73	57.28
419	99.76	99.76	96.06	72.41	63.17	67.40
445	99.78	99.37	95.53	63.35	56.11	55.69
500	99.80	98.34	70.50	63.18	59.22	59.90
Color inicial	Porcentaje de eficiencia en la remoción de color después del proceso de filtración					
432	98.70	99.86	99.72	99.61	99.28	99.12
460	99.17	99.78	99.48	99.00	98.93	99.35
485	99.61	99.90	99.81	99.73	99.65	98.62
419	99.69	99.83	99.52	99.71	98.78	98.02
445	99.71	99.84	99.55	99.73	98.85	98.13
500	99.80	99.46	99.36	99.54	99.16	97.54

Fuente: Elaboración propia

3.5. Costos de coagulantes

A continuación se describen los costos del coagulante orgánico a base de semillas de tamarindo (*Tamarindus indica*) y del sulfato de aluminio por kilogramo, en lempiras y en quetzales.

Tabla XL

Comparación de costos de coagulantes

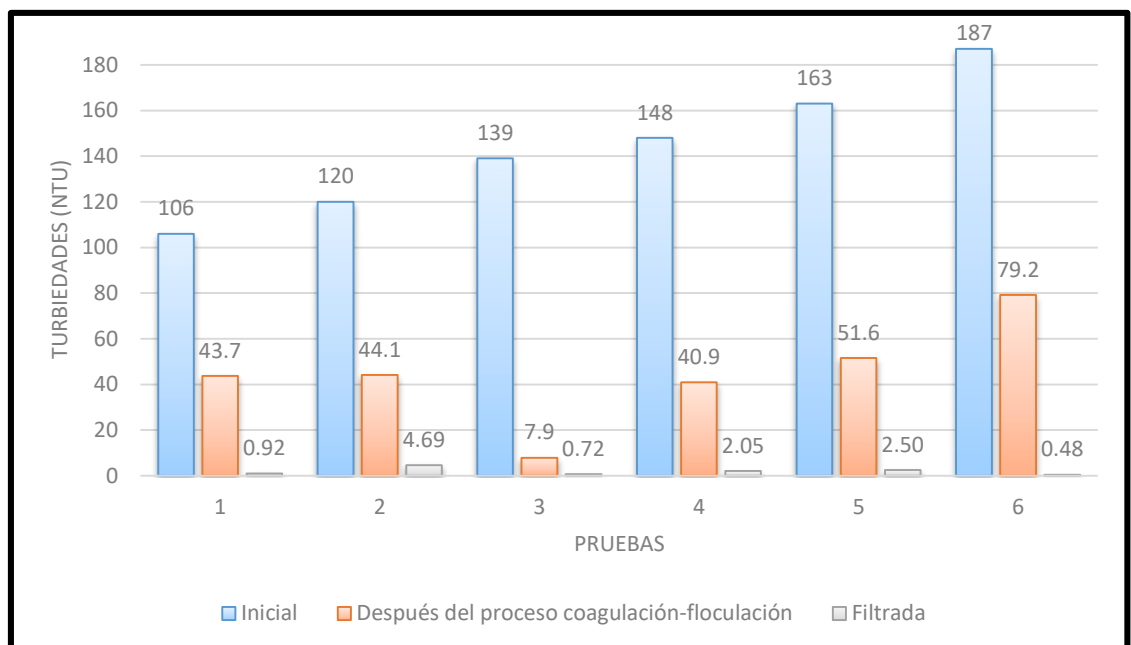
	Lempiras /kilogramo	Quetzales /kilogramo
Costo del tamarindo	7.70	13.20
Costo del sulfato de aluminio	13.26	6.00

4. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

4.1. Análisis de la efectividad de la semilla de tamarindo (*Tamarindus indica*) en la remoción de turbiedad.

Para el rango de turbiedades de 100-200 se obtuvo un promedio de 69.1% de remoción de turbiedad después del proceso de coagulación-floculación, donde el mejor resultado se alcanzó al reducir la turbiedad de 139 NTU a 7.9 NTU, como se muestra en la figura 13, con un porcentaje de remoción del 94.3%. (Ver tabla 28). Luego de la filtración se obtuvo un porcentaje promedio de remoción de 98.6% (Ver tabla 29).

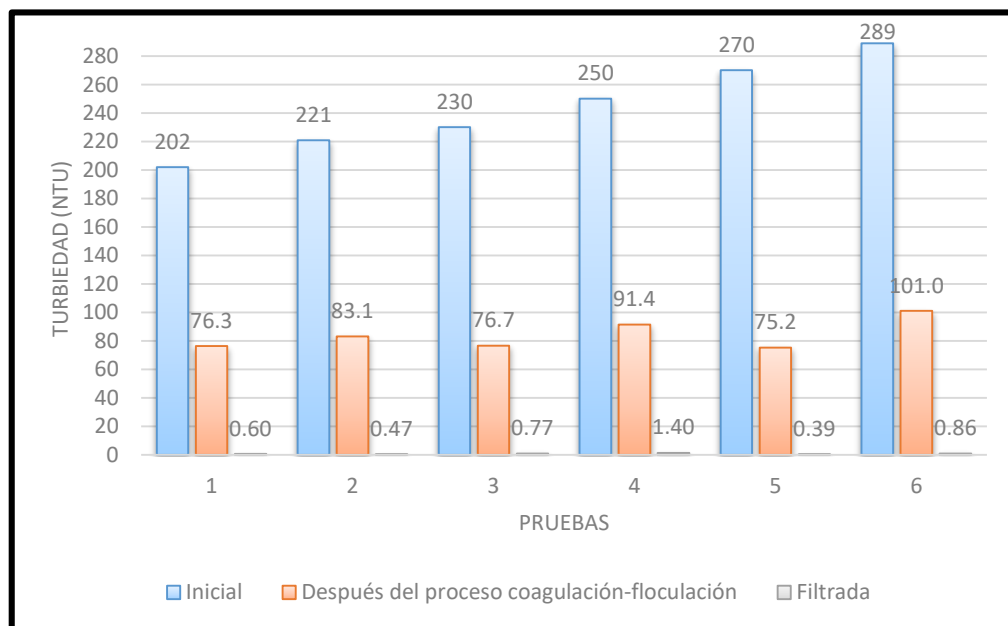
Figura 13 Turbiedad final del agua aplicando la semilla de tamarindo (*Tamarindus indica*) para rangos de turbiedad de 100-200 NTU



Fuente: Elaboración propia

Para los rangos de turbiedad de 201-300, el porcentaje de remoción fue del 65.3% después del proceso de coagulación-floculación y del 99.7% después de filtrar (Ver tabla 28). Se alcanzó hasta un 72.1% de remoción de turbiedad después del proceso de coagulación-floculación, donde el valor inicial de turbiedad fue de 270 NTU y luego del proceso de coagulación-floculación fue de 75.2 NTU (Ver figura 14). Después del filtrado fue de hasta 99.9% de remoción de turbiedad (Ver tabla 29).

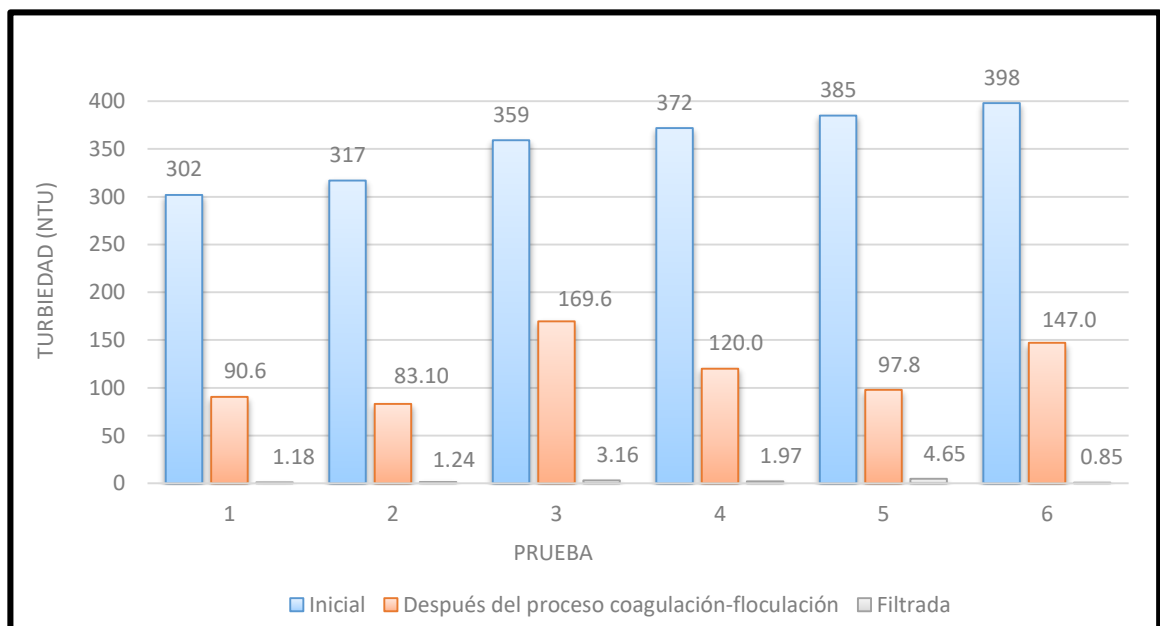
Figura 14 **Turbiedad final del agua aplicando la semilla de tamarindo (*Tamarindus indica*) para rangos de turbiedad de 201-300 NTU**



Fuente: Elaboración propia

Para los rangos de 301-400, el porcentaje de remoción fue del 67% después del proceso de coagulación-floculación (Ver tabla 28), en donde se alcanzó hasta un 74.6% de remoción. La turbiedad se redujo luego del proceso de coagulación-floculación en más del 70% para valores donde la inicial fue de 302, 317 y 385 NTU (Ver figura 15). Después del filtrado se obtuvo un promedio de 99.4% de remoción de turbiedad para los valores más altos de turbiedad de este rango (Ver tabla 29).

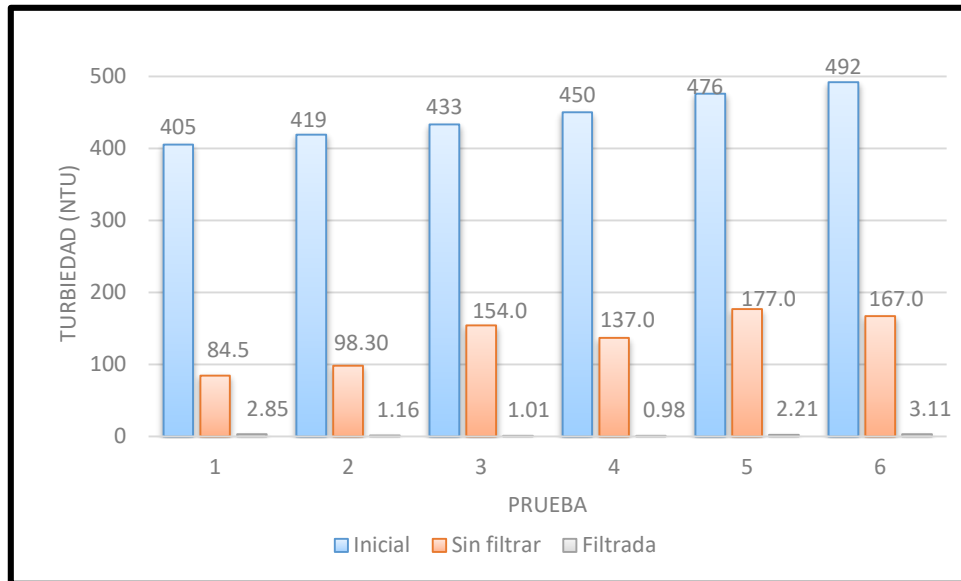
Figura 15 Turbiedad final del agua aplicando la semilla de tamarindo (*Tamarindus indica*) para rangos de turbiedad de 301-400 NTU



Fuente: Elaboración propia

Y para los rangos de 401-500 NTU, el mejor porcentaje de remoción después del proceso de coagulación-floculación fue del 79.1% (ver tabla 28), para un valor de turbiedad inicial de 405 NTU (Ver figura 16). Para este rango de turbiedades se obtuvo un promedio de remoción después del proceso de coagulación-floculación del 70% y después de filtrado se alcanzó un máximo de 99.8% de remoción. (Ver tabla 29).

Figura 16 **Turbiedad final del agua aplicando la semilla de tamarindo (*Tamarindus indica*) para rangos de turbiedad de 401-500 NTU**



Fuente: Elaboración propia

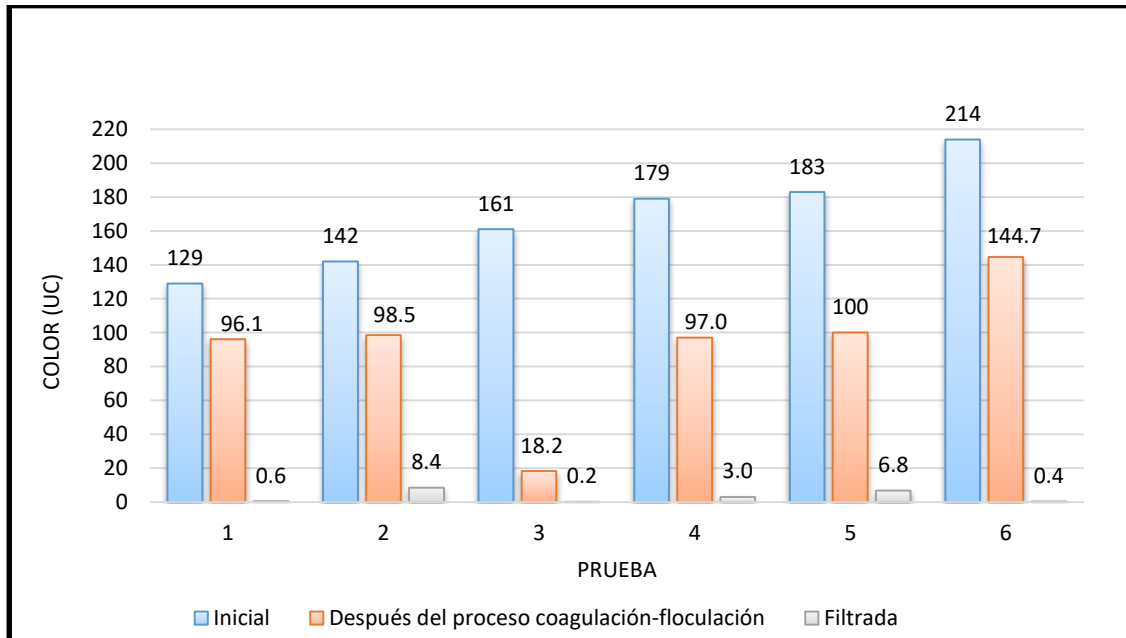
El porcentaje promedio de remoción de turbiedad global fue de 67.8% después del proceso de coagulación-floculación y del 99.5% después del filtrado (ver tablas 28 y 29). Todos los valores obtenidos luego del proceso de filtración se encuentran por debajo del límite máximo permisible por la Norma NTG COGUANOR 29001 de Guatemala y la Norma Técnica de Calidad de Agua de Honduras, que es de 5 NTU, ya que se obtuvo un promedio de turbiedad después de filtrar de 1.68 NTU.

4.2. Análisis de la efectividad de la semilla de tamarindo (*Tamarindus indica*) en la remoción de color

Los valores de color después del proceso de coagulación-floculación (color aparente) no pueden compararse con las normas de Honduras y Guatemala, ya que ambos países no tienen un límite establecido para este parámetro, por lo que el siguiente análisis se realizará con el color después de filtrado (color real), que sí está normado por ambos países. Aunque también se obtuvo disminución en los valores del color aparente, el porcentaje de remoción fue del 50%, con una reducción en el color de hasta un 88.7%.

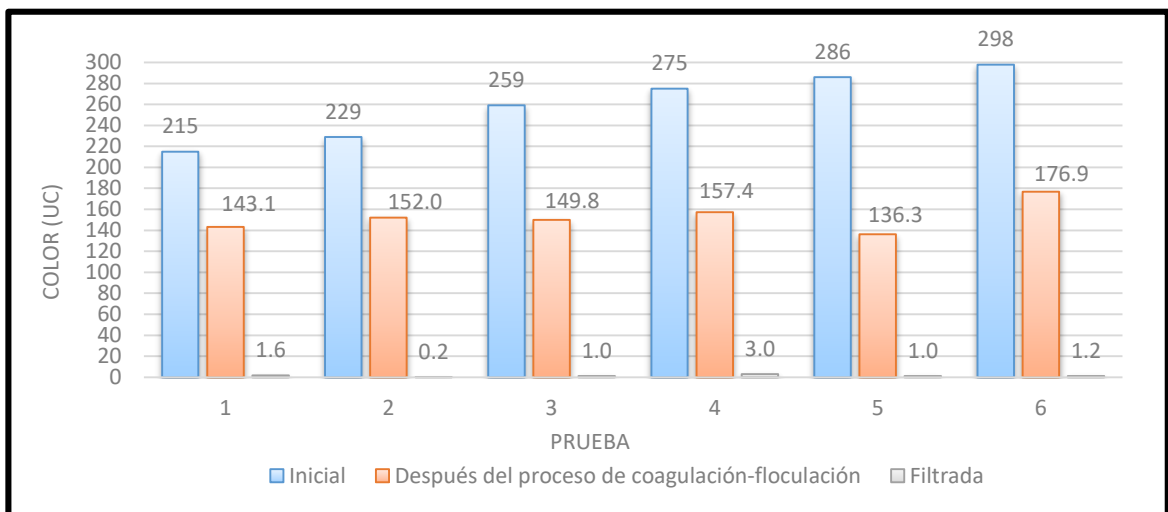
En el caso del color real, en el rango de color de 100-214 UC se tuvo un promedio global de reducción de color del 98.3%, y se alcanzó una disminución de color de 214 UC a 0.4 UC, como se ve en la figura 17, que representa un 99.8% de remoción de color. En el rango de 215-300 UC, se obtuvo hasta un 99.7% de remoción de color (ver tabla 31), con un valor promedio de color de 152 UC después del proceso de coagulación-floculación y de 1.3 UC (Fig. 18). Para los rangos de 300-415 UC y de 416-500 UC se alcanzó un promedio de remoción de color de 97.8% y 98.5%, respectivamente (ver tabla 31), con valores promedio de color de 174 UC y 180 UC después del proceso de coagulación-floculación. (Fig. 19 y Fig. 20)

Figura 17 Color final del agua aplicando la semilla de tamarindo (*Tamarindus indica*) para rangos de turbiedad de 100-214 UC



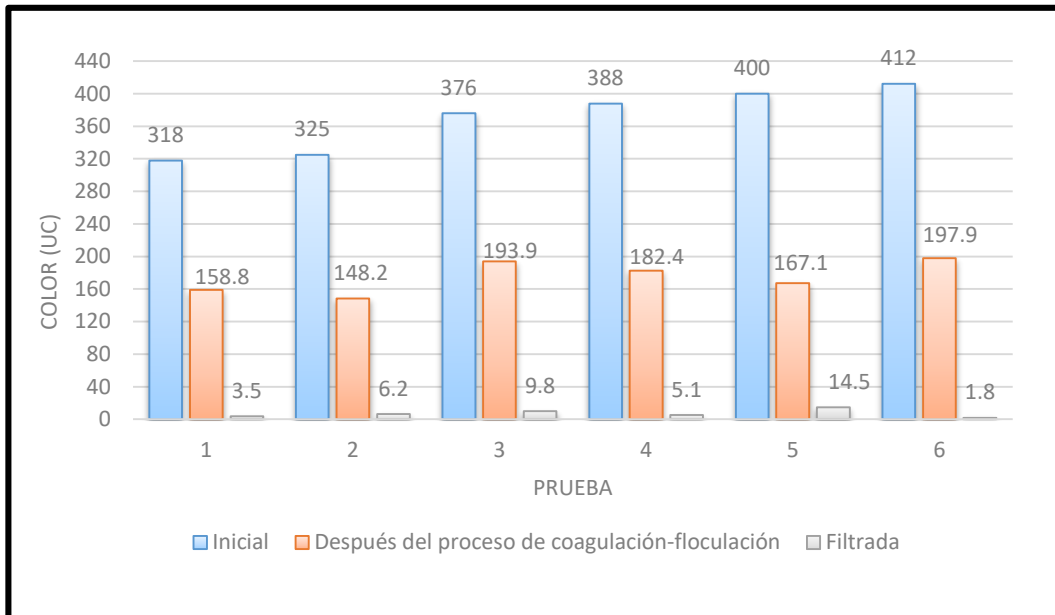
Fuente: Elaboración propia

Figura 18 Color final del agua aplicando la semilla de tamarindo (*Tamarindus indica*) para rangos de turbiedad de 215-300 UC



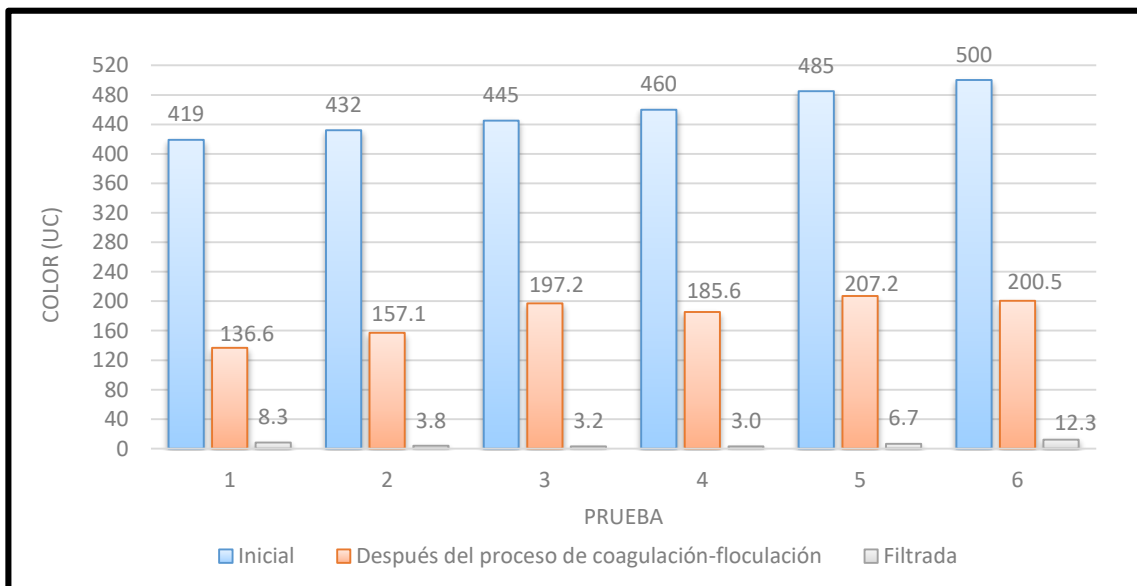
Fuente: Elaboración propia

Figura 19 **Color final del agua aplicando la semilla de tamarindo (*Tamarindus indica*) para rangos de turbiedad de 301-415 UC**



Fuente: Elaboración propia

Figura 20 **Color final del agua aplicando la semilla de tamarindo (*Tamarindus indica*) para rangos de turbiedad de 416-500 UC**



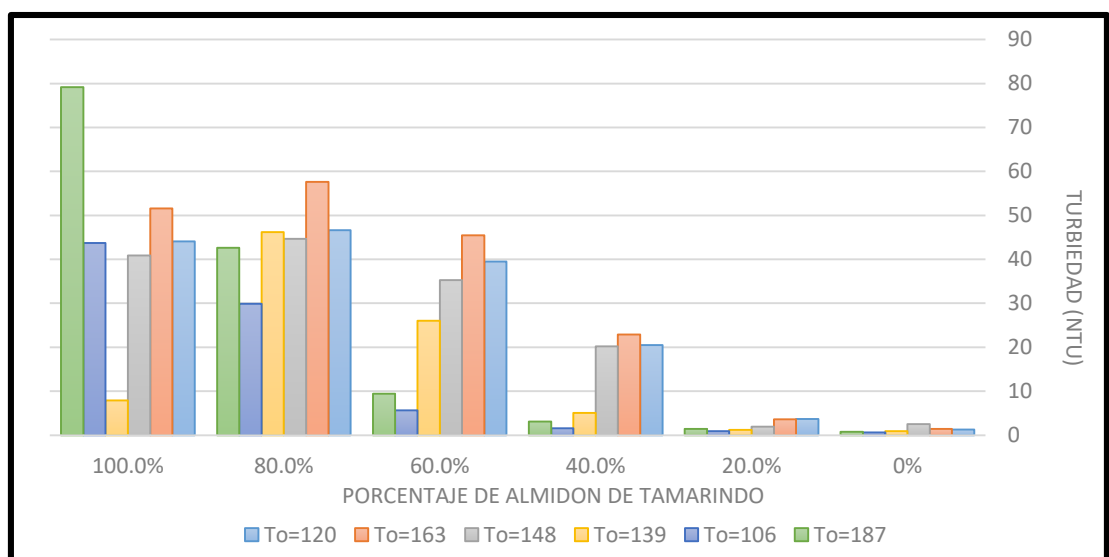
Fuente: Elaboración propia

Todos los resultados de color real se encuentran por debajo de del límite máximo permisible de acuerdo con la Norma NTG COGUANOR 29001 de Guatemala, que es de 35 UC, y la Norma Técnica de Calidad de Agua de Honduras, que es de 15 UC, con un porcentaje general de remoción de color del 98.6%.

4.3. Análisis de la efectividad de la combinación del $Al_2(SO_4)_3$ y la semilla de tamarindo (*Tamarindus indica*) en la remoción de turbiedad

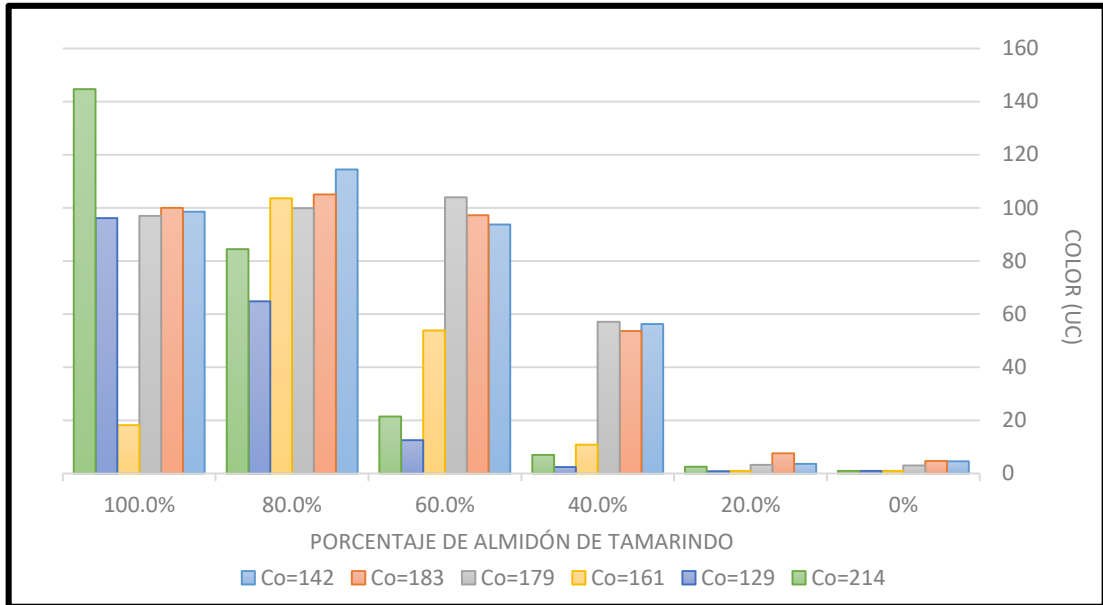
En las figuras descritas a continuación se muestran los valores obtenidos de turbiedad y color después del proceso de coagulación-floculación, usando las combinaciones del sulfato de aluminio y el coagulante orgánico a base de tamarindo (*Tamarindus indica*), para cada uno de los rangos de estudio.

Figura 21 **Sustitución de sulfato de aluminio por almidón de tamarindo para turbiedad de 100 a 200 después del proceso de coagulación-floculación**



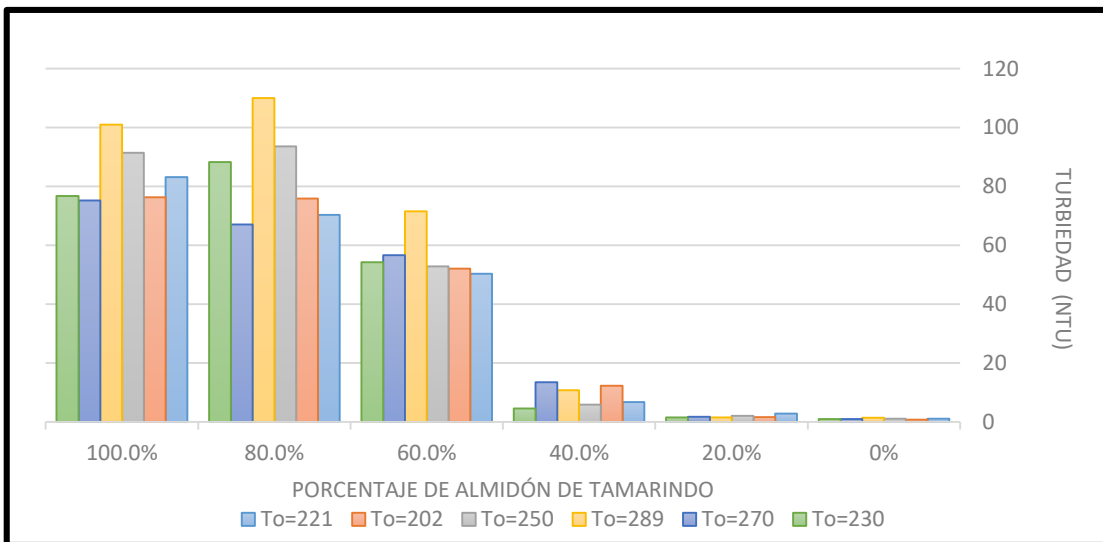
Fuente: Elaboración propia

Figura 22 Sustitución de sulfato de aluminio por almidón de tamarindo para color de 100 a 214 después del proceso de coagulación-floculación



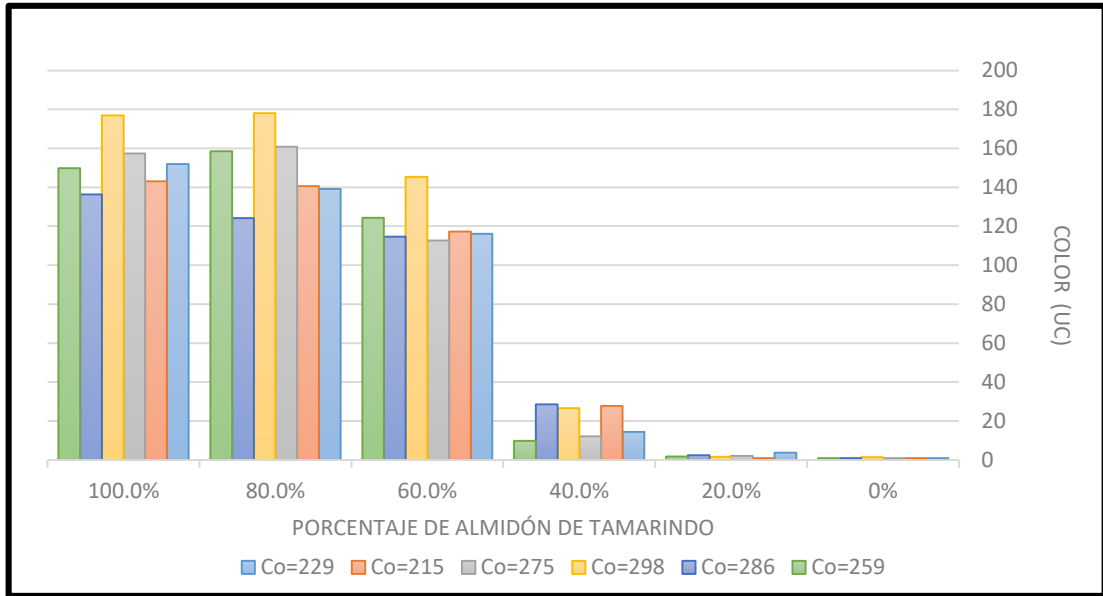
Fuente: Elaboración propia

Figura 23 Sustitución de sulfato de aluminio por almidón de tamarindo para turbiedad de 201 a 300 después del proceso de coagulación-floculación



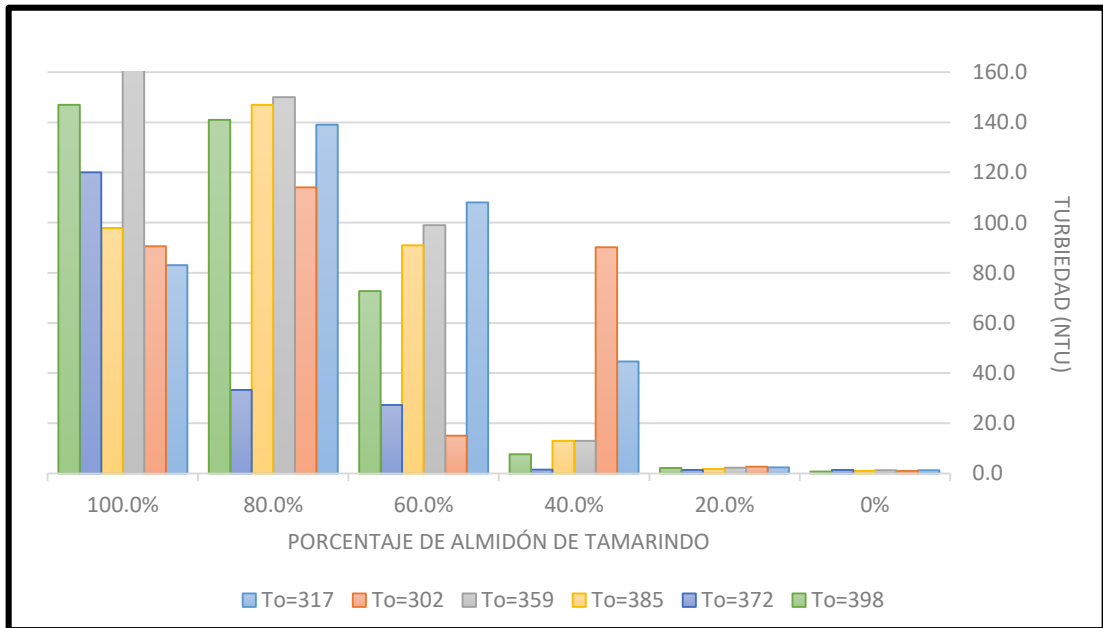
Fuente: Elaboración propia

Figura 24 **Sustitución de sulfato de aluminio por almidón de tamarindo para color de 215 a 300 después del proceso de coagulación-floculación**



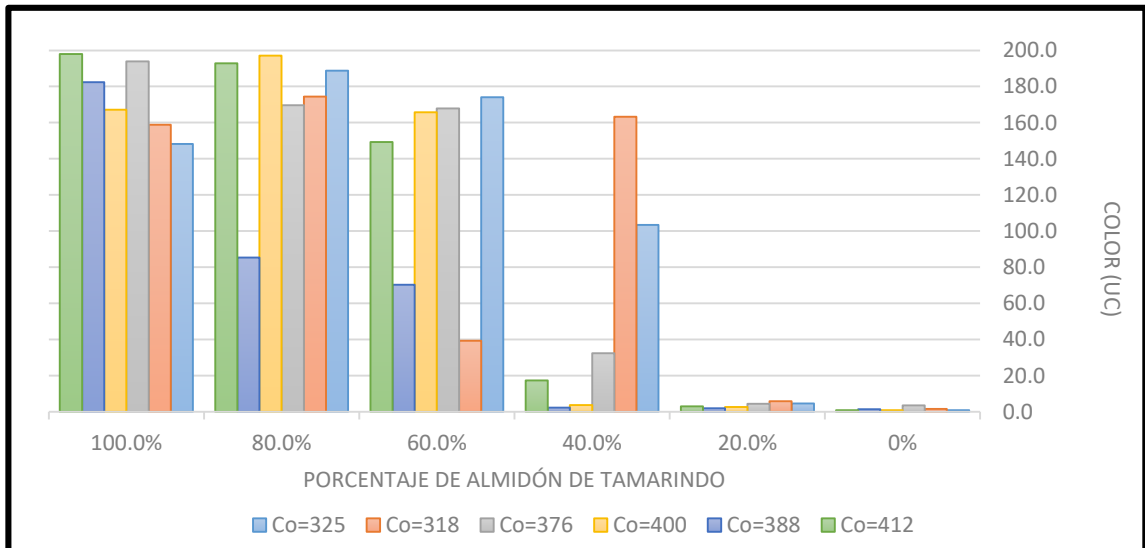
Fuente: Elaboración propia

Figura 25 **Sustitución de sulfato de aluminio por almidón de tamarindo para turbiedad de 301 a 400 después del proceso de coagulación-floculación**



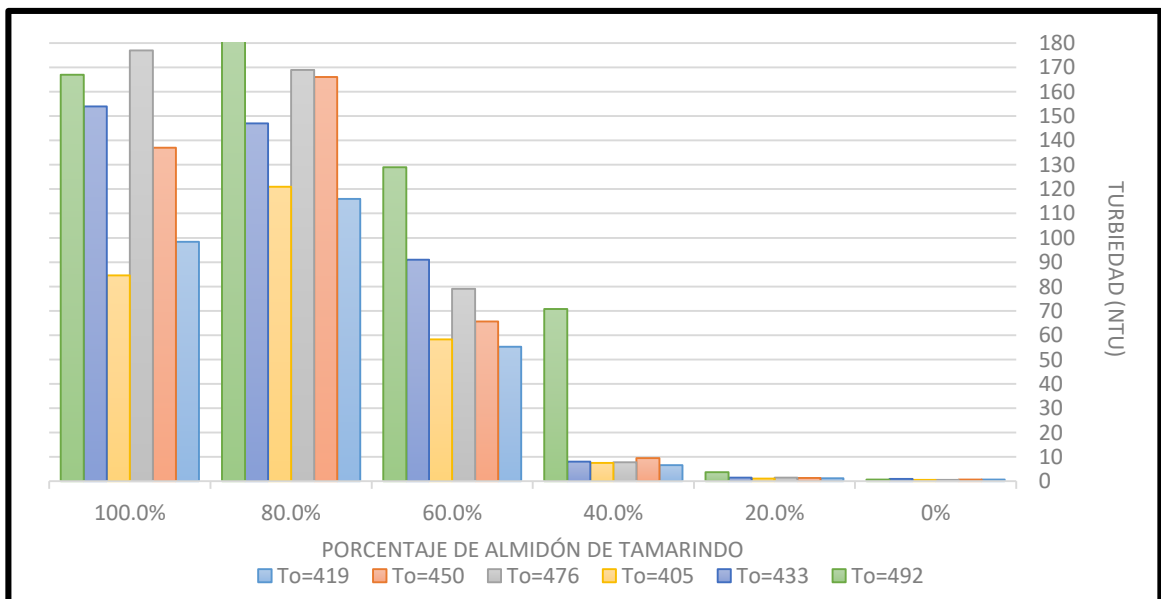
Fuente: Elaboración propia

Figura 26 Sustitución de sulfato de aluminio por almidón de tamarindo para color de 301 a 415 después del proceso de coagulación-floculación



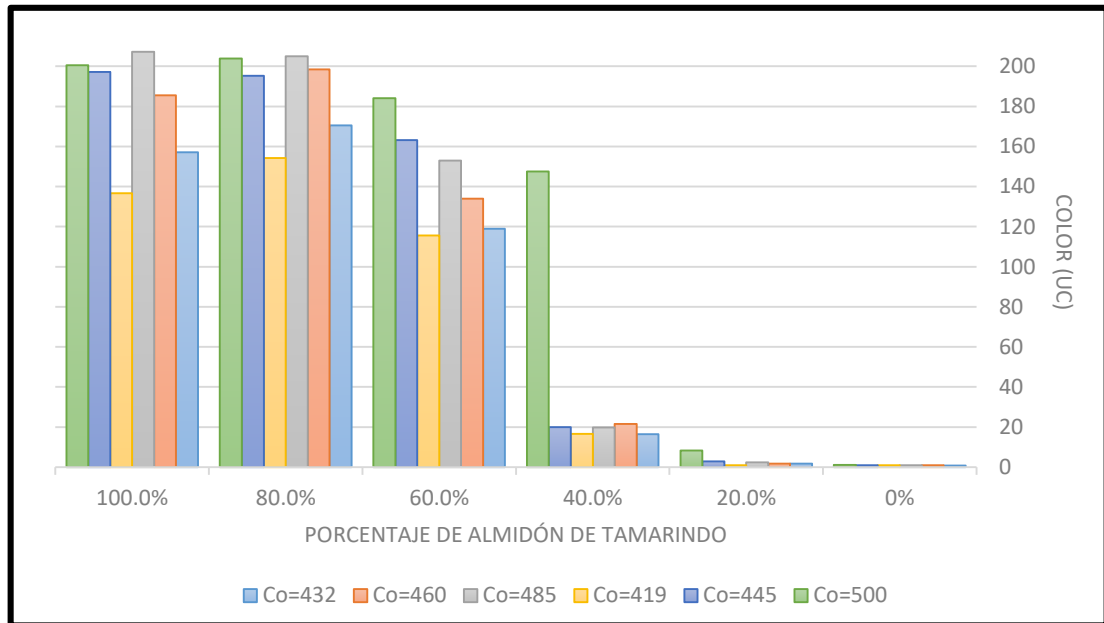
Fuente: Elaboración propia

Figura 27 Sustitución de sulfato de aluminio por almidón de tamarindo para turbiedad de 401 a 500 después del proceso de coagulación-floculación



Fuente: Elaboración propia

Figura 28 Sustitución de sulfato de aluminio por almidón de tamarindo para color de 416 a 500 después del proceso de coagulación-floculación



Fuente: Elaboración propia

Para cada uno de los rangos de turbiedad analizados en esta investigación se determinó que es posible sustituir hasta en 20% el sulfato de aluminio por el coagulante a base de tamarindo (*Tamarindus indica*), después del proceso de coagulación-floculación. Para el rango de 100-200 NTU, sustituyendo el 20% con el coagulante orgánico, se obtuvo un promedio de turbiedad de 2.13 NTU y un promedio de remoción de turbiedad del 98.5%; para el rango de 201-300 NTU, luego del proceso de coagulación-floculación, se obtuvo un promedio de turbiedad de 1.86 NTU y un promedio de remoción de turbiedad del 99.2%.

En el rango de 301-400 NTU, el valor promedio de turbiedad obtenido fue de 2.1 NTU y un promedio de remoción de turbiedad del 99.4% después del proceso de coagulación-floculación. Finalmente, en el rango de 401-500 NTU, sustituyendo el 20% de sulfato de aluminio, el promedio de turbiedad obtenido fue de 1.7 UNT, con porcentaje de remoción de turbiedad del 99.62%.

Es decir que, para cada uno de los rangos, se logró más de 95% de remoción de turbiedad, al sustituir en un 20% el coagulante orgánico a base de tamarindo (*Tamarindus indica*) por el sulfato de aluminio, luego del proceso de coagulación-floculación, cumpliendo con el límite máximo admisible de acuerdo con la Norma NTG COGUANOR 29001 de Guatemala y la Norma Técnica de Calidad de Agua de Honduras, el cual es de 5 NTU.

Luego del proceso de filtración es posible sustituir el 100% del sulfato de aluminio por el coagulante a base de tamarindo (*Tamarindus indica*), ya que todos los valores obtenidos estuvieron por debajo del límite máximo permisible de acuerdo con la Norma NTG COGUANOR 29001 de Guatemala y la Norma Técnica de Calidad del Agua de Honduras. En el rango de 100-200 NTU, el promedio de turbiedad obtenido fue de 1.89 NTU, con porcentaje de remoción del 98.7%. Para el rango de 201-300 NTU, el valor promedio fue de 0.75 NTU, con porcentaje de remoción del 99.7%, y para los rangos de 301-400 NTU y 401-500 NTU, los valores promedio de turbiedad final fueron de 2.17 NTU y 1.89 NTU, respectivamente, con porcentajes de remoción de 99.7%.

4.4. Análisis de la efectividad de la combinación del $Al_2(SO_4)_3$ y la semilla de tamarindo (*Tamarindus indica*) en la remoción de color

Para el rango de 100-214 UC, el promedio de color obtenido fue de 2.60 UC, con porcentaje de remoción del 98.3%. En el rango de 215-300 UC, el valor promedio fue de 1.26 UC, con porcentaje de remoción del 99.5%, y para los rangos de 301-415 UC y 416-500 UC, los valores promedio de color fueron de 3.3 UC y 3.10 UC, respectivamente, con porcentajes de remoción de 99.1% y 99.3%.

Con los valores de color real obtenidos es posible sustituir el 100% de sulfato de aluminio por el coagulante orgánico a base de tamarindo, ya que todos los valores obtenidos se encuentran por debajo del valor de las normas NTG COGUANOR 29001 de Guatemala y la Norma Técnica de Calidad de Agua de Honduras, cuyos valores para que el agua sea apta para el consumo humano son de 35 UC y 15 UC, respectivamente.

4.5. Factibilidad técnica y económica del uso de la semilla de tamarindo (*Tamarindus indica*) en el proceso de tratamiento de agua

Para poder definir la factibilidad técnica y económica del uso de la semilla de tamarindo (*Tamarindus indica*) como coagulante natural es importante tomar en cuenta las siguientes consideraciones:

Actualmente no existen empresas u organismos que se dediquen a la extracción de la semilla de tamarindo (*Tamarindus indica*) para la fabricación del polvo empleado en la elaboración del coagulante orgánico, ya que este se considera un desecho de la materia prima del fruto. De resultados obtenidos en la investigación se observa que el proceso de obtención del polvo para la elaboración del coagulante es sencillo, por lo que las personas lo pueden utilizar fácilmente.

Ya que el tamarindo (*Tamarindus indica*) es un material orgánico y por lo tanto, perecedero, es importante que para almacenarlo se tomen los cuidados necesarios para mantenerlo en estado óptimo, así como definir el tiempo de uso y fecha de caducidad. El tamarindo (*Tamarindus indica*) es un producto de fácil acceso en la región, por lo que su uso en el tratamiento del agua puede representar una mejoría en la calidad de este recurso en las poblaciones, principalmente en las rurales.

Al hacer el análisis económico, para el caso de Honduras, se encontró que en base a las dosis óptimas obtenidas, el uso del coagulante orgánico a base de la semilla de tamarindo supone un ahorro del 41.9%, ya que de acuerdo con (Sistema de Información de Mercados de Productos Agrícolas de Honduras 2016), el costo promedio del kilogramo de tamarindo es de 6.18 lempiras, a lo que se suma el valor de la elaboración del coagulante orgánico, con un costo final de 7.7 lempiras por kilogramo, respecto del sulfato de aluminio, cuyo precio, de acuerdo con SANAA (2013), es de 13.26 lempiras por kilogramo, por lo que el uso de este coagulante orgánico puede ser una buena opción para el tratamiento del agua. Y en Guatemala, en cambio, representa un aumento del 54.8%, por lo que desde el punto de vista económico no es una opción viable.

5. CONCLUSIONES

1. Al evaluar la capacidad de la semilla de tamarindo (*Tamarindus indica*) como coagulante orgánico, esta presentó una eficiente remoción de turbiedad y color, con resultados promedio de eficiencia en la remoción de turbiedad del 99.3%, y del 98.6% de color. Por lo tanto, se logró comprobar la hipótesis planteada.
2. Se comprobó que la semilla de tamarindo (*Tamarindus indica*) alcanza una eficiencia de hasta 67.8% en la remoción de turbiedad y del 49.7% en la remoción de color en el proceso coagulación-floculación.
3. Al utilizar la combinación de sulfato de aluminio y el coagulante a base de semilla de tamarindo (*Tamarindus indica*) para la remoción de turbiedad luego del proceso de coagulación-floculación, se obtuvo una eficiencia promedio de remoción del 84.5% en la turbiedad, y del 74.4% para el color.
4. El coagulante a base de la semilla de tamarindo (*Tamarindus indica*) se puede sustituir hasta en 20% por el sulfato de aluminio después del proceso de coagulación-floculación, para lograr valores de turbiedad inferiores a 5 UNT, con lo que se obtienen porcentajes de eficiencia de remoción de turbiedad del 99.2% y del 98.9% de color.

5. Los mejores resultados en el uso de la semilla de tamarindo (*Tamarindus indica*) como ayudante en el proceso floculación-coagulación se da en turbiedades de entre 401 a 500 NTU, ya que al sustituir el 100% del sulfato de aluminio por almidón de tamarindo se obtuvo una remoción del 69.7% del valor de turbiedad.
6. Los mejores resultados en el uso del almidón de tamarindo para remoción de color al final del proceso de tratamiento de agua se da en los rangos de color entre 215 a 300 UC, ya que al sustituir el 100% del sulfato de aluminio por almidón de tamarindo se obtuvo una remoción del 99.5 %.
7. Para Honduras, tanto técnica como económicamente, es factible el uso del almidón de tamarindo como ayudante en el proceso de coagulación-floculación a nivel de sistemas centralizados rurales, ya que la elaboración del coagulante es sencilla y accesible, y se requieren entre cinco y ocho semillas de tamarindo (*Tamarindus indica*) para tratar un litro de agua; además de que el uso del coagulante orgánico a base de esa semilla representa un ahorro del 41.93% en comparación con el sulfato de aluminio, ya que el costo de este es de 13.26 lempiras por kilogramo y el del coagulante orgánico a base de semillas de tamarindo es de 7.70 lempiras por kilogramo.
8. Para Guatemala, el uso del coagulante orgánico a base de semillas de tamarindo (*Tamarindus indica*) no es económicamente viable, debido a que el costo de este es de 13.20 quetzales por kilogramo y el del sulfato de aluminio es de 6.00 el kilogramo, lo que representa un incremento de más del 50%.

9. Se determinó que para ambos parámetros, color y turbiedad es posible sustituir el 100% del sulfato de aluminio por el coagulante a base de semilla de tamarindo (*Tamarindus indica*) al final del proceso de potabilización del agua, ya que los resultados obtenidos de calidad del agua de estos parámetros cumplen con los valores aptos para el consumo según las normativas de Honduras y Guatemala.

6. RECOMENDACIONES

1. Promover la producción del polvo a base de la semilla de tamarindo (*Tamarindus indica*) para la elaboración del coagulante orgánico a una escala macro para su uso en plantas potabilizadoras, ya que de acuerdo con los análisis efectuados en el laboratorio, con un costo aproximado de 7.70 lempiras es posible remover la turbiedad de 1.2 m³ de agua, lo que representa un ahorro del 49% en comparación con el sulfato de aluminio.
2. Ya que actualmente no se cuenta con almidón de tamarindo (*Tamarindus indica*) de manera comercial, se recomienda desarrollar otros estudios en los que se aplique la metodología descrita en esta investigación a escala comunitaria, principalmente en las zonas rurales, donde el acceso al agua potable es escaso y racionado, con el fin de remover la turbiedad y el color.
3. Promover el uso del coagulante orgánico a base de semilla de tamarindo (*Tamarindus indica*) en la remoción de color, ya que de acuerdo con los valores obtenidos en esta investigación, este proporciona altos valores de remoción de color.
4. Investigar el uso de otros almidones orgánicos para ser utilizados como ayudantes en el proceso de coagulación- floculación, ya que de acuerdo con los resultados obtenidos en esta investigación, son una opción económica y ambientalmente factible.

7. BIBLIOGRAFÍA

1. ARBOLEDA, 2000. *Teoría y práctica de la purificación del agua*. S.l.: Mc Graw Hill.
2. ARBOLEDA, J., 1972. *Teoría, diseño y control de los procesos de clarificación del agua*. [en línea]. Técnico. Lima, Perú: CEPIS/OPS.
13. Disponible en:
<http://www.bvsde.paho.org/bvsacd/scan/002320/002320.htm>.
3. ASRAFUZZAMAN, M., FAKHRUDDIN, A.N.M., HOSSAIN, M.A., ASRAFUZZAMAN, M., FAKHRUDDIN, A.N.M. y HOSSAIN, M.A., 2011. *Reducción de la turbiedad en el agua utilizando coagulantes naturales disponibles localmente*. International Scholarly Research Network, vol. 2011, pp. 1-6. ISSN 2090-7478, 2090-7478. DOI 10.5402/2011/632189, 10.5402/2011/632189.
4. CÁRDENAS, Y., 2000. *Tratamiento de agua: coagulación y floculación*. [en línea]. Técnico. Lima: SEDAPAL. [Consulta: 28 abril 2016].
Disponible en:
http://www.sedapal.com.pe/c/document_library/get_file?uuid=2792d3e3-59b7-4b9e-ae55-56209841d9b8&groupId=10154.

5. CENTRO DE INVESTIGACIÓN Y ESTUDIOS EN MEDIO AMBIENTE, UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERÍA DE MANAGUA, 2004. *Comprobación de la efectividad del coagulante (Cochifloc) en aguas del lago de Managua «PIEDRAS AZULES»*. Revista Iberoamericana de Polímeros Almendárez, vol. 5, no. 1, pp. 46-54.
6. CEPIS/OPS, 2004. Manual I: *Tratamiento de agua para consumo humano Plantas de filtración rápida*. Lima, Perú: s.n.
7. DENTEL, S., GUCCIARDI, B., SHETTY, P. y RESTA, J., 1989. *Manual de procedimientos para la selección de polímeros en plantas de tratamiento de agua*. . Técnico. Denver, Colorado: American Water Works Association. 90553.
8. DÍAZ, A., RINCON, N., ESCORIHUELA, A., FERNÁNDEZ, N., CHACIN, E. y FORSTER, C., 1999. *Una evaluación preliminar de la remoción de turbiedad por coagulantes naturales indígenas de Venezuela*. Process Biochemistry, vol. 35, pp. 391-395.
9. FLATEN, T., 2001. *Aluminio como factor de riesgo en la enfermedad del Alzheimer con énfasis en el agua potable*. Brain Research Bulletin, vol. 55, no. 2, pp. 187-196.
10. GANJIDOUST, H., TATSUMI, K., YAMAGISHI, T. y GHOLIAN, R., 1997. *Efecto de coagulante sintético y natural en la eliminación de lignina de las aguas residuales de pulpa y papel*. Water Science and Technology, vol. 35, no. 2-3, pp. 291–296. DOI 10.1016/S0273-1223(96)00943-2.

11. GURDIÁN, R., COTO, J. y SALGADO, V., 2009. *Coagulantes naturales y tradicionales para depuración aguas residuales*. Heredia, Costa Rica: Editorial Académica Española.
12. HERNÁNDEZ, B., SALAMANCA, M., FUENTES, L. y CALDERA, Y., 2013. *Semillas de tamarindo (tamarindus indica) como coagulante en aguas con alta turbiedad*. REDIELUZ, vol. 3, no. 1 y 2, pp. 91-96.
13. INSTITUTO DE ESTUDIOS AMBIENTALES, UNIVERSIDAD DE LA SIERRA JUÁREZ, OAXACA, 2007. *Remoción de turbiedad de agua con coagulantes naturales obtenidos de semillas (Eritrina americana, Querculex, Acacia farnesiana, Viscum album Senna candolleana)* Oaxaca, vol. 25, pp. 30-41.
14. KAWAMURA, S., 1991. *Eficacia de los polielectrolitos naturales en el tratamiento del agua*. Journal American Water Works Association, vol. 83, no. 10, pp. 88-91.
15. KIRCHMER, C., ARBOLEDA, J. y CASTRO, M., 1975. *Polímeros naturales y su aplicación como ayudantes de floculación*. Técnico. Lima, Perú: CEPIS/OPS. DOCUMENTOS TÉCNICOS 2.
16. MARTÍNEZ, E., 1987. *Uso de fécula de maíz como una alternativa de ayuda en el proceso de coagulación del agua cuando se emplea el sulfato de aluminio*. Científica. Guatemala: Escuela Regional de Ingeniería Sanitaria.

17. MÁRTINEZ, M., 2015. «*Uso de polímeros en el tratamiento de agua para consumo humano*». México: Universidad Nacional Autónoma de México.
18. MEJÍA, J.M., 1986. *La utilización de la semilla de la moringa Oleífera como coagulante natural*. Científica. Guatemala: Escuela Regional de Ingeniería Sanitaria.
19. MENDOZA, M. y IBÁÑEZ, W., 2006. *Tratamiento del agua potable, operacion, procesos, talleres y monitoreo*. Científica. Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander.
20. MOSCOZO, R., 2015. *Uso de almidón de yuca como sustituto del sulfato de aluminio en el proceso de coagulación-floculación en sistemas de tratamiento de agua para potabilización*. Científica. Guatemala: Escuela Regional de Ingeniería Sanitaria.
21. NAVE, F., 2016. *Desarrollo de número de pruebas pala la investigación*.
22. NDABIGENGESERE, A. y NARASIAH, S., 1998. *Calidad del agua tratada mediante coagulación usando las semillas de la moringa oleífera*. Water Research, vol. 32, no. 3, pp. 781-791.
23. NDABIGENGESERE, A., NARASIAH, S. y TALBOT, B., 1995. *Agentes activos y mecanismo de la coagulación de aguas turbias utilizando moringa oleífera*. Water Research, vol. 29, no. 2, pp. 703-710.
24. NUÑEZ, E., 2007. *Validación de la efectividad de la semilla de Moringa oleífera como coagulante natural del agua, destinada al consumo*

humano, Morocelí, Honduras. Científica. Honduras: Escuela Agrícola El Zamorano.

25. OMS, 2004. OMS | *La OMS publica una revisión de las guías para la calidad del agua potable con el fin de prevenir brotes epidémicos y enfermedades relacionados con el agua.* WHO [en línea]. [Consulta: 15 mayo 2016]. Disponible en: <http://www.who.int/mediacentre/news/releases/2004/pr67/es/index1.html>.
26. OMS, 2006. *Guías para la calidad del agua potable.* [en línea]. Ginebra: Organización Mundial de la Salud. Volumen 1. Disponible en: http://www.who.int/water_sanitation_health/dwq/gdwq3_es_full_lowsres.pdf.
27. POMPILIO, C., 2013. *“Uso de floculantes de origen natural en el tratamiento del agua en términos de turbidez en el río Santa – Huaraz.* Perú: Universidad Nacional José Faustino Sánchez Carrión.
28. RAMIREZ, (Hildebrando) y JARAMILLO, J., 2014. *Uso potencial de agentes clarificantes y desinfectantes de origen natural para el tratamiento integral del agua caracterizado por pisos térmicos.* Ingeniería Solidaria, vol. 10, no. 17, pp. 139-151. DOI <http://dx.doi.org/10.16925/in.v9i17.813>.
29. RAMIREZ, (Hildebrando) y JARAMILLO, J., 2015. *Agentes naturales como alternativa para el tratamiento del agua.* Universidad Militar Nueva Granada, vol. 11, no. 2, pp. 136-153.

30. SÁENZ, C. y SEPÚLVEDA, E., 1993. *Alternativas de industrialización de la tuna (Opuntia ficus- indica)*. Revista de Alimentos, vol. 18, pp. 29-32.
31. SANAA, 2013. *Contrato No. DM-04-2013*. 2013. S.l.: s.n.
32. SANDOVAL, M.M. y LAINES, J., 2013. *Moringa oleifera una alternativa para sustituir coagulantes metálicos en el tratamiento de aguas superficiales*. Ingeniería Revista Académica, vol. 17, no. 2, pp. 93-101.
33. SAWYER, C., MCCARTY, P. y PARKIN, G., 2001. *Química para la ingeniería ambiental*. Cuarta. Colombia: Mc Graw Hill.
34. ŠĆIBAN, M., KLAŠNJA, M., ANTOV, M. y ŠKRBIĆ, B., 2009. *Remoción de la turbiedad del agua con coagulantes naturales obtenidos a partir de castaña y bellota*. Bioresource Technology, vol. 100, pp. 6639-6643.
35. SISTEMA DE INFORMACIÓN DE MERCADOS DE PRODUCTOS AGRÍCOLAS DE HONDURAS, 2016. *Reporte diario de precios de venta al por mayor de frutas*. [en línea]. Comercial. Tegucigalpa, Honduras: Fundación Hondureña de Investigación Agrícola. Disponible en: http://www.fhia.org.hn/downloads/simpah_pdfs/1.3.TGAZB_FRU.pdf

36. SOLÍS SILVAN, R., CANEPA, L., RAMÓN, J., BARAJAS, H. y ROBERTO, J., 2012. *Mezclas con potencial coagulante para clarificar aguas superficiales*. Revista internacional de contaminación ambiental, vol. 28, no. 3, pp. 229-236. ISSN 0188-4999.
37. SUTHERLAND, J.P., FOLKARD, G.K. y GRANT, W.D., 1990. *Coagulantes naturales para el tratamiento del agua: un nuevo enfoque*. Waterlines, vol. 8, no. 4, pp. 30-32.
38. TERÁN, H. y VALDÉS, R., 2011. *La Enfermedad de Alzheimer Relacionada con la Utilización de Sulfato de Aluminio en Sistemas de Potabilización* [en línea]. Científica. Venezuela: UNIVERSIDAD NUEVA ESPARTA. Disponible en: hdl.handle.net/123456789/82.
39. UNESCO, 2003. *Agua para todos. Agua para la vida*. . S.l.: Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura, (UNESCO).
40. UNICEF, 2007. ESTADO MUNDIAL DE LA INFANCIA 2008 Supervivencia infantil. [en línea]. Salud. Estados Unidos: Fondo de las Naciones Unidas para la Infancia. Disponible en: www.unicef.org/publications.
41. UNICEF, 2012. DESAFIOS Octubre 2012 Noticias ONU Honduras. 2012. S.l.: s.n.

42. UNICEF y el Agua en Honduras. [en línea], [sin fecha]. [Consulta: 15 mayo 2016]. Disponible en: <http://www.revistazo.com/sep-02/rep4.html>.
43. UNIVERSIDAD DE ZULIA, 2009. LUZ Periódico. Issuu [en línea]. No. 381. Venezuela, 2009. [Consulta: 10 junio 2016]. Disponible en: <https://issuu.com/luzadn/docs/381>.
44. VASQUEZ, C., BATIS, M. y ALCOCER, M., 1999. *Árboles y arbustos potencialmente valiosos para la restauración ecológica y la reforestación*. . Técnico. México: UNAM.
45. VIDAL, R., LAINES, J. y HERNÁNDEZ, J., 2012. *Uso potencial de agentes de origen vegetal para la remoción de turbiedad en el tratamiento de aguas superficiales*. División Académica de Ciencias Biológicas Universidad Juárez Autónoma de Tabasco, vol. 18, no. 34.
46. YANG, Y., ABDUL-TALIB, S., PEI, L., NIZAN, M., AISAH ABD-RAZAK, S. y MOHD-MOHTAR, A., 2007. *El estudio sobre cactus opuntia como coagulante natural en el tratamiento de aguas turbias*. CSSR [en línea], Disponible en: <http://ptarpp2.uitm.edu.my/suhaimiabdultalib/fulltext/A%20Study%20On%20Cactus.pdf>.