



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

**USO DE SEMILLA DE MORINGA OLEIFERA COMO COAGULANTE  
ORGÁNICO EN EL TRATAMIENTO DE AGUA PARA CONSUMO HUMANO**

**Ing. Edwin Geovani Turcios Flores**

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

Guatemala, agosto de 2017

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**USO DE SEMILLA DE MORINGA OLEIFERA COMO COAGULANTE  
ORGÁNICO EN EL TRATAMIENTO DE AGUA PARA CONSUMO HUMANO**

ESTUDIO ESPECIAL

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

POR

**EDWIN GEOVANI TURCIOS FLORES**

ASESORADO POR EL M. SC. FÉLIX ALAN DOUGLAS AGUILAR CARRERA

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

GUATEMALA, AGOSTO DE 2017

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. José Milton de León Bran
VOCAL IV	Br. Jurgen Andoni Ramírez Ramírez
VOCAL V	Br. Oscar Humberto Galicia Nuñez
SECRETARIA	Inga. 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 a su consideración mi trabajo de graduación titulado:

### **USO DE SEMILLA DE MORINGA OLEIFERA COMO COAGULANTE ORGÁNICO EN EL TRATAMIENTO DE AGUA PARA CONSUMO HUMANO**

Tema que me fuera asignado por la Comisión de Admisión y Otorgamiento de Grado de la Escuela de Ingeniería Sanitaria y Recursos Hidráulicos (ERIS), con fecha de agosto de 2016.



**Ing. Edwin Geovani Turcios Flores**

geovaniturcios@hotmail.com

Carné No. 200416097



Guatemala 18 de agosto de 2017

M.Sc. Ing. Adan Ernesto 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 SEMILLA DE MORINGA OLEIFERA COMO COAGULANTE  
ORGÁNICO EN EL TRATAMIENTO DE AGUA PARA CONSUMO HUMANO**

Elaborado por el ingeniero Edwin Geovani Turcios Flores, como parte de su Estudio Especial, y como requisito para optar al grado académico de Maestro 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 Alan Douglas Aguilar Carrera  
Asesor del estudio



Guatemala 18 de agosto de 2017

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 SEMILLA DE MORINGA OLEIFERA COMO COAGULANTE  
ORGÁNICO EN EL TRATAMIENTO DE AGUA PARA CONSUMO HUMANO**

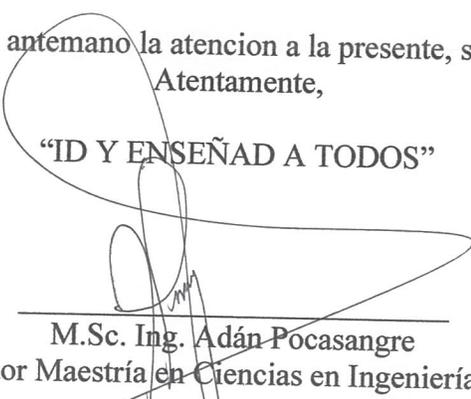
Presentado por el estudiante:

**Ing. Edwin Geovani Turcios Flores**

Les manifiesto que el 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



Guatemala 21 de agosto de 2017

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 Ruth Nohemi Cardona Mazariegos, colegiada No. 12498, al trabajo del estudiante Ing. Edwin Geovani Turcios Flores, titulado: **USO DE SEMILLA DE MORINGA OLEIFERA COMO COAGULANTE ORGÁNICO EN EL TRATAMIENTO DE AGUA PARA CONSUMO HUMANO**. En representación de la Comisión de Admisión y Otorgamiento de Grado, procede a la autorización del mismo, en Guatemala a los 21 días del mes de agosto de 2017.

**Imprimase**

“ID Y ENSEÑAD A TODOS”

M.Sc. Ing. Pedro Cipriano Saravia Celis

DIRECTOR



## **ESTUDIO DE TESIS QUE DEDICO A:**

<b>Mi madre</b>	Por llenarme de amor, inculcarme principios y valores, darme todo y cuidar de mí todos estos años.
<b>Mi padre</b>	Por guiar a la familia hacia el bien y la prosperidad, sus consejos y amistad.
<b>Mis hermanas</b>	Con especial aprecio y cariño, por ser parte fundamental de mi vida.

## **AGRADECIMIENTOS A:**

### **Pueblo de Guatemala**

Por pagar la educación sancarlista, adquiriendo un compromiso social y con la obligación moral de devolver lo que el pueblo ha invertido.

### **Escuela Regional de Ingeniería Sanitaria y Recursos Hidráulicos (ERIS)**

Por todas las enseñanzas y conocimientos brindados, dándome el honor de pertenecer a una Escuela con más de cincuenta años de triunfos, avances e historia.

### **Cuerpo docente**

Por todas las enseñanzas impartidas y brindar las herramientas necesarias para el éxito en el ámbito profesional.

### **Mi asesor**

Por compartir su tiempo y conocimiento desinteresadamente, colaboración y servir de guía durante el proceso de la presente investigación.

### **Compañeros de ERIS**

Por ser parte y por compartir tantas experiencias enriquecedoras y anécdotas, con quienes comenzamos siendo desconocidos, para luego ser compañeros y finalmente amigos, ¡muchas gracias!

## ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES .....	V
GLOSARIO.....	IX
RESUMEN.....	XI
PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA .....	XIII
JUSTIFICACIÓN .....	XV
OBJETIVOS .....	XVII
HIPÓTESIS .....	XIX
ANTECEDENTES .....	XXI
ALCANCES Y LIMITACIONES .....	XXV
INTRODUCCIÓN.....	XXVII
1. MARCO TEÓRICO .....	1
1.1. Coagulación – floculación .....	1
1.1.1. Coagulación .....	1
1.1.2. Ayudantes de coagulación.....	3
1.1.3. Floculación.....	3
1.1.4. Factores que afectan la coagulación – floculación .....	5
1.2. Color .....	5
1.3. Turbiedad.....	6
1.4. Coagulantes naturales .....	6
1.5. Moringa oleifera .....	7
1.5.1. Moringa oleifera como coagulante natural.....	8

1.5.2.	Método de coagulación de la semilla de moringa .....	9
2.	METODOLOGÍA .....	11
2.1.	Materiales .....	11
2.1.1.	Agua empleada en el estudio .....	11
2.1.2.	Procedimiento para inducir la turbiedad en el agua utilizada .....	11
2.1.3.	Obtención de la semilla de moringa.....	13
2.2.	Cálculo para la remoción de turbiedad y color aparente ...	17
2.3.	Método .....	18
2.3.1.	Preparación de la prueba de jarras.....	18
2.4.	Fase experimental .....	21
2.4.1.	Determinación de la dosis óptima con sulfato de aluminio .....	21
2.4.2.	Determinación de la dosis óptima con polvo de semilla de moringa .....	23
2.4.3.	Combinación de sulfato de aluminio y semilla de moringa.....	24
2.4.4.	Determinación del número de muestras .....	24
3.	RESULTADOS .....	27
4.	DISCUSIÓN DE RESULTADOS .....	35
4.1.	Turbiedad inducida por medio de caolín.....	35
4.2.	Turbiedad y color aparente residual sin aplicar coagulantes.....	36
4.3.	Turbiedad y color aparente residual aplicando sulfato de aluminio .....	39

4.4.	Turbiedad y color aparente residual aplicando semilla de moringa.....	42
4.5.	Turbiedad y color aparente residual aplicando combinaciones de sulfato de aluminio y semilla de moringa .....	46
4.6.	Comparación entre la semilla de moringa y almidón de yuca.....	50
4.7.	Comparación entre la semilla de moringa y tamarindo.....	52
	CONCLUSIONES.....	55
	RECOMENDACIONES .....	57
	BIBLIOGRAFÍA .....	59
	APÉNDICES.....	63
	ANEXOS .....	71

## ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

### FIGURAS

1.	Tipos básicos de coagulación.....	2
2.	Formación de flóculos.....	4
3.	Escala de turbiedad en NTU.....	5
4.	Caolín utilizado .....	12
5.	Semilla de moringa .....	15
6.	Polvo de semilla de moringa.....	16
7.	Polvo de semilla de moringa.....	16
8.	Cristalería utilizada para la prueba de jarras .....	18
9.	Equipo utilizado para la prueba de jarras .....	19
10.	Toma de muestras.....	20
11.	Soluciones al 1% utilizadas .....	20
12.	Dosificación de coagulante.....	21
13.	Turbiedad inducida por medio de caolín.....	35
14.	Turbiedad residual sin coagulante (testigos).....	36
15.	Color aparente residual sin coagulante (testigos) .....	37
16.	Turbiedad residual utilizando sulfato de aluminio.....	39
17.	Turbiedad residual utilizando semilla de moringa.....	42
18.	Color residual utilizando semilla de moringa .....	43
19.	Turbiedad y color residual utilizando combinaciones, 15 minutos de sedimentación .....	47
20.	Turbiedad y color residual utilizando combinaciones, 30 minutos de sedimentación .....	48

21.	Turbiedad y color residual utilizando combinaciones, 60 minutos de sedimentación .....	49
22.	Comparación de remoción de turbiedad entre moringa y almidón de yuca.....	51
23.	Comparación de eficiencia de remoción de turbiedad y color aparente entre semilla de moringa y semilla de tamarindo .....	53

## TABLAS

I.	Antecedentes de estudios realizados en ERIS.....	XXIII
II.	Principales coagulantes utilizados.....	4
III.	Análisis proximal de la semilla de moringa.....	8
IV.	Caolín utilizado para determinar las dosis óptimas de coagulantes .....	13
V.	Caolín utilizado para determinar las dosis óptimas de coagulantes .....	14
VI.	Dosis óptima de sulfato de aluminio en función de la turbiedad ....	22
VII.	Dosis óptima de polvo de semilla de moringa en función de la turbiedad.....	23
VIII.	Combinaciones de sustitución de sulfato de aluminio con semilla de moringa.....	24
IX.	Dosis óptimas de coagulante.....	27
X.	Turbiedad y color aparente residual sin aplicar coagulante (testigos).....	28
XI.	Turbiedad y color aparente residual aplicando sulfato de aluminio .....	29

XII.	Turbiedad y color aparente residual aplicando polvo de semilla de moringa.....	30
XIII.	Turbiedad y color aparente residual combinación 2.....	31
XIV.	Turbiedad y color aparente residual combinación 3.....	32
XV.	Turbiedad y color aparente residual combinación 4.....	33
XVI.	Turbiedad y color aparente residual combinación 5.....	34
XVII.	Porcentaje de remoción de turbiedad y color únicamente por sedimentación (testigos).....	38
XVIII.	Porcentaje de remoción de turbiedad utilizando sulfato de aluminio .....	40
XIX.	Porcentaje de remoción de color aparente utilizando sulfato de aluminio .....	41
XX.	Porcentaje de remoción de turbiedad utilizando semilla de moringa.....	44
XXI.	Porcentaje de remoción de color aparente utilizando semilla de moringa.....	45
XXII.	Porcentaje de remoción de turbiedad utilizando almidón .....	50
XXIII.	Porcentaje de remoción de turbiedad utilizando tamarindo .....	54
XXIV.	Porcentaje de remoción de turbiedad, combinación 2.....	63
XXV.	Porcentaje de remoción de color, combinación 2.....	64
XXVI.	Porcentaje de remoción de turbiedad, combinación 3.....	65
XXVII.	Porcentaje de remoción de color, combinación 3.....	66
XXVIII.	Porcentaje de remoción de turbiedad, combinación 4.....	67
XXIX.	Porcentaje de remoción de color, combinación 4.....	68
XXX.	Porcentaje de remoción de turbiedad, combinación 5.....	69
XXXI.	Porcentaje de remoción de color, combinación 5.....	70

## GLOSARIO

<b>Agua potable</b>	Agua apta para el consumo humano, cumple con todos los requisitos físicos, químicos y microbiológicos establecidos por la norma COGUANOR NGO 29001.
<b>Coagulación</b>	Proceso mediante el cual se añaden compuestos químicos al agua, para reducir las fuerzas que mantienen estable a la materia suspendida, coloidal y disuelta, con ayuda de la energía de mezclado.
<b>Coagulante</b>	Sustancia química que, al añadir al agua, produce la unión de las partículas en suspensión presentes, para producir un flóculo insoluble en agua, para facilitar la posterior sedimentación de los flóculos.
<b>COGUANOR</b>	Comisión Guatemalteca de Normas.
<b>Color del agua</b>	Propiedad física que da una indicación rápida de la calidad del agua, es producido principalmente por la presencia de iones metálicos naturales, humus, materia orgánica, plancton y residuos industriales.
<b>CONAGUA</b>	Comisión Nacional del Agua (México).
<b>ERIS</b>	Escuela Regional de Ingeniería Sanitaria y Recursos Hidráulicos.

<b>Floculación</b>	Proceso donde se propicia el contacto entre partículas, mediante mezclado lento, aglomerándose para formar flóculos y de esta manera facilitar su precipitación.
<b>Flóculos</b>	Partículas desestabilizadas y aglomeradas por acción del coagulante.
<b>Muestra</b>	Es una parte extraída de un universo o conjunto, por métodos que permiten considerarla representativa del mismo.
<b>Parámetro</b>	Es un valor de referencia que se utiliza en las normativas, para determinar la calidad del agua.
<b>pH</b>	Potencial hidrógeno, es una medida de acidez o alcalinidad de una solución, indica la concentración de iones hidrógeno presentes.
<b>Turbiedad</b>	Propiedad física del agua, mide la pérdida de luz transmitida a través de la muestra por difracción de los rayos al chocar con las partículas en suspensión.
<b>Testigo</b>	Es un valor de control o referencia, en el cual el investigador no ha tenido ninguna intervención en el proceso, únicamente ha monitoreado los valores de los parámetros en estudio.
<b>UNT</b>	Unidades Nefelométricas de Turbiedad.

## RESUMEN

El presente estudio tiene como propósito principal evaluar la eficiencia y posterior factibilidad del uso de polvo de semilla de moringa como coagulante orgánico y comparar su eficiencia con los resultados obtenidos en estudios previos realizados en ERIS de la semilla de tamarindo y almidón de yuca.

Para ello, se indujo artificialmente la turbiedad (y como consecuencia el color) por medio de arcilla caolín, para obtener diferentes turbiedades en un rango de 0 a 500 UNT, se obtuvo la dosis óptima del sulfato de aluminio y de la semilla de moringa, por medio de pruebas de jarras iniciales.

Posteriormente, se realizaron 25 pruebas de jarras a diferentes turbiedades con las dosis óptimas, utilizando coagulante a base de semilla de moringa y diferentes combinaciones de ésta con sulfato de aluminio, así como también pruebas sin la utilización de ningún tipo de coagulante, las cuales sirvieron como valores de control o testigos, y se evaluó el porcentaje de remoción de la turbiedad y color, a 15, 30 y 60 minutos de sedimentación.

Para el cálculo del porcentaje de remoción de turbiedad y color aparente, se realizó de dos formas; la primera utilizó los valores residuales y se tomaron como base los valores iniciales; la segunda tomó como base los valores de control o testigos, para no tomar en cuenta la reducción de turbiedad y color que se dio por sedimentación natural de las partículas suspendidas y reportar únicamente los porcentajes de remoción producidos por el coagulante utilizado.

Al evaluar los resultados del polvo de la semilla de moringa, la remoción promedio de turbiedad y color, tomando como base los valores iniciales, está por arriba del 55 % y 40 % respectivamente, a 15 minutos de sedimentación, mientras que, al considerar como base los valores control, los porcentajes de remoción reportan solo un 23 % y 20 % al mismo tiempo de sedimentación.

Se concluye que técnicamente no es factible utilizar el polvo de semilla de moringa como coagulante orgánico a nivel domiciliar y como alternativa para el sulfato de aluminio de acuerdo a la metodología empleada, utilizando agua con turbiedad artificial por medio de arcilla caolín, debido a que los valores residuales de turbiedad y color aparente, después de al menos una hora de sedimentación, no son suficientes para cumplir con la norma COGUANOR NGO 29001.

Aunque el polvo de semilla de moringa reportó porcentajes de remoción levemente mayores que la semilla de tamarindo y el almidón de yuca, ninguno de los tres reporta una disminución apreciable por debajo de las 230 unidades de turbiedad y 250 de color, una vez reduciendo el porcentaje producido por la sedimentación natural de las partículas de caolín.

Todas las combinaciones entre sulfato de aluminio y semilla de moringa presentan mejor eficiencia que al utilizar solamente semilla de moringa, pero ninguna de ellas iguala o supera las eficiencias que se reportan utilizando únicamente sulfato de aluminio, por lo cual, tampoco se recomienda utilizar estas combinaciones en los procesos de coagulación-floculación.

Estos resultados podrían estar afectados por las condiciones de turbiedad artificial inducida por medio de caolín y por la metodología empleada en el proceso de producción del coagulante orgánico, la cual se recomienda investigar en procesos futuros.

## **PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA**

En aguas superficiales utilizadas para el abastecimiento a poblaciones, los valores iniciales de turbiedad y color usualmente son superiores a los límites permitidos en la norma COGUANOR NGO 29001.

En las plantas potabilizadoras de agua en Guatemala, se utiliza el sulfato de aluminio como agente coagulante-floculante, debido a que es altamente efectivo. Los inconvenientes de este producto (al igual que los polímeros sintéticos) es el elevado costo, por ello es necesario contar con una infraestructura adecuada y de personal técnico capacitado para la aplicación.

Por motivos económicos no es posible construir plantas potabilizadoras en cada servicio de abastecimiento que lo necesita, por lo cual surge la necesidad de implementar procesos de potabilización a escala domiciliar que se adapten a las comunidades y en los cuales, se utilicen materiales y/o productos que se encuentren localmente o de fácil acceso.

Al comprobar la eficiencia, por medio de pruebas de laboratorio, la capacidad de coagulación-floculación de algunos polímeros orgánicos (moringa, tamarindo y yuca) y la combinación de estos con sulfato de aluminio, que sean de fácil obtención en las comunidades, será posible realizar una propuesta en donde se utilicen productos locales y que no tengan potenciales peligros a la salud, para disminuir los valores de turbiedad y color hasta valores que estén dentro de la norma COGUANOR NGO 29001.

## JUSTIFICACIÓN

En Guatemala, es necesario mejorar el acceso a los servicios de abastecimiento de agua potable; principalmente en áreas rurales, donde la población generalmente se encuentra dispersa y es necesario dotar de la infraestructura adecuada para la potabilización de agua.

De los hogares guatemaltecos únicamente el 76.3 por ciento cuenta con acceso a agua dentro de su vivienda (Encovi 2014), el área urbana tiene un 89.0 por ciento, mientras que para el área rural únicamente un 63.9 por ciento.

Debido a que no existen estudios que demuestren que las fuentes de agua para consumo humano cumplen con los parámetros de la norma guatemalteca, así ser considerada agua potable, los porcentajes para el número de hogares con acceso a agua potable se estima que son menores.

En la presente investigación, se buscan alternativas a nivel domiciliar para la reducción de los valores de turbiedad y color hasta los límites permisibles en la normativa guatemalteca de agua potable, por medio de coagulantes orgánicos, beneficiando a las personas de las comunidades, en las cuales, los valores de la turbiedad y el color en el agua que utilizan para consumo se encuentran fuera de los límites de la normativa local.

## **OBJETIVOS**

### **General**

Determinar la factibilidad técnica de la utilización de polvo de semilla de moringa como coagulante orgánico para remover la turbiedad y color de la fuente de agua superficial, para consumo humano y reducirlos a valores que se encuentren dentro de los límites máximos permisibles en la norma COGUANOR NGO 29001.

### **Específicos**

1. Evaluar la eficiencia de la semilla de moringa como coagulante orgánico en la remoción de turbiedad y color del agua, para consumo humano.
2. Comparar la eficiencia entre los coagulantes orgánicos (semilla de moringa, semilla de tamarindo y almidón de yuca) con un coagulante químico tradicional ampliamente utilizado (sulfato de aluminio).
3. Comprobar la eficiencia de remoción de color y turbiedad utilizando diferentes combinaciones de sulfato de aluminio y semilla de moringa, para la reducción de costos.
4. Realizar una propuesta a nivel domiciliario que permita la utilización de coagulantes orgánicos a bajo costo, para remover la turbiedad y el color del agua destinada para consumo humano.

## **HIPÓTESIS**

Es técnicamente factible la utilización de la semilla de moringa como coagulante orgánico a nivel domiciliario, para remover la turbiedad y el color del agua destinada para consumo humano, hasta los valores límites máximos permisibles en la norma COGUANOR NGO 29001.

## ANTECEDENTES

A pesar de que los coagulantes orgánicos fueron utilizados ancestralmente, como en India, África y China (Kawamura 1991), su aplicación ha sido más bien empírica y una gran parte de la información existente proviene de la tradición oral y cultural.

A inicios del siglo XXI, los coagulantes orgánicos han ido ganando relevancia y están siendo considerados por muchos investigadores, debido a que pueden conseguirse a bajos precios, son amigables con el ambiente, son abundantes, no presentan potenciales daños a la salud y por su naturaleza son biodegradables en el proceso de potabilización del agua (Asrafuzzaman et al. 2011).

En Guatemala, se han realizado algunos estudios sobre este tema, Mejía (1986), realizó el estudio de la semilla de moringa como coagulante natural, reportando muy buenos resultados; sin embargo, la metodología realizada hace 30 años, hace que estos resultados no puedan compararse con los últimos estudios realizados. Entre las principales limitantes del estudio está la evaluación de únicamente dos turbiedades diferentes y que el tiempo de sedimentación empleado fue de 24 horas.

Martínez (1987), evaluó la fécula de maíz, en el cual concluye que sí es posible substituir hasta un 25 % del sulfato de aluminio en el proceso de coagulación-floculación. Únicamente se evaluó dos turbiedades diferentes, sin testigos y se hizo la prueba al reemplazar un 1/4 y 1/3 de la dosis óptima de sulfato de aluminio por fécula de maíz.

Moscozo (2015) realizó la evaluación del uso de almidón de yuca como coagulante natural, realizando diferentes combinaciones entre almidón de yuca y sulfato de aluminio, concluyendo que es posible substituir hasta en un 60 % del sulfato de aluminio. Cabe mencionar que ninguna combinación presentó mejor eficiencia que al utilizar únicamente sulfato de aluminio y no se utilizaron testigos.

Álvarez (2016), evaluó la capacidad de la semilla de tamarindo como coagulante, y esta semilla presentó un comportamiento aceptable en la remoción de turbiedad y color, aunque económicamente (como indica el autor) no es una propuesta factible. Tampoco se utilizaron testigos y las mejores eficiencias se reportaron utilizando un proceso de filtración al vacío.

Diversos estudios han demostrado que la actividad coagulante de las semillas de moringa es comparable con la obtenida por el uso de sulfato de aluminio, como los desarrollados por Mendoza *et al.*, 2000; Arnoldsson *et al.*, 2008 y Sandoval & Laines, 2013, pero no han utilizado testigos o el tiempo de sedimentación es de varias horas.

Finalmente, Olson y J. W., 2011, en su estudio afirma que los coagulantes orgánicos tienen la ventaja de no alterar las propiedades del agua tratada, por lo que recomienda su uso en poblaciones rurales como un sustituto eficaz, barato y sin riesgos para la salud para la población consumidora.

Tabla I. **Antecedentes de estudios realizados en ERIS**

<b>Coagulante natural evaluado</b>	<b>Semilla Moringa Oleífera</b>	<b>Fécula de maíz</b>	<b>Almidón de yuca</b>	<b>Semilla de tamarindo</b>
<b>Autor del estudio</b>	Mejía Guillén, Juan	Martínez Morán, Eddy	Moscozo Barrios, Luis	Álvarez Suazo, Tania
<b>Año</b>	1,986	1,987	2,015	2,016
<b>Tipo de agua utilizada</b>	Natural*	Natural*	Sintética**	Sintética**
<b>Turbiedades diferentes evaluadas</b>	2	2	60	24
<b>Rango de turbiedad (UNT)</b>	14 - 747	86 - 1,150	0 - 1,000	100 - 500
<b>Tiempo (min)</b>	0.5 y 5	1	1	1
<b>Velocidad (rpm)</b>	60 y 20	100	100	100
<b>Tiempo (min)</b>	10, 5 y 10	15	15	20
<b>Velocidad (rpm)</b>	20 y 25	40	40	30
<b>Sedimentación</b>	1 día	30 min	15 min	30 min

\* Agua tomada de la planta Lo de Coy

\*\* Turbiedad inducida por medio de arcilla tipo caolín

Fuente: elaboración propia, con datos de CIERIS.

## **ALCANCES Y LIMITACIONES**

### **Alcance**

- La investigación experimental se enfoca en determinar y evaluar la capacidad coagulante del polvo de semilla de moringa y comparar su eficiencia con la semilla de tamarindo, almidón de yuca (estudios previos realizados en ERIS) y sulfato de aluminio, para remover la turbiedad y el color aparente del agua destinada para consumo humano.

### **Limitantes**

- El agua a utilizar es agua proveniente del grifo ubicado en el Laboratorio de Química y Microbiología Sanitaria, Dra. Alba Tabarini Molina, ubicado en el segundo nivel del edificio T-5 de la Facultad de Ingeniería, Universidad de San Carlos de Guatemala, Ciudad Universitaria zona 12, Guatemala, Guatemala.
- La turbiedad del agua fue establecida a nivel de laboratorio por medio de la inclusión de arcilla caolín, con la cual se varió la turbiedad a niveles deseados, y pudiese tener comportamientos de sedimentación diferentes al del agua naturalmente turbia.
- Los resultados de la capacidad floculante de la semilla de tamarindo y del almidón de yuca, se obtuvieron de estudios previos realizados por estudiantes de ERIS, Álvarez (2016) y Moscozo (2015).

- Durante las pruebas de laboratorio, se registraron únicamente las variaciones en los valores de turbiedad, color aparente y pH.
- El sulfato de aluminio, al igual que el coagulante a base de polvo de semilla de moringa, se empleó a una concentración del 1 % por ser la concentración recomendada por los manuales de CEPIS, capítulo 11 y por facilidad de aplicación.
- Para el tiempo de floculación en la prueba de jarras, se usó una velocidad de 40 revoluciones por minuto, con una duración de 15 minutos, debido a que en los estudios previos se ha utilizado esos parámetros, y con la finalidad de comparar los resultados, estas condiciones deben ser similares.

## INTRODUCCIÓN

En ERIS se han realizado cuatro estudios, con el objetivo de evaluar la aplicación de coagulantes orgánicos en procesos de potabilización, la semilla de moringa (Mejía, 1986), fécula de maíz (Martínez, 1987), almidón de yuca (Moscozo, 2015) y semilla de tamarindo (Álvarez, 2016); sin embargo, el estudio realizado por Mejía (1986) utiliza una metodología distinta que no permite realizar comparaciones para concluir en relación a la viabilidad de aplicación de este tipo de coagulantes.

En la presente investigación, se realiza el estudio de la semilla de moringa como coagulante orgánico y la comparación de su eficiencia con el almidón de yuca y la semilla de tamarindo, para buscar alternativas a nivel domiciliario que puedan reducir los valores de turbiedad y color en fuentes de aguas superficiales, hasta los límites permisibles en la normativa guatemalteca.

En el capítulo primero, se incluyen los conceptos y descripciones generales, para ayudar al lector a comprender el proceso de floculación-coagulación, las características de la moringa y en qué consisten los parámetros de turbiedad y color, que son fundamentales para cumplir la normativa guatemalteca de agua para consumo humano.

En el segundo capítulo, se explican los materiales utilizados, cómo se induce turbiedad al agua para el presente estudio, la metodología empleada, qué incluye el número de pruebas necesarias, la preparación de las pruebas de jarras y la fase experimental, entre otros, donde se obtienen las dosis óptimas de coagulante para distintos rangos de turbiedad.

En el tercer capítulo, se presentan todos los resultados obtenidos como resultado de las pruebas de jarras a diferentes turbiedades, utilizando sulfato de aluminio, semilla de moringa, la combinación de estos, y sin la utilización de ningún coagulante, todos ellos a diferentes tiempos de sedimentación.

Por último, en el capítulo cuarto, se hace una interpretación y análisis de los resultados obtenidos, realizando los cálculos del porcentaje de eficiencia de remoción de turbiedad y color de la semilla de moringa y haciendo una comparación con el almidón de yuca y la semilla de tamarindo, con la ayuda de diferentes representaciones gráficas y tablas.

# **1. MARCO TEÓRICO**

## **1.1. Coagulación – floculación**

La coagulación-floculación es el proceso mediante el cual se añaden compuestos químicos al agua para reducir las fuerzas que mantienen estable a la materia suspendida, coloidal y disuelta, a fin de fomentar aglomerados que sean removidos del agua por sedimentación.

El proceso se lleva a cabo en dos etapas. En la primera o coagulación, las fuerzas interparticulares, responsables de la estabilidad de los coloides, son reducidas o anuladas por la adición de reactivos apropiados.

En la segunda o floculación, las colisiones entre las partículas favorecen el crecimiento de flóculos que pueden ser eliminados por sedimentación. Por ello, en la práctica, la primera etapa se realiza mediante un mezclado rápido para dispersar el coagulante y favorecer su contacto con las partículas en suspensión, en tanto que en la segunda se efectúa una mezcla lenta, con el fin de promover la formación y el aumento de tamaño o densidad de los flóculos formados (CONAGUA, 2011).

### **1.1.1. Coagulación**

Aunque el objetivo principal de la coagulación es remover, con la floculación, las partículas suspendidas del agua, también es útil para remover materia orgánica natural y algunos constituyentes inorgánicos disueltos (MWH, 2012).

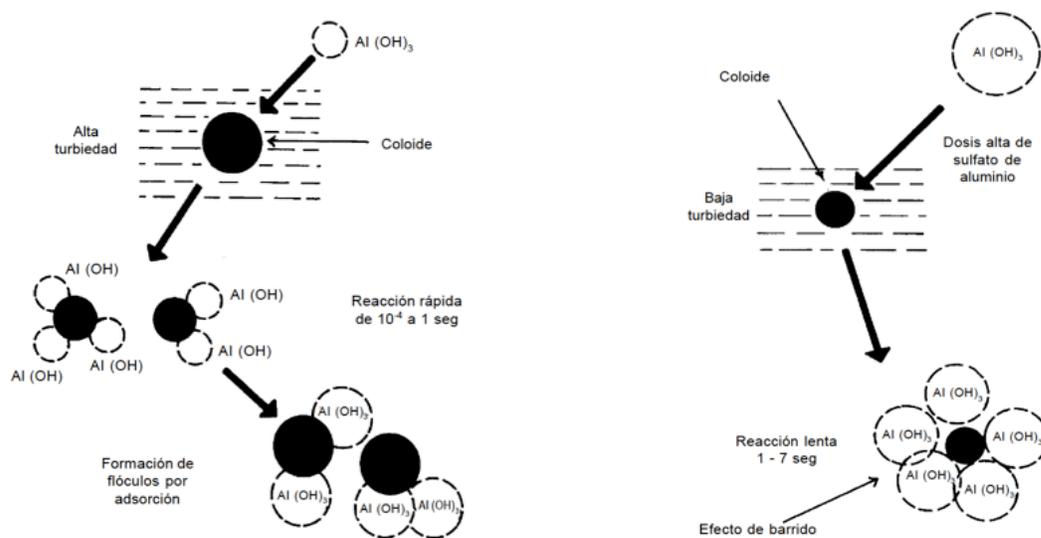
El término coagulación química se refiere a todas las reacciones y mecanismos involucrados en la desestabilización de partículas coloidales, de modo que se reduzcan las fuerzas coulómbicas de repulsión entre ellas.

La desestabilización química de coloides puede ser promovida mediante la adición de un químico llamado coagulante, el cual promueve la formación de flóculos. La efectividad de un agente coagulante está relacionada con su carga eléctrica (CONAGUA, 2011).

Entre los mecanismos de coagulación se puede citar los siguientes:

- Por neutralización de carga
- Por compresión de la doble capa
- Por adsorción y puente interparticular
- Por coprecipitación con hidróxidos metálicos o barrido

Figura 1. Tipos básicos de coagulación



Izquierda: coagulación por adsorción. Derecha: Coagulación por barrido

Fuente: manual I CEPIS/OPS (2004).

### **1.1.2. Ayudantes de coagulación**

Se utilizan cuando el proceso de coagulación no resulta eficiente, debido a que los coágulos sedimentan de manera muy lenta o son muy frágiles y se rompen en el proceso.

Actúan como coagulante, debido a que desestabilizan las partículas y promueven la formación de flóculos más grandes y resistentes. Entre los más empleados están: polímeros orgánicos, sílice activada, silicato de sodio, bentonita, arena fina, entre otros.

### **1.1.3. Floculación**

La floculación es el proceso mediante el cual una vez que las cargas de los coloides se han neutralizado, se propicia el contacto entre partículas mediante un mezclado suave que incrementa la tasa de encuentros o colisiones entre ellas, aglomerándose para formar flóculos y de esta manera facilitar su precipitación (Romero, 2006).

El mecanismo presenta dos etapas: pericinética y ortocinética; en la primera etapa, las partículas colisionan y permanecen juntas mientras se mueven bajo la influencia del movimiento browniano, las partículas crecen tan grandes que posteriormente dejan de ser afectadas por el movimiento browniano; en la segunda etapa, las partículas se mueven juntas bajo la influencia del movimiento del agua (Bradby, 2006).

La resistencia de los flóculos depende de varios factores, entre ellos: tamaño, forma, compactación, naturaleza de las micropartículas, cantidad y forma de los ligamentos que unen las partículas.

Tabla II. Principales coagulantes utilizados

Coagulante	Fórmula química	Peso molecular (g/mol)	Aplicación
Sulfato de aluminio	$\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 14\text{H}_2\text{O}$	594.4	Coagulante primario
Aluminato de sodio	$\text{Na}_2\text{Al}_2\text{O}_4$	163.9	Junto con sulfato de aluminio controla el pH y alcalinidad
Cloruro de aluminio	$\text{AlCl}_3$	160.3	Se usa mezclado con polímeros orgánicos
Policloruro de aluminio	$\text{Al}_a(\text{OH})_b(\text{Cl})_c(\text{SO}_4)_d$	Variable	Coagulante primario
Polisulfato de aluminio	$\text{Al}_a(\text{OH})_b(\text{Cl})_c(\text{SO}_4)_d$	Variable	Coagulante primario, producido in situ
Policloruro de hierro	$\text{Fe}_a(\text{OH})_b(\text{Cl})_c(\text{SO}_4)_d$	Variable	Coagulante primario, producido in situ
Cloruro férrico	$\text{FeCl}_3$	162.2	Coagulante primario
Sulfato férrico	$\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$	400	Coagulante primario

Fuente: MWH, 2012.

Figura 2. Formación de flóculos



Izquierda: formación de flóculos en mezcla lenta. Derecha: flóculos sedimentados

Fuente: Geovani Turcios, 2016.

#### 1.1.4. Factores que afectan la coagulación – floculación

Este proceso depende de varios factores, como el origen de la turbiedad, tipos de coagulante, pH y composición química del agua, condiciones de mezclado, entre otros. En la práctica únicamente se pueden controlar las dosis y el tipo de coagulantes y las condiciones de mezclado (tiempos, gradientes de velocidad).

#### 1.2. Color

Este parámetro es importante, ya que da una indicación rápida y perceptible de la calidad del agua. Junto con el olor y el sabor, determina en la mayoría de los casos la aceptación por parte del consumidor.

El color resulta de la presencia de diferentes sustancias como iones metálicos, naturales, humus y materia orgánica disuelta. Existen dos tipos de color: El color aparente, que es debido a las sustancias disueltas y a las partículas en suspensión.

Figura 3. Escala de turbiedad en NTU

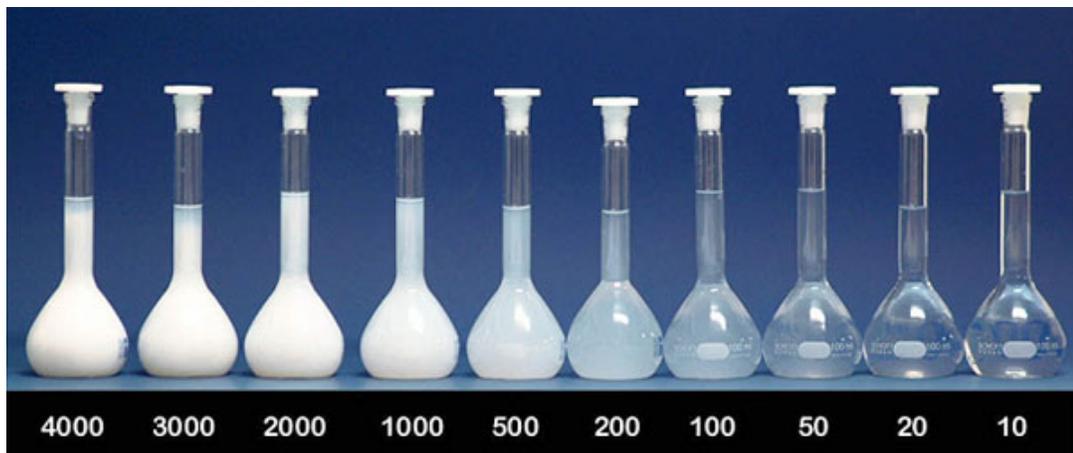


Imagen tomada de: <http://camblab.info/>

Se determina en la muestra original sin filtrarla o centrifugarla. Y el color real, que se determina cuando se han eliminado las partículas en suspensión por medio de filtración o centrifugado.

### **1.3. Turbiedad**

Se debe a la presencia de materia en suspensión, tanto orgánica como inorgánica, con lo cual, incrementa el color aparente. La turbiedad mide la pérdida de luz transmitida a través de la muestra por difracción de los rayos al chocar con las partículas.

No depende únicamente de la concentración de las partículas suspendidas, sino también de otros factores, como tamaño y forma de las partículas.

### **1.4. Coagulantes naturales**

El creciente desarrollo y uso de coagulantes naturales, extraídos a partir de microorganismos, tejidos de plantas o animales, son biodegradables y seguros para la salud humana, producen menos volumen de lodos, generando cantidades que van entre el 20-30 %, menor a las generadas por el empleo de agentes coagulantes metálicos, como el aluminio (Sciban et al, 2009).

Los agentes naturales son sustancias solubles en agua, procedentes de materiales de origen vegetal o animal que actúan de modo similar a los coagulantes y desinfectantes sintéticos, aglomerando las partículas en suspensión que contiene el agua cruda, facilitando su sedimentación y reduciendo la turbiedad inicial de esta.

Los agentes coagulantes y floculantes naturales, principalmente polisacáridos, son considerados ambientalmente amigables en comparación con los agentes orgánicos e inorgánicos, debido a su biodegradabilidad.

Son coagulantes alternativos que pueden tener rendimientos iguales o incluso superiores a los de origen sintético, además tienen un valor agregado relacionado con las características de biodegradabilidad que lo convierten en una alternativa viable desde el punto de vista ambiental. Algunos de los coagulantes de origen natural son almidones y polisacáridos naturales (Nieto y Orellana, 2011).

### **1.5. Moringa oleifera**

Es un árbol o arbusto pequeño, que crece rápidamente, mide entre 5 y 10 metros de altura. El tronco generalmente mide de 20 a 30 centímetros de diámetro.

En Guatemala es cultivado en clima cálido y se ha naturalizado en Chiquimula, El Progreso, Escuintla, Guatemala, Jutiapa, Petén, Retalhuleu, San Marcos, Santa Rosa, Suchitepéquez y Zacapa, en donde se siembra como cerco vivo y sombra de café (Cáceres, 1996).

Los frutos son cápsulas colgantes, secas, de color marrón, generalmente con tres ángulos fuertes, 20 - 50 cm de largo por 2-3 cm de ancho.

Las semillas de moringa son carnosas, de color pardo oscuro, globulares y de aproximadamente 1 cm de diámetro, con tres alas y una consistencia papirácea; su endospermo es blanquecino y muy oleaginoso.

Existen variaciones en los pesos de las semillas, de acuerdo con la variedad y las condiciones de crecimiento, una libra puede contener entre 1,000 y 3,000 semillas. Cada árbol puede producir entre 5,000 y 15,000 semillas por año.

Tabla III. **Análisis proximal de la semilla de moringa**

Análisis determinado	Promedio encontrado
Humedad (%)	47.2
Proteínas (%)	17.5
Grasas (%)	15.1
Cenizas (%)	2.1
Carbohidratos (%)	18.1
Energía (Kcal/100 g)	439
Calcio (mg/100 g)	3.4
Potasio (mg/100 g)	18.3
Hierro (mg/100 g)	7.1
Carotenos (ug/100 g)	114.4
Vitamina C (mg/100 g)	0.1

Fuente: Informes del Laboratorio de Composición de Alimentos, del Instituto de Nutrición de Centroamérica y Panamá (INCAP) Guatemala, 2006.

### 1.5.1. **Moringa oleifera como coagulante natural**

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, entre ellas:

- 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

#### **1.5.2. Método de coagulación de la semilla de moringa**

Según Ndabigengesere *et al.* (1995) las propiedades de coagulación de moringa se deben a las proteínas catiónicas solubles en agua encontradas en las semillas.

Estas proteínas son dímeros catiónicos densamente cargados que causan coagulación por adsorción y neutralización de carga (Ndabigengesere, 1998).

Reducen la energía electrostática de las partículas neutralizando la superficie negativamente cargada, de esta manera, las fuerzas atractivas de Van der Waals pueden dominar y causar la coagulación.

## **2. METODOLOGÍA**

### **2.1. Materiales**

Las características técnicas de los materiales empleados en la fase experimental, se describen a continuación:

#### **2.1.1. Agua empleada en el estudio**

El agua a utilizar se tomó directamente del grifo ubicado en el Laboratorio de Química y Microbiología Sanitaria, Dra. Alba Tabarini Molina, ubicado en el segundo nivel del edificio T-5 de la Facultad de Ingeniería, Universidad de San Carlos de Guatemala, ciudad Universitaria zona 12, Guatemala, Guatemala.

Para obtener la turbiedad deseada en el agua, se agregó diferentes cantidades de arcilla tipo caolín.

#### **2.1.2. Procedimiento para inducir la turbiedad en el agua utilizada**

El procedimiento utilizado considero la metodología empleada por Moscozo (2015) y Álvarez (2016), utilizando los pasos siguientes:

- Pesar los gramos de caolín correspondientes para la turbiedad deseada en una balanza digital
- Colocar dos litros de agua del grifo en cada una de las 6 jarras

- Adicionar el caolín al agua de cada jarra y mezclar por medio de la máquina de prueba de jarras por 2 minutos a 100 rpm, para obtener una mezcla homogénea y evitar que las partículas de caolín se sedimenten antes de agregar la solución coagulante.
- Tomar una muestra del agua preparada de una de las jarras y medir la turbiedad por medio del método nefelométrico utilizando un turbidímetro marca Hach® modelo 2100AN. Ver anexo 1 para especificaciones.
- Posteriormente medir el color aparente por medio del método platino-cobalto utilizando un fotómetro marca Merck modelo NOVA® 60. Ver anexo 2 para especificaciones.

Figura 4. **Caolín utilizado**



Izquierda: arcilla tipo caolín utilizado. Derecha: agua del grifo con turbiedad inducida

Fuente: Geovani Turcios, 2016.

Las cantidades de arcilla caolín aplicadas al agua para inducir la turbiedad en las pruebas de jarras, para las cuales se necesitaron quince turbiedades diferentes y se utilizaron para determinar las dosis óptimas de sulfato de aluminio y polvo de semilla de moringa, se detallan a continuación:

Tabla IV. **Caolín utilizado para determinar las dosis óptimas de coagulantes**

Rangos (UNT)	Turbiedad inducida (UNT)	Caolín utilizado (g/L)
<b>0 - 100</b>	28	0.10
	45	0.15
	69	0.20
<b>100 - 200</b>	134	0.40
	145	0.45
	172	0.50
<b>200 - 300</b>	240	0.70
	263	0.75
	286	0.80
<b>300 - 400</b>	332	0.90
	368	0.95
	384	1.00
<b>400 - 500</b>	429	1.10
	447	1.15
	491	1.20

Fuente: elaboración propia, con datos obtenidos en el laboratorio

Para el resto de pruebas de jarras, se necesitó veinticinco turbiedades distintas, en un rango de 0 a 500 UNT, las dosis de caolín utilizadas se detallan en la tabla V.

### 2.1.3. Obtención de la semilla de moringa

Las semillas de moringa se adquirieron por medio de la empresa dMoringa, ubicada en la 10<sup>a</sup>. Calle 9-68, Edificio Rosanca, oficina 413, zona 1, ciudad de

Guatemala, en la presentación de 1 libra, conteniendo un promedio de 1,600 semillas secas por libra.

Tabla V. **Caolín utilizado para determinar las dosis óptimas de coagulantes**

Rangos (UNT)	Turbiedad inducida (UNT)	Caolín utilizado (g/L)
<b>0 - 100</b>	22	0.07
	35	0.12
	59	0.17
	77	0.22
	94	0.27
<b>100 - 200</b>	116	0.32
	129	0.37
	144	0.42
	164	0.47
	173	0.52
<b>200 - 300</b>	206	0.57
	225	0.62
	238	0.67
	261	0.72
	279	0.77
<b>300 - 400</b>	301	0.82
	326	0.87
	346	0.92
	372	0.97
	387	1.02
<b>400 - 500</b>	417	1.07
	438	1.12
	451	1.17
	486	1.22
	499	1.27

Fuente: elaboración propia, con datos obtenidos en el laboratorio.

Para obtener la solución de coagulante al 1% se siguieron los siguientes pasos:

- Remoción de la cáscara color castaño de la semilla, dejando únicamente la semilla cubierta por un endospermo blanquecino.
- Licuado en seco por medio de una licuadora para uso doméstico, durante 5 minutos. Obteniendo de esta forma, el polvo fino de semillas de moringa.
- En un vaso de precipitar agregar 200 ml de agua destilada y adicionar 2 gramos de polvo de moringa.
- Mezclado durante 10 minutos a 60 revoluciones por minuto, mediante un agitador magnético marca Penta.

Figura 5. **Semilla de moringa**



Izquierda: semilla de moringa. Derecha: Cáscara removida de la semilla

Fuente: Geovani Turcios, 2016.

Figura 6. **Polvo de semilla de moringa**



Izquierda: semilla sin cáscara. Derecha: polvo de la semilla

Fuente: Geovani Turcios, 2016.

La mezcla homogénea resultante fue tamizada por medio de un colador metálico de uso doméstico. La solución resultante fue utilizada de acuerdo con las diferentes dosis propuestas en la fase experimental, para determinar la eficiencia de la semilla de moringa como coagulante orgánico.

Figura 7. **Polvo de semilla de moringa**



Izquierda: mezclador magnético utilizado. Derecha: solución utilizada al 1 %

Fuente: Geovani Turcios, 2016.

## 2.2. Cálculo para la remoción de turbiedad y color aparente

En los estudios previos realizados en ERIS, se realizó el cálculo del porcentaje de la remoción de turbiedad y color aparente utilizando el valor inicial y el valor residual únicamente, sin tener ningún valor de control o testigo. Para ello utilizaron la siguiente ecuación:

$$\text{Porcentaje de remoción} = \left( \frac{\text{valor inicial} - \text{valor residual}}{\text{valor inicial}} \right) \times 100$$

No contar con valores de control puede inducir a un sesgo derivado que las partículas pueden sedimentar de forma natural, a través del tiempo y esto puede generar una reducción de turbiedad y color aparente, que no está siendo medida en los estudios.

Derivado de este análisis, se decidió utilizar los valores control, para reportar el porcentaje de remoción que se debe únicamente al proceso de coagulación-floculación producida por el coagulante utilizado, conforme la ecuación siguiente:

$$\text{Porcentaje de remoción real} = \left( \frac{\text{valor control} - \text{valor residual}}{\text{valor control}} \right) \times 100$$

Sin embargo, con el objetivo de comparar los resultados del presente estudio con los realizados anteriormente en ERIS, para ello se optó por realizar el cálculo de ambas maneras.

Para el cálculo de los porcentajes de remoción, los valores no pueden ser mayor a 100 %, que indicaría remoción total y si se diera algún valor negativo, se

colocará un valor de cero, que indicaría que no hubo ninguna disminución en los valores.

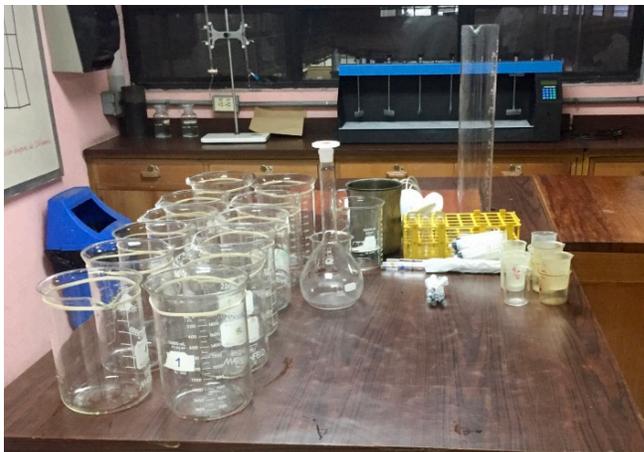
## 2.3. Método

### 2.3.1. Preparación de la prueba de jarras

La prueba de jarras es el mejor método para controlar la dosis correcta de sustancia químicas que deben aplicarse para coagular el agua y simular las condiciones reales de una planta potabilizadora, pese a las diferencias existentes con un proceso real.

Estas pruebas fueron desarrolladas bajo lo establecido en la Norma ASTM D 2035-08 Standard Practice for Coagulation-Flocculation Jar Test of Water. El equipo utilizado es modelo Phipps & Bird modelo PB-900.

Figura 8. **Cristalería utilizada para la prueba de jarras**



Fuente: Geovani Turcios, 2016.

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

- Distribución del agua preparada en las seis jarras de dos litros cada una.
- Ajuste de la velocidad de las paletas a 100 revoluciones por minuto para efectuar la mezcla rápida.

**Figura 9. Equipo utilizado para la prueba de jarras**



Fuente: Geovani Turcios, 2016.

- Dosificación del coagulante, con un tiempo de mezcla rápida de un minuto.
- Ajuste de la velocidad de las paletas a 40 revoluciones por minuto para simular la mezcla lenta, por 15 minutos.
- Sedimentación del floculo en un tiempo de 15, 30 y 60 minutos.
- Toma de muestras en los 3 tiempos de sedimentación por medio de un flotador con sifón invertido.

La turbiedad residual se midió con un turbidímetro Hach modelo 2100AN expresando los valores en unidades nefelométricas (UNT). El color residual aparente se midió por medio del fotómetro Merck NOVA 60 expresado en unidades de color (u Pt-Co).

Figura 10. Toma de muestras



Muestras tomadas por medio de jeringas y flotador con sifón invertido.

Fuente: Geovani Turcios, 2016.

Figura 11. Soluciones al 1 % utilizadas



Izquierda: solución de polvo de semilla de moringa. Derecha: solución de sulfato de aluminio.

Fuente: Geovani Turcios, 2016.

Figura 12. **Dosificación de coagulante**



Dosificación de solución coagulante por medio de jeringas. A la derecha toma de muestras para la respectiva medición de turbiedad.

Fuente: Geovani Turcios, 2016.

## **2.4. Fase experimental**

Utilizando la solución de sulfato de aluminio y de polvo de semilla de moringa con una concentración del 1% y obteniendo el agua con turbiedad sintética por medio de la adición de arcilla caolín, se realizó la fase experimental de la investigación.

### **2.4.1. Determinación de la dosis óptima con sulfato de aluminio**

Utilizando una solución madre al 1 %, es decir, 10 gramos de sulfato de aluminio en 1 litro de agua destilada. Se preparó muestras con diferentes valores de turbiedad y se siguió el proceso de la prueba de jarras anteriormente descrita.

Variando las dosis de sulfato de aluminio ( $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ ) desde los 5 hasta los 70 mg/L, los valores obtenidos de las dosis óptimas de polvo de semilla de moringa, en términos de turbiedad se muestran en la tabla VI.

Tabla VI. **Dosis óptima de sulfato de aluminio en función de la turbiedad**

To (UNT)	Dosis en mg/L de Sulfato de Aluminio $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$															
	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60	65	70	75	80	85	90
28	3.3	1.6	1.4	0.7	0.5	0.4										
45			1.0	1.0	0.6	0.5	0.4	0.4								
69			0.7	0.6	0.5	0.4	0.6	0.3								
134					0.9	0.9	0.5	0.4	0.3	0.3						
145					1.0	0.5	0.4	0.4	0.4	0.4						
172					1.1	0.6	0.5	0.4	0.5	0.4						
240							1.1	0.8	0.6	0.7	0.5	0.5				
263							1.1	0.9	0.7	0.6	0.6	0.5				
286							1.0	0.8	0.7	0.7	0.4	0.8				
332									1.1	0.7	0.6	0.5	0.4	0.6		
368									1.1	0.9	0.7	0.7	0.6	0.6		
384									0.8	0.6	0.7	0.6	0.5	0.4		
429											1.0	0.7	0.7	0.6	0.4	0.6
447											0.9	0.6	0.5	0.4	0.3	0.3
491											0.8	0.7	0.6	0.4		
<b>Turbiedad final (UNT)</b>																

Fuente: elaboración propia, con datos obtenidos en pruebas de laboratorio.

### 2.4.2. Determinación de la dosis óptima con polvo de semilla de moringa

De la misma forma que el sulfato de aluminio, se utilizó una solución al 1% de polvo de semilla de moringa, aplicando el coagulante a muestras con diferentes turbiedades y variando las dosis desde los 5 hasta los 70 mg/L, los valores obtenidos de las dosis óptimas de polvo de semilla de moringa, en términos de turbiedad se muestran en la tabla VII.

Tabla VII. **Dosis óptima de polvo de semilla de moringa en función de la turbiedad**

To (UNT)	Dosis en mg/L de moringa														
	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60	65	70	
28	18	17	17	17	18	17									
45	27	27	26	27	26	25									
69	32	32	31	32	33	28									
134			45	46	51	52	46	45							
145			35	36	56	60	67	66							
172			52	57	63	67	68	62							
240				41	33	41	40	42	43						
263				69	65	46	57	57	61						
286				70	57	62	53	59	60						
332						73	71	67	62	64	53				
368						57	53	54	53	60	68				
384						63	56	59	61	58	56				
429									50	52	53	55	56	48	
447									48	48	59	64	66	61	
491									51	58	63	65	63	62	
<b>Turbiedad final (UNT)</b>															

Fuente: elaboración propia, con datos obtenidos en pruebas de laboratorio.

### 2.4.3. Combinación de sulfato de aluminio y semilla de moringa

Al determinar la dosis óptima de sulfato de aluminio y de semilla de moringa, se combinan estas dos soluciones coagulantes, siguiendo la metodología de la prueba de jarras anteriormente descrita.

Con la finalidad de determinar qué porcentaje de sulfato de aluminio puede ser sustituido por semilla de moringa, se realiza la mezcla de sulfato de aluminio ( $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ ) con el coagulante a base de semilla de moringa, según se indica en la tabla VIII.

Tabla VIII. **Combinaciones de sustitución de sulfato de aluminio con semilla de moringa**

Combinación	Porcentaje de $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$	Porcentaje de polvo de semilla de moringa
1	100%	0%
2	80%	20%
3	60%	40%
4	40%	60%
5	20%	80%
6	0%	100%

Fuente: elaboración propia.

### 2.4.4. Determinación del número de muestras

La reducción de los valores de la turbiedad y color utilizando polvo de semilla de moringa, no es un evento aleatorio.

Es posible realizar el cálculo del número de muestras para que el estudio sea estadísticamente representativo con base a la prueba de distribución binomial, por medio de una prueba de hipótesis estadística.

Los antecedentes indican que la utilización de la semilla de moringa debe disminuir la turbiedad y color en las muestras, se puede asumir que la probabilidad de éxito será, como mínimo del 70% (este valor también llamado poder estadístico de la prueba, regularmente oscila entre 70% y 85%).

Al tomar un nivel de significancia ( $\alpha$ ) de 0.05, es decir, la probabilidad de cometer un error tipo I, que sucede cuando se rechaza la hipótesis nula cuando en realidad es verdadera.

Datos:

$H_0: p = 0.70$  (hipótesis nula)

$H_a: p > 0.70$  (hipótesis alternativa)

$\alpha = 0.05$  (nivel de significancia)

$x = 25$  (numero de ensayos)

$n = 25$  (numero de éxitos)

$$P = \alpha = \binom{n}{x} p^x q^{n-x}$$

$$\alpha = \binom{25}{25} 0.7^{25} 0.3^0 = 0.000134$$

La probabilidad que el evento estudiado sea aleatorio es de 0.000134, por lo cual se puede afirmar que, si los 25 ensayos son exitosos, la disminución de la turbiedad y el color son consecuencia de la adición del coagulante utilizado.

Como el resultado del nivel de significancia es menor al valor propuesto (0.05), se puede permitir incluso que 3 de los 25 ensayos no sean satisfactorios. Como se muestra a continuación:

$$\alpha = \binom{25}{22} 0.7^{22} 0.3^3 = 0.0243$$

$$0.0243 < 0.05 \text{ (valor propuesto)}$$

El número de pruebas será de 25, pudiendo ser 3 de ellas no exitosas.

Las 25 pruebas abarcan un rango de turbiedad desde 0 a 500 UNT, se tendrá 5 rangos de turbiedad de 100 unidades, con 5 pruebas en cada uno de ellos.

### 3. RESULTADOS

Se desarrollaron 25 pruebas de jarras a diferentes turbiedades en un rango desde 0 a 500 UNT para el coagulante a base de polvo de semilla de moringa, sulfato de aluminio y 4 combinaciones de estas, como se indicó en la tabla VIII.

Adicionalmente, se efectuaron 25 pruebas sin coagulante siguiendo la misma metodología, para determinar la disminución de turbiedad y color únicamente por sedimentación, los cuales sirvieron como testigos.

Las dosis óptimas de sulfato de aluminio y polvo de semilla de moringa para los diferentes rangos de turbiedad, fueron establecidas a través de pruebas de jarras, quedando establecidas conforme se detalla en la tabla IX.

Tabla IX. **Dosis óptimas de coagulante**

Rangos de turbiedad (NTU)	Dosis en mg/L de $Al_2(SO_4)_3$	Dosis en mg/L de semilla de moringa
0 - 100	30	30
100 - 200	40	40
200 - 300	50	50
300 - 400	60	60
400 - 500	70	70

Fuente: elaboración propia.

Se muestran a continuación los resultados obtenidos de turbiedad y color aparente residual a diferentes tiempos de sedimentación, sin la aplicación de coagulantes (testigos), utilizando sulfato de aluminio, polvo de semilla de moringa y cuatro combinaciones a diferentes proporciones entre estos.

Tabla X. **Turbiedad y color aparente residual sin aplicar coagulante (testigos)**

No.	Caolín (g/L)	Turbiedad inicial (UNT)	Color inicial (u Pt-Co)	Sedimentación (minutos)							
				Turbiedad residual (UNT)				Color residual (u Pt-Co)			
				0	15	30	60	0	15	30	60
1	0.07	22	30	16	13	11	8	23	20	17	14
2	0.12	35	52	27	23	19	16	40	37	33	30
3	0.17	59	83	49	36	30	26	64	61	57	52
4	0.22	77	97	69	41	34	30	77	73	69	65
5	0.27	94	119	84	49	41	34	93	83	78	71
6	0.32	116	132	97	61	44	37	114	98	79	73
7	0.37	129	149	110	66	43	27	122	107	78	59
8	0.42	144	160	120	76	46	26	152	119	83	60
9	0.47	164	196	130	51	37	27	161	101	82	62
10	0.52	173	214	152	77	51	30	188	125	99	66
11	0.57	206	234	170	89	56	31	202	135	107	70
12	0.62	225	245	186	93	53	30	224	142	109	68
13	0.67	238	255	174	142	108	64	232	211	190	132
14	0.72	261	281	181	149	112	62	241	207	196	139
15	0.77	279	296	208	164	121	69	275	202	193	144
16	0.82	296	340	221	169	119	76	282	209	201	171
17	0.87	326	356	227	186	132	82	271	216	202	189
18	0.92	346	359	246	201	146	86	287	227	213	197
19	0.97	372	378	254	236	174	122	354	322	281	243
20	1.02	387	396	272	226	172	121	362	332	296	251
21	1.07	417	408	307	262	194	144	376	339	305	277
22	1.12	438	426	294	224	151	126	384	342	311	289
23	1.17	451	432	307	247	167	138	392	337	286	261
24	1.22	486	450	342	267	179	141	399	350	298	273
25	1.27	499	462	353	283	198	145	397	339	294	267

Fuente: elaboración propia, con datos obtenidos en pruebas de laboratorio.

Tabla XI. **Turbiedad y color aparente residual aplicando sulfato de aluminio**

No.	Caolín (g/L)	Dosis $Al_2(SO_4)_3$ (mg/L)	T inicial (UNT)	Color inicial (u Pt-Co)	Sedimentación (minutos)													
					Turbiedad residual (UNT)			Color residual (u Pt-Co)			Turbiedad residual (UNT)			Color residual (u Pt-Co)				
					0	15	30	60	0	15	30	60	0	15	30	60		
1	0.07	30	22	30		1.7	1.3	1.1								2	2	2
2	0.12	30	35	52		0.9	0.8	0.6								1	1	1
3	0.17	30	59	83		0.8	0.7	0.5								3	2	1
4	0.22	30	77	97		1.2	1.1	1.0								1	1	1
5	0.27	30	94	119		1.4	1.1	1.0								3	3	2
6	0.32	40	116	132		1.8	1.5	1.2								4	3	3
7	0.37	40	129	149		0.6	0.6	0.5								2	2	1
8	0.42	40	144	160		0.5	0.4	0.4								2	2	1
9	0.47	40	164	196		0.6	0.5	0.5								1	1	1
10	0.52	40	173	214		1.5	1.4	1.0								1	1	1
11	0.57	50	206	234		1.9	1.8	1.5						86		6	2	1
12	0.62	50	225	245		1.6	1.3	0.9						54		1	1	1
13	0.67	50	238	255		1.6	1.1	1.0						129		1	1	1
14	0.72	50	261	281		1.7	1.1	1.1						100		1	1	1
15	0.77	50	279	296		1.6	1.1	1.0						173		1	1	1
16	0.82	60	296	340		1.1	1.0	1.6						222		1	1	1
17	0.87	60	326	356		1.6	1.4	0.9						98		1	1	1
18	0.92	60	346	359		1.0	1.1	1.0						147		2	2	2
19	0.97	60	372	378		1.9	2.4	1.8						168		4	2	2
20	1.02	60	387	396		1.6	1.4	1.4						170		2	2	1
21	1.07	70	417	408		2.6	2.3	2.4						258		5	5	3
22	1.12	70	438	426		1.8	1.7	1.3						214		2	1	1
23	1.17	70	451	432		3.2	1.1	1.0						163		4	2	2
24	1.22	70	486	450		2.5	2.2	1.9						206		4	3	1
25	1.27	70	499	462		2.1	2.2	1.5						203		2	1	1

Fuente: elaboración propia, con datos obtenidos en pruebas de laboratorio.

Tabla XII. **Turbiedad y color aparente residual aplicando polvo de semilla de moringa**

No.	Caolín (g/L)	Dosis moringa (mg/L)	T inicial (UNT)	Color inicial (u Pt-Co)	Sedimentación (minutos)								
					Turbiedad residual (UNT)				Color residual (u Pt-Co)				
					0	15	30	60	0	15	30	60	
1	0.07	30	22	30	22	16	13	11	11	23	20	17	14
2	0.12	30	35	52	35	27	23	19	19	40	37	31	26
3	0.17	30	59	83	59	45	36	30	30	64	61	52	43
4	0.22	30	77	97	77	53	41	34	34	77	73	61	54
5	0.27	30	94	119	94	64	50	41	41	93	83	71	60
6	0.32	40	116	132	116	75	61	56	56	114	106	89	74
7	0.37	40	129	149	129	97	78	64	64	122	118	101	92
8	0.42	40	144	160	144	110	84	70	70	152	132	114	102
9	0.47	40	164	196	164	121	82	71	71	161	142	121	108
10	0.52	40	173	214	173	134	108	80	80	181	168	148	141
11	0.57	50	206	234	206	148	125	89	89	202	176	165	155
12	0.62	50	225	245	225	155	137	109	109	217	194	171	161
13	0.67	50	238	255	238	198	121	74	74	229	172	119	82
14	0.72	50	261	281	261	202	117	88	88	237	164	155	106
15	0.77	50	279	296	279	210	104	55	55	235	138	97	67
16	0.82	60	296	340	296	240	129	82	82	305	172	138	109
17	0.87	60	326	356	326	262	101	55	55	300	150	103	92
18	0.92	60	346	359	346	276	82	65	65	297	141	92	79
19	0.97	60	372	378	372	310	84	67	67	336	143	97	84
20	1.02	60	387	396	387	324	127	77	77	330	185	151	118
21	1.07	70	417	408	417	323	114	92	92	349	152	139	122
22	1.12	70	438	426	438	335	94	51	51	401	165	144	131
23	1.17	70	451	432	451	404	154	72	72	344	216	169	121
24	1.22	70	486	450	486	367	108	48	48	387	195	152	139
25	1.27	70	499	462	499	393	119	54	54	385	178	133	124
Promedio:				250	262	250	196	92	62	223	139	113	96

Fuente: elaboración propia, con datos obtenidos en pruebas de laboratorio

Tabla XIII. **Turbiedad y color aparente residual combinación 2**

No.	Caolín (g/L)	Dosis Al <sub>2</sub> (SO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub> (mg/L)	Dosis moringa (mg/L)	T inicial (UNT)	Color inicial (u Pt-Co)	Sedimentación (minutos)					
						T residual (UNT)			C residual (u Pt-Co)		
						15	30	60	15	30	60
1	0.07	30	6	22	30	1.9	1.2	1.1	3	3	3
2	0.12	30	6	35	52	1.6	0.8	0.8	<1	<1	<1
3	0.17	30	6	59	83	1.3	1.1	1.1	3	2	<1
4	0.22	30	6	77	97	1.4	1.3	1.1	2	2	2
5	0.27	30	6	94	119	1.7	1.3	1.3	3	3	3
6	0.32	40	8	116	132	1.6	1.6	1.7	4	4	3
7	0.37	40	8	129	149	0.8	0.8	0.8	2	2	1
8	0.42	40	8	144	160	1.0	1.0	0.9	5	5	2
9	0.47	40	8	164	196	1.1	1.1	1.1	<1	<1	<1
10	0.52	40	8	173	214	1.6	1.2	1.2	<1	<1	<1
11	0.57	50	10	206	234	2.1	1.7	1.5	2	<1	<1
12	0.62	50	10	225	245	2.2	1.6	1.4	<1	<1	<1
13	0.67	50	10	238	255	1.8	1.4	0.9	1	<1	<1
14	0.72	50	10	261	281	2.1	1.3	1.1	<1	<1	<1
15	0.77	50	10	279	296	1.8	1.5	1.3	<1	<1	<1
16	0.82	60	12	296	340	1.8	1.3	0.8	<1	<1	<1
17	0.87	60	12	326	356	2.0	1.6	1.1	<1	<1	<1
18	0.92	60	12	346	359	1.4	1.2	1.3	2	2	<1
19	0.97	60	12	372	378	1.8	1.2	1.4	3	3	2
20	1.02	60	12	387	396	1.5	1.2	1.2	1	1	<1
21	1.07	70	14	417	408	1.6	1.5	1.5	1	<1	<1
22	1.12	70	14	438	426	1.4	1.4	1.0	1	<1	<1
23	1.17	70	14	451	432	2.3	1.6	0.8	3	2	2
24	1.22	70	14	486	450	2.2	1.7	1.2	2	1	1
25	1.27	70	14	499	462	2.2	1.0	0.9	1	<1	<1

**Sulfato 80% Moringa 20%**

Fuente: elaboración propia, con datos obtenidos en pruebas de laboratorio.

Tabla XIV. **Turbiedad y color aparente residual combinación 3**

No.	Caolín (g/L)	Dosis Al <sub>2</sub> (SO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub> (mg/L)	Dosis Moringa (mg/L)	T inicial (UNT)	Color inicial (u Pt-Co)	Sedimentación (minutos)					
						T residual (UNT)			C residual (u Pt-Co)		
						15	30	60	15	30	60
1	0.07	18	12	22	30	2.7	2.3	1.5	6	4	3
2	0.12	18	12	35	52	1.9	1.4	1.2	2	1	1
3	0.17	18	12	59	83	2.2	1.9	1.8	4	3	3
4	0.22	18	12	77	97	2.9	2.3	2.1	3	3	2
5	0.27	18	12	94	119	3.4	2.7	2.1	6	5	5
6	0.32	24	16	116	132	2.1	2.1	1.9	5	8	4
7	0.37	24	16	129	149	1.2	1.2	1.1	5	4	1
8	0.42	24	16	144	160	1.6	1.5	1.2	5	5	1
9	0.47	24	16	164	196	2.4	1.6	1.5	<1	<1	<1
10	0.52	24	16	173	214	2.1	1.4	1.2	<1	<1	<1
11	0.57	30	20	206	234	2.3	1.8	1.6	2	<1	<1
12	0.62	30	20	225	245	3.1	2.2	1.9	<1	<1	<1
13	0.67	30	20	238	255	2.0	1.8	1.4	2	<1	<1
14	0.72	30	20	261	281	2.1	1.8	1.5	1	<1	<1
15	0.77	30	20	279	296	2.1	1.2	1.9	<1	<1	<1
16	0.82	36	24	296	340	2.0	1.7	1.4	<1	<1	<1
17	0.87	36	24	326	356	2.5	1.8	1.6	1	<1	<1
18	0.92	36	24	346	359	1.7	1.3	1.4	2	2	1
19	0.97	36	24	372	378	2.6	1.6	2.1	2	3	1
20	1.02	36	24	387	396	1.9	1.2	1.6	1	<1	<1
21	1.07	42	28	417	408	1.8	1.5	1.6	1	<1	<1
22	1.12	42	28	438	426	2.0	2.1	1.9	<1	<1	<1
23	1.17	42	28	451	432	2.0	1.5	1.4	4	2	2
24	1.22	42	28	486	450	1.9	1.6	1.5	1	1	<1
25	1.27	42	28	499	462	3.2	2.0	1.7	2	<1	<1

**Sulfato 60% Moringa 40%**

Fuente: elaboración propia, con datos obtenidos en pruebas de laboratorio.

Tabla XV. **Turbiedad y color aparente residual combinación 4**

No.	Caolín (g/L)	Dosis Al <sub>2</sub> (SO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub> (mg/L)	Dosis Moringa (mg/L)	T inicial (UNT)	Color inicial (u Pt-Co)	Sedimentación (minutos)					
						T residual (UNT)			C residual (u Pt-Co)		
						15	30	60	15	30	60
1	0.07	12	18	22	30	8.6	6.1	4.5	24	16	10
2	0.12	12	18	35	52	8.5	5.0	3.9	22	13	9
3	0.17	12	18	59	83	7.5	4.5	3.9	14	9	8
4	0.22	12	18	77	97	14.0	7.2	5.5	22	13	11
5	0.27	12	18	94	119	14.0	7.8	5.7	23	16	13
6	0.32	16	24	116	132	5.3	5.2	4.1	14	13	10
7	0.37	16	24	129	149	9.4	6.1	5.3	16	16	10
8	0.42	16	24	144	160	7.1	4.9	4.5	19	14	8
9	0.47	16	24	164	196	5.3	4.1	4.2	5	5	4
10	0.52	16	24	173	214	5.4	4.1	5.0	10	6	5
11	0.57	20	30	206	234	5.1	4.2	3.9	7	5	4
12	0.62	20	30	225	245	5.3	3.5	2.9	8	4	4
13	0.67	20	30	238	255	5.7	5.0	2.0	2	2	<1
14	0.72	20	30	261	281	6.0	3.2	2.8	5	3	2
15	0.77	20	30	279	296	4.6	3.4	2.1	2	<1	<1
16	0.82	24	36	296	340	3.5	2.1	2.2	2	1	1
17	0.87	24	36	326	356	5.0	2.1	2.1	3	<1	<1
18	0.92	24	36	346	359	2.5	2.1	2.2	4	4	3
19	0.97	24	36	372	378	4.3	3.0	2.6	5	4	4
20	1.02	24	36	387	396	3.4	3.2	2.5	4	3	3
21	1.07	28	42	417	408	3.4	3.1	2.0	12	8	6
22	1.12	28	42	438	426	3.0	2.3	2.0	3	3	<1
23	1.17	28	42	451	432	4.8	2.3	1.7	4	4	3
24	1.22	28	42	486	450	2.6	2.3	2.5	4	2	1
25	1.27	28	42	499	462	4.4	2.6	2.3	6	3	2

**Sulfato 40% Moringa 60%**

Fuente: elaboración propia, con datos obtenidos en pruebas de laboratorio.

Tabla XVI. **Turbiedad y color aparente residual combinación 5**

No.	Caolín (g/L)	Dosis Al <sub>2</sub> (SO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub> (mg/L)	Dosis Moringa (mg/L)	T inicial (UNT)	Color inicial (u Pt-Co)	Sedimentación (minutos)					
						T residual (UNT)		C residual (u Pt-Co)		C residual (u Pt-Co)	
						15	30	60	15	30	60
1	0.07	6	24	22	30	15.0	13.0	10.5	33	31	31
2	0.12	6	24	35	52	16.0	13.0	12.0	42	38	35
3	0.17	6	24	59	83	20.0	16.0	15.0	50	44	42
4	0.22	6	24	77	97	28.0	26.0	19.0	59	49	39
5	0.27	6	24	94	119	40.0	32.0	25.0	79	72	65
6	0.32	8	32	116	132	39.0	29.0	20.0	90	76	58
7	0.37	8	32	129	149	66.0	46.0	28.0	100	88	65
8	0.42	8	32	144	160	51.0	44.0	32.0	89	85	70
9	0.47	8	32	164	196	45.0	26.0	22.0	79	59	47
10	0.52	8	32	173	214	38.0	22.0	17.0	63	50	42
11	0.57	10	40	206	234	29.0	21.0	16.0	58	46	36
12	0.62	10	40	225	245	36.0	21.0	17.0	66	48	37
13	0.67	10	40	238	255	19.8	11.0	8.4	25	19	13
14	0.72	10	40	261	281	21.0	10.0	9.6	31	22	18
15	0.77	10	40	279	296	14.0	7.0	5.6	19	13	9
16	0.82	12	48	296	340	19.0	11.0	9.7	33	18	15
17	0.87	12	48	326	356	17.0	10.0	8.5	26	17	14
18	0.92	12	48	346	359	14.0	12.0	11.0	29	27	26
19	0.97	12	48	372	378	16.0	8.0	9.4	25	21	18
20	1.02	12	48	387	396	10.8	7.6	5.3	19	16	11
21	1.07	14	56	417	408	10.2	8.1	8.0	20	18	13
22	1.12	14	56	438	426	12.4	7.3	6.1	16	12	9
23	1.17	14	56	451	432	23.0	6.6	4.7	29	14	11
24	1.22	14	56	486	450	11.0	7.5	7.8	22	16	12
25	1.27	14	56	499	462	12.0	7.1	6.1	18	13	11

**Sulfato 20% Moringa 80%**

Fuente: elaboración propia, con datos obtenidos en pruebas de laboratorio.

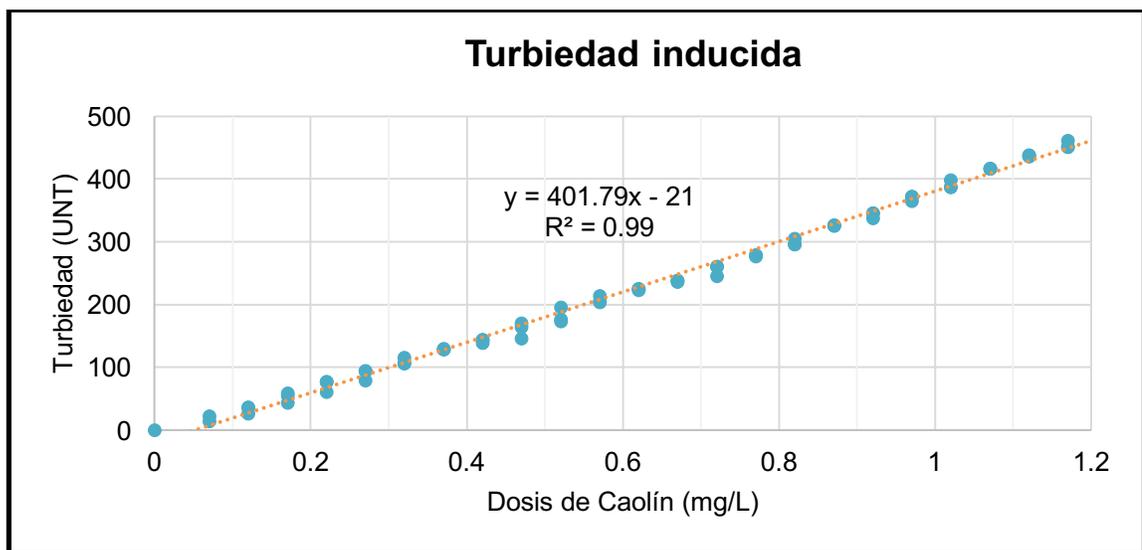
## 4. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

### 4.1. Turbiedad inducida por medio de caolín

La turbiedad inducida se comporta de manera proporcional a la cantidad de caolín aplicado. Es un comportamiento lineal con un coeficiente de correlación de 0.99. Para obtener la siguiente grafica se utilizaron 76 datos obtenidos en el laboratorio aplicando caolín al agua del grifo con turbiedades iniciales menores a una UNT.

Debido a que la arcilla caolín utilizada sedimenta naturalmente en el agua, la turbiedad y el color aparente disminuyen conforme pasa el tiempo, por lo que las muestras para realizar las lecturas deben tomarse cuando la mezcla sea homogénea, pudiera ser en el proceso o justo al finalizar el mezclado.

Figura 13. Turbiedad inducida por medio de caolín



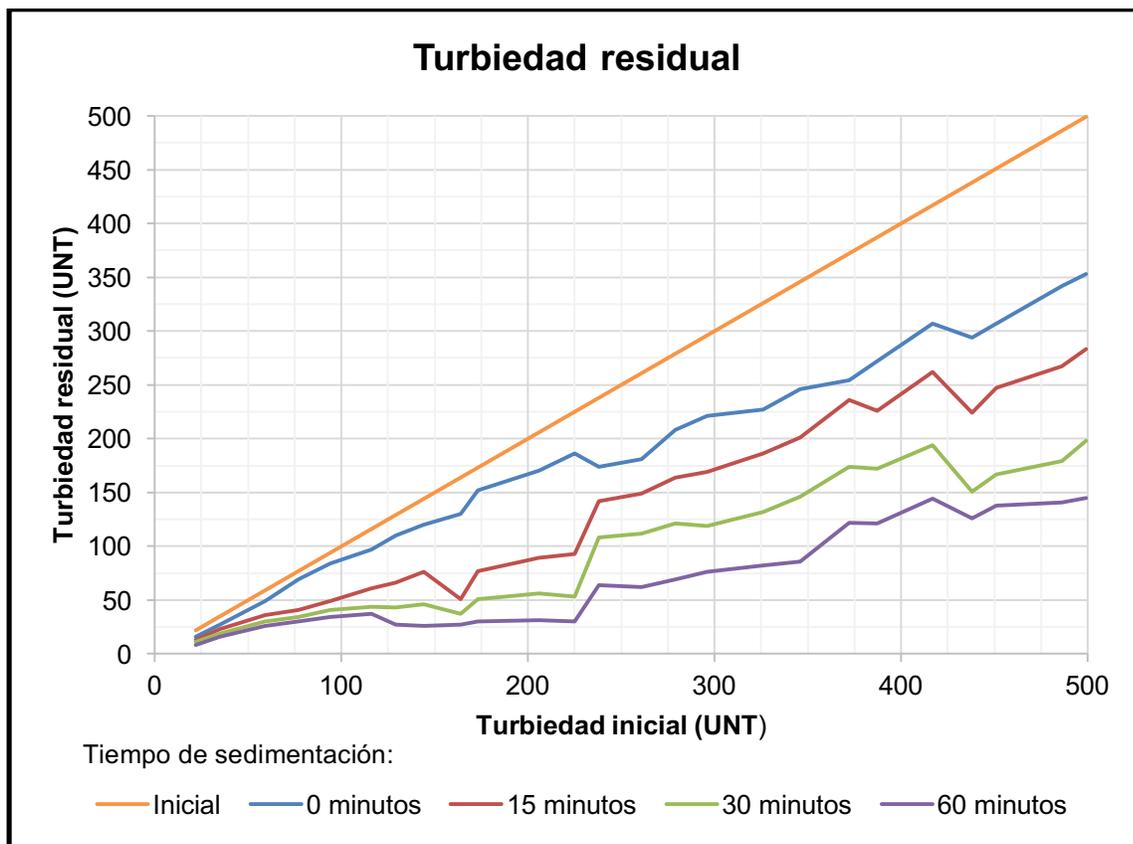
Fuente: elaboración propia, con datos obtenidos en el laboratorio.

## 4.2. Turbiedad y color aparente residual sin aplicar coagulantes

El análisis realizado para determinar el comportamiento de la turbiedad y color aparente sin aplicar coagulantes fue desarrollado a través de 25 pruebas de jarras siguiendo la metodología propuesta para este estudio.

Estas pruebas reportaron la disminución de los parámetros de turbiedad y color aparente, lo cual confirma la existencia de una sedimentación natural del caolín utilizado. Estos ensayos fueron utilizados como muestras comparadoras o valores testigos.

Figura 14. Turbiedad residual sin coagulante (testigos)



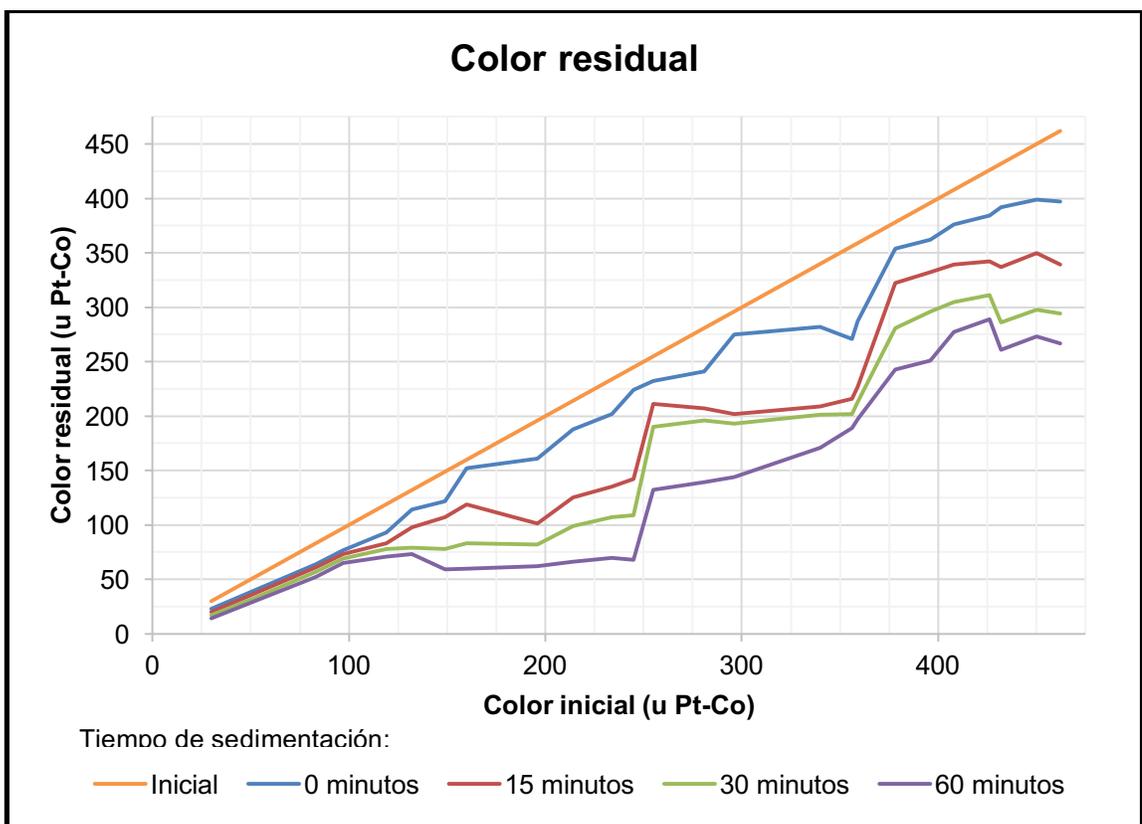
Fuente: elaboración propia, con datos obtenidos en el laboratorio.

La sedimentación natural del caolín produce un porcentaje promedio de remoción de turbiedad a los 15 minutos de 46 % y de 29 % para el color aparente.

Estos porcentajes suben a 60 % y 38 % para la turbiedad y el color aparente respectivamente a 30 minutos de sedimentación y a los 60 minutos alcanzan una remoción promedio de hasta 72% y 48%.

El comportamiento de la disminución de turbiedad y color aparente pueden observarse en las figuras 14 y 15, mientras que los resultados completos de los porcentajes de remoción se presentan en la tabla XVII.

Figura 15. **Color aparente residual sin coagulante (testigos)**



Fuente: elaboración propia, con datos obtenidos en el laboratorio.

Tabla XVII. **Porcentaje de remoción de turbiedad y color únicamente por sedimentación (testigos)**

No.	Turbiedad inicial (UNT)	% Remoción de turbiedad			Color inicial (u Pt-Co)	% Remoción color aparente			
		Sedimentación (minutos)				Sedimentación (minutos)			
		0	15	30		0	15	30	60
1	22	27	41	50	64	23	33	43	53
2	35	23	34	46	54	23	29	37	42
3	59	17	39	49	56	23	27	31	37
4	77	10	47	56	61	21	25	29	33
5	94	11	48	56	64	22	30	34	40
6	116	16	47	62	68	14	26	40	45
7	129	15	49	67	79	18	28	48	60
8	144	17	47	68	82	5	26	48	63
9	164	21	69	77	84	18	48	58	68
10	173	12	55	71	83	12	42	54	69
11	206	17	57	73	85	14	42	54	70
12	225	17	59	76	87	9	42	56	72
13	238	27	40	55	73	9	17	25	48
14	261	31	43	57	76	14	26	30	51
15	279	25	41	57	75	7	32	35	51
16	296	25	43	60	74	17	39	41	50
17	326	30	43	60	75	24	39	43	47
18	346	29	42	58	75	20	37	41	45
19	372	32	37	53	67	6	15	26	36
20	387	30	42	56	69	9	16	25	37
21	417	26	37	53	65	8	17	25	32
22	438	33	49	66	71	10	20	27	32
23	451	32	45	63	69	9	22	34	40
24	486	30	45	63	71	11	22	34	39
25	499	29	43	60	71	14	27	36	42
Promedio:		23	46	60	72	14	29	38	48
Desv. estándar:		7.1	7.5	8.1	8.4	5.9	9.1	10.0	12.3

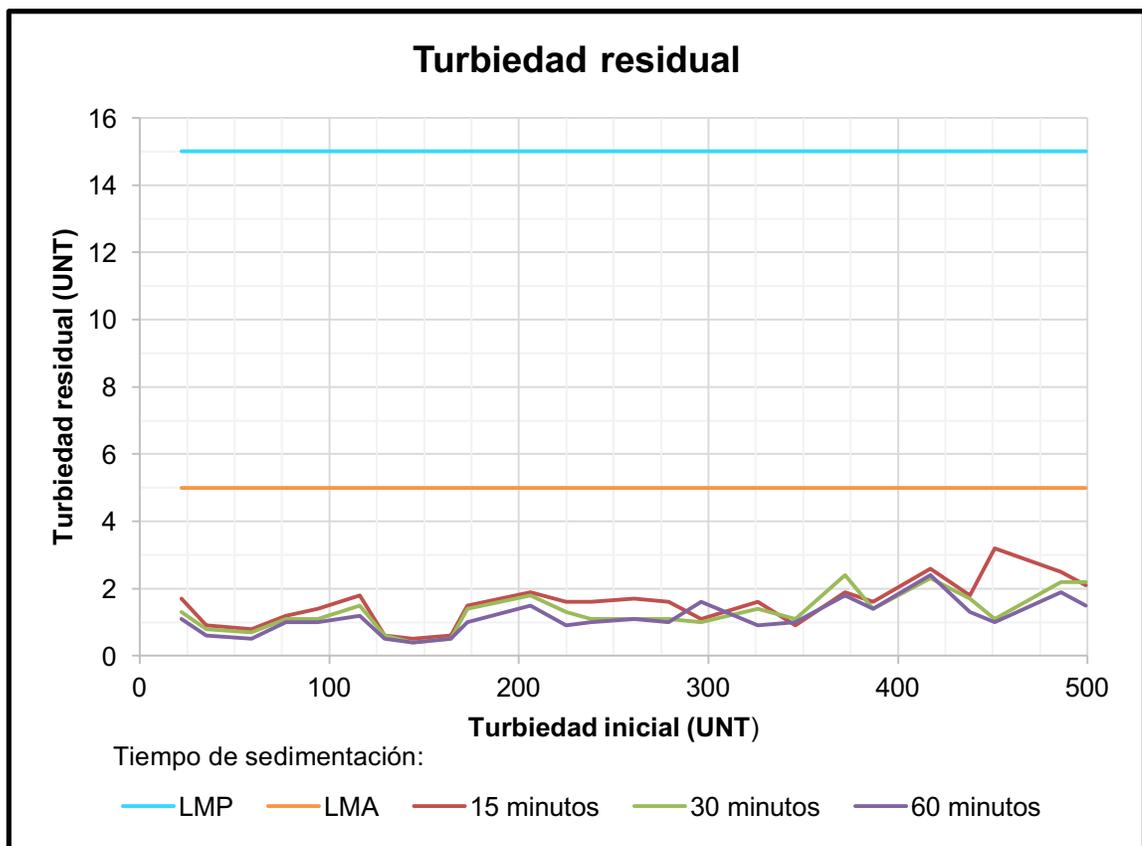
Fuente: elaboración propia, con datos obtenidos en el laboratorio.

### 4.3. Turbiedad y color aparente residual aplicando sulfato de aluminio

El sulfato de aluminio ha sido plenamente estudiado y es el coagulante más utilizado en la región, los valores de turbiedad y color aparente residuales se encuentran dentro de los límites de la norma COGUANOR NGO 29001, utilizando al menos quince minutos de sedimentación.

Los porcentajes de remoción de turbiedad y color aparente están en promedio por arriba del 97 %, como se muestra en la tabla XVIII y XIX.

Figura 16. Turbiedad residual utilizando sulfato de aluminio



LMP: Límite máximo permisible; LMA: Límite máximo permisible

Fuente: elaboración propia, con datos obtenidos en el laboratorio.

Tabla XVIII. **Porcentaje de remoción de turbiedad utilizando sulfato de aluminio**

No.	Turbiedad inicial (UNT)	Utilizando valor inicial Sedimentación (minutos)				Utilizando valor control Sedimentación (minutos)			
		Sedimentación (minutos)				Sedimentación (minutos)			
		0	15	30	60	0	15	30	60
1	22		92	94	95		87	88	86
2	35		97	98	98		96	96	96
3	59		99	99	99		98	98	98
4	77		98	99	99		97	97	97
5	94		99	99	99		97	97	97
6	116		98	99	99		97	97	97
7	129		100	100	100		99	99	98
8	144		100	100	100		99	99	98
9	164		100	100	100		99	99	98
10	173		99	99	99		98	97	97
11	206	68	99	99	99	62	98	97	95
12	225	81	99	99	100	77	98	98	97
13	238	41	99	100	100	19	99	99	98
14	261	67	99	100	100	53	99	99	98
15	279	49	99	100	100	31	99	99	99
16	296	38	100	100	99	16	99	99	98
17	326	82	100	100	100	74	99	99	99
18	346	71	100	100	100	59	100	99	99
19	372	69	99	99	100	55	99	99	99
20	387	56	100	100	100	38	99	99	99
21	417	44	99	99	99	24	99	99	98
22	438	52	100	100	100	28	99	99	99
23	451	63	99	100	100	46	99	99	99
24	486	63	99	100	100	47	99	99	99
25	499	62	100	100	100	47	99	99	99
Promedio:		60	99	99	99	45	98	98	97
Desv. estándar:		13.2	1.5	1.1	0.9	18.3	2.4	2.2	2.5

Fuente: elaboración propia, con datos obtenidos en el laboratorio.

Tabla XIX. **Porcentaje de remoción de color aparente utilizando sulfato de aluminio**

No.	Color inicial (u Pt-Co)	Utilizando valor inicial				Utilizando valor control			
		Sedimentación (minutos)				Sedimentación (minutos)			
		0	15	30	60	0	15	30	60
1	30		93	93				88	86
2	52		98	98				97	97
3	83		96	98				96	98
4	97		99	99				99	98
5	119		97	97				96	97
6	132		97	98				96	96
7	149		99	99				97	98
8	160		99	99				98	98
9	196		99	99				99	98
10	214		100	100				99	98
11	234	63	97	99	57			96	99
12	245	78	100	100	76			99	99
13	255	49	100	100	44			100	99
14	281	64	100	100	59			100	99
15	296	42	100	100	37			100	99
16	340	35	100	100	21			100	99
17	356	72	100	100	64			100	99
18	359	59	99	99	49			99	99
19	378	56	99	99	53			99	99
20	396	57	99	99	53			99	100
21	408	37	99	99	31			99	99
22	426	50	100	100	44			99	100
23	432	62	99	100	58			99	99
24	450	54	99	99	48			99	100
25	462	56	100	100	49			99	100
Promedio:		56	99	99	50			98	98
Desv. estándar:		11.7	1.4	1.3	12.9			2.1	2.7

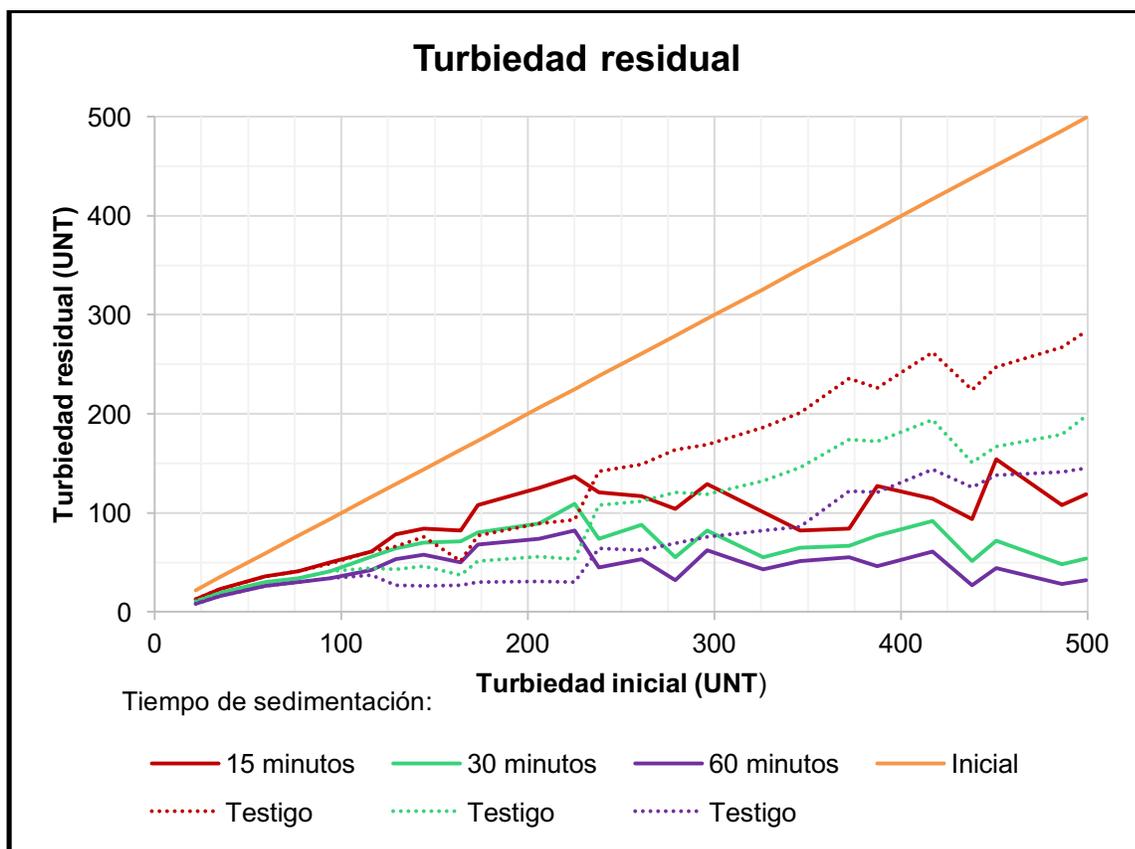
Fuente: elaboración propia, con datos obtenidos en el laboratorio.

#### 4.4. Turbiedad y color aparente residual aplicando semilla de moringa

Utilizando coagulante a base de polvo de semilla de moringa, el porcentaje real de remoción promedio de turbiedad con una sedimentación de 15 minutos es de 23 %, con 30 minutos de 28 % y a los 60 minutos es de 27 %.

Al comparar la eficiencia de la semilla de moringa con los valores de control, se puede afirmar que en turbiedades por debajo de 225 UNT y en valores de color aparente de 255 u Pt-Co no existe ninguna remoción, ya que la disminución de estos valores se debe a la precipitación natural de las partículas de arcilla caolín en los diferentes tiempos de sedimentación.

Figura 17. Turbiedad residual utilizando semilla de moringa



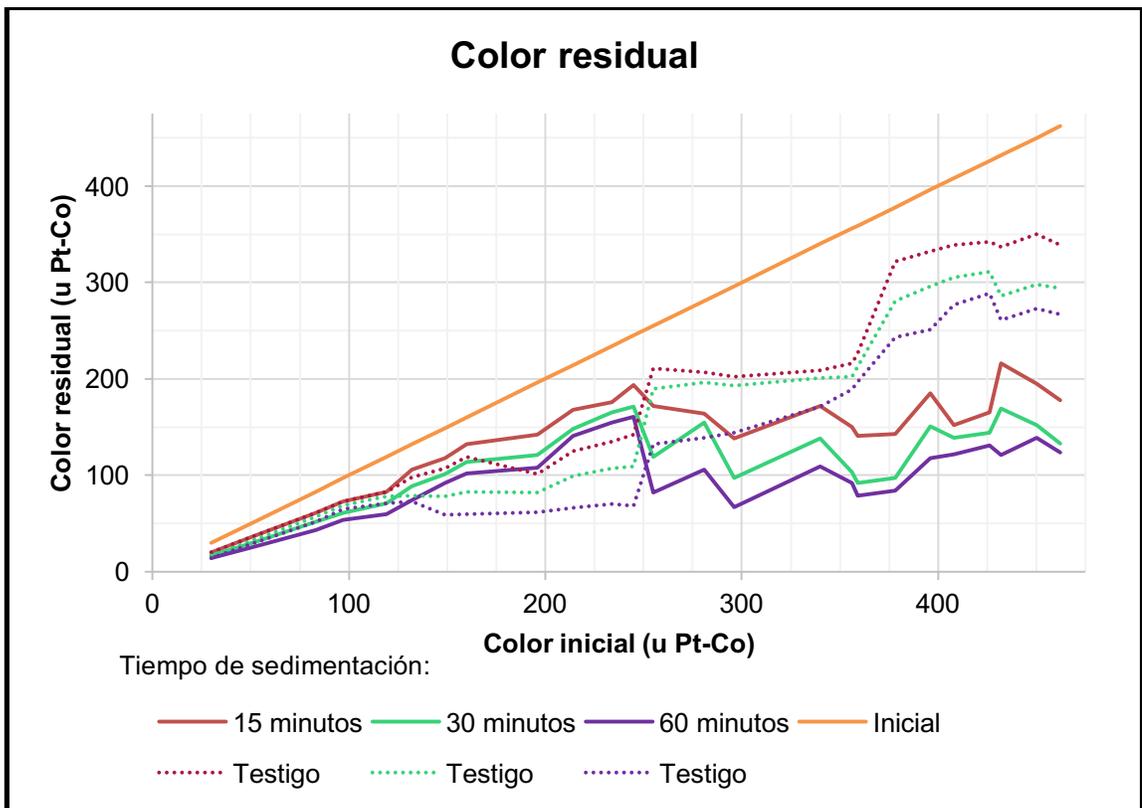
Fuente: elaboración propia, con datos obtenidos en el laboratorio.

El porcentaje real de remoción promedio de color aparente con una sedimentación de 15 minutos es de 20 %, con 30 minutos de 26 % y a los 60 minutos es de 28 %.

Al no tomar en cuenta los valores de control o testigos, los porcentajes de eficiencia en la remoción de turbiedad y color aparente utilizando semilla de moringa son mayores, pudiera de esta forma, inducir sesgo en los resultados.

El comportamiento de la disminución de turbiedad y color aparente pueden observarse en las figuras 17 y 18, mientras que los resultados completos de los porcentajes de remoción se presentan en las tablas XX y XXI.

Figura 18. **Color residual utilizando semilla de moringa**



Fuente: elaboración propia, con datos obtenidos en el laboratorio.

Tabla XX. **Porcentaje de remoción de turbiedad utilizando semilla de moringa**

No.	Turbiedad inicial (UNT)	Utilizando valor inicial				Utilizando valor control			
		Sedimentación (minutos)				Sedimentación (minutos)			
		0	15	30	60	0	15	30	60
1	22	27	41	50	64	0	0	0	0
2	35	23	34	46	54	0	0	0	0
3	59	24	39	49	56	8	0	0	0
4	77	31	47	56	61	23	0	0	0
5	94	32	47	56	64	24	0	0	0
6	116	35	47	52	64	23	0	0	0
7	129	25	40	50	59	12	0	0	0
8	144	24	42	51	60	8	0	0	0
9	164	26	50	57	70	7	0	0	0
10	173	23	38	54	61	12	0	0	0
11	206	28	39	57	64	13	0	0	0
12	225	31	39	52	64	17	0	0	0
13	238	17	49	69	81	0	15	31	30
14	261	23	55	66	80	0	21	21	15
15	279	25	63	80	89	0	37	55	54
16	296	19	56	72	79	0	24	31	18
17	326	20	69	83	87	0	46	58	48
18	346	20	76	81	85	0	59	55	41
19	372	17	77	82	85	0	64	61	55
20	387	16	67	80	88	0	44	55	62
21	417	23	73	78	85	0	56	53	58
22	438	24	79	88	94	0	58	66	79
23	451	10	66	84	90	0	38	57	68
24	486	24	78	90	94	0	60	73	80
25	499	21	76	89	94	0	58	73	78
Promedio:		23	68	67	75	6	45	28	27
Desv. estándar:		5.5	15.0	15.0	13.5	8.2	25.1	28.7	30.3

Fuente: elaboración propia, con datos obtenidos en el laboratorio.

Tabla XXI. **Porcentaje de remoción de color aparente utilizando semilla de moringa**

No.	Color inicial (u Pt-Co)	Utilizando valor inicial				Utilizando valor control			
		Sedimentación (minutos)				Sedimentación (minutos)			
		0	15	30	60	0	15	30	60
1	30	23	33	43	53	0	0	0	0
2	52	23	29	40	50	0	0	6	13
3	83	23	27	37	48	0	0	9	17
4	97	21	25	37	44	0	0	12	17
5	119	22	30	40	50	0	0	9	15
6	132	14	20	33	44	0	0	0	0
7	149	18	21	32	38	0	0	0	0
8	160	5	18	29	36	0	0	0	0
9	196	18	28	38	45	0	0	0	0
10	214	15	21	31	34	4	0	0	0
11	234	14	25	29	34	0	0	0	0
12	245	11	21	30	34	3	0	0	0
13	255	10	33	53	68	1	18	37	38
14	281	16	42	45	62	2	21	21	24
15	296	21	53	67	77	15	32	50	53
16	340	10	49	59	68	0	18	31	36
17	356	16	58	71	74	0	31	49	51
18	359	17	61	74	78	0	38	57	60
19	378	11	62	74	78	5	56	65	65
20	396	17	53	62	70	9	44	49	53
21	408	14	63	66	70	7	55	54	56
22	426	6	61	66	69	0	52	54	55
23	432	20	50	61	72	12	36	41	54
24	450	14	57	66	69	3	44	49	49
25	462	17	61	71	73	3	47	55	54
Promedio:		16	40	50	58	3	20	26	28
Desv. estándar:		4.9	16.3	16.1	15.5	4.0	21.0	23.7	24.1

Fuente: elaboración propia, con datos obtenidos en el laboratorio.

#### **4.5. Turbiedad y color aparente residual aplicando combinaciones de sulfato de aluminio y semilla de moringa**

El sulfato de aluminio aporta una capacidad floculante muy superior al polvo de semilla de moringa, la mayor eficiencia utilizando combinaciones se alcanza con la combinación 2, que es 80 % de sulfato de aluminio y 20 % de moringa, la cual no genera ningún beneficio económico, ya que no se lograría sustituir un porcentaje significativo de sulfato de aluminio por coagulante orgánico.

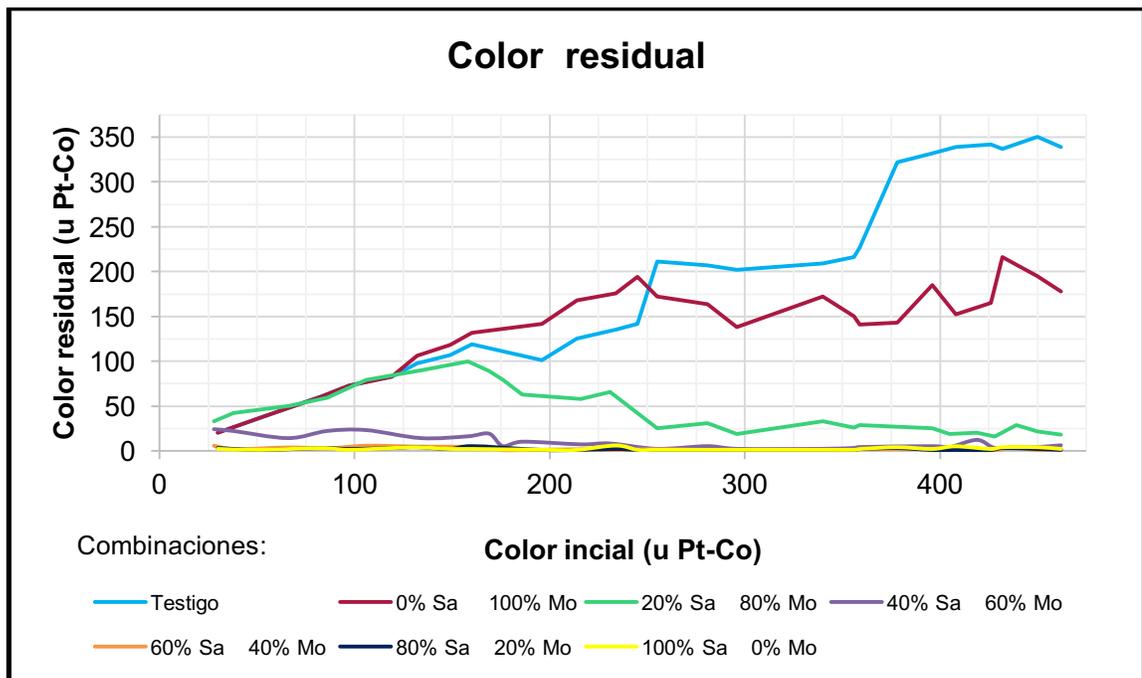
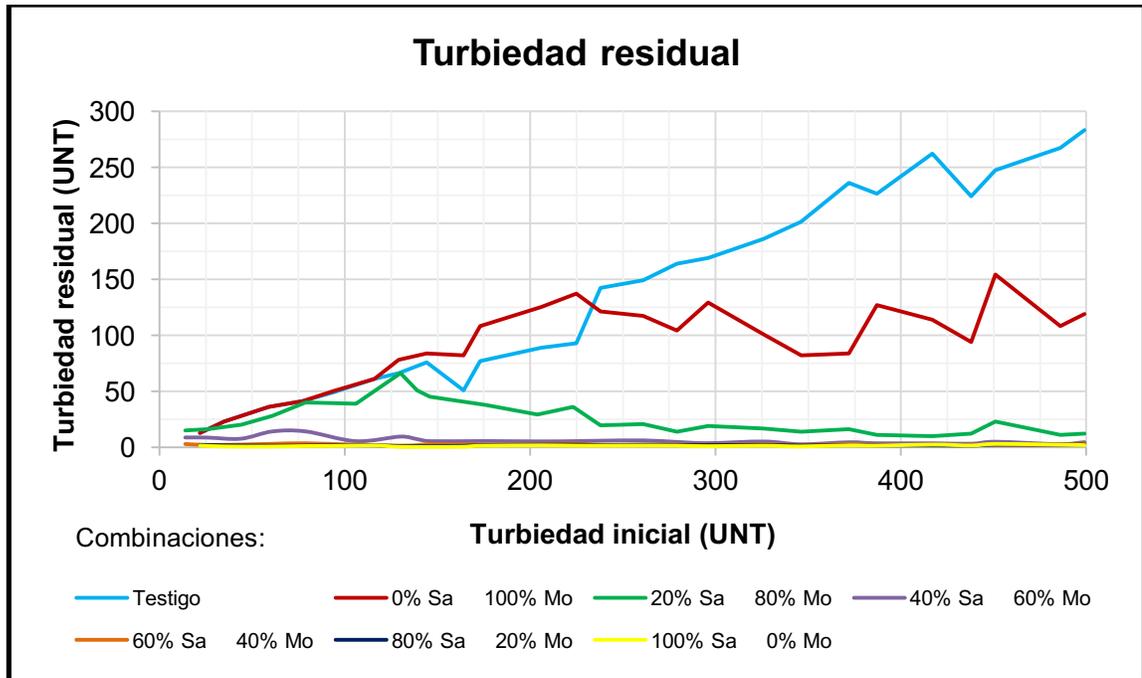
La eficiencia real en la combinación número 2 y 3 con al menos 15 minutos de sedimentación, reporta un porcentaje de remoción de turbiedad y color aparente en promedio arriba del 97 %, en la número 4, un porcentaje del 89 % para turbiedad y 87 % para color aparente, mientras que en la 5 los porcentajes disminuyen de manera considerable a un 63 % y 58 % respectivamente.

Al aumentar el tiempo de sedimentación de 15 a 30 y 60 minutos, se observa que los resultados de eficiencia real de remoción de estos parámetros prácticamente no presentan aumentos significativos, ya que como máximo existe una variación positiva del 4 %.

Si bien el porcentaje de remoción de turbiedad y color en las combinaciones número 2 y 3, es alto y muy cercano a los porcentajes obtenidos aplicando únicamente sulfato de aluminio, no logra igualar o superar el desempeño del mismo. Todas las combinaciones utilizadas presentan mejor desempeño que al utilizar únicamente semilla de moringa.

El comportamiento de la disminución de turbiedad y color aparente pueden observarse en las figuras 19, 20 y 21, mientras que los resultados completos de los porcentajes de remoción se presentan en anexos.

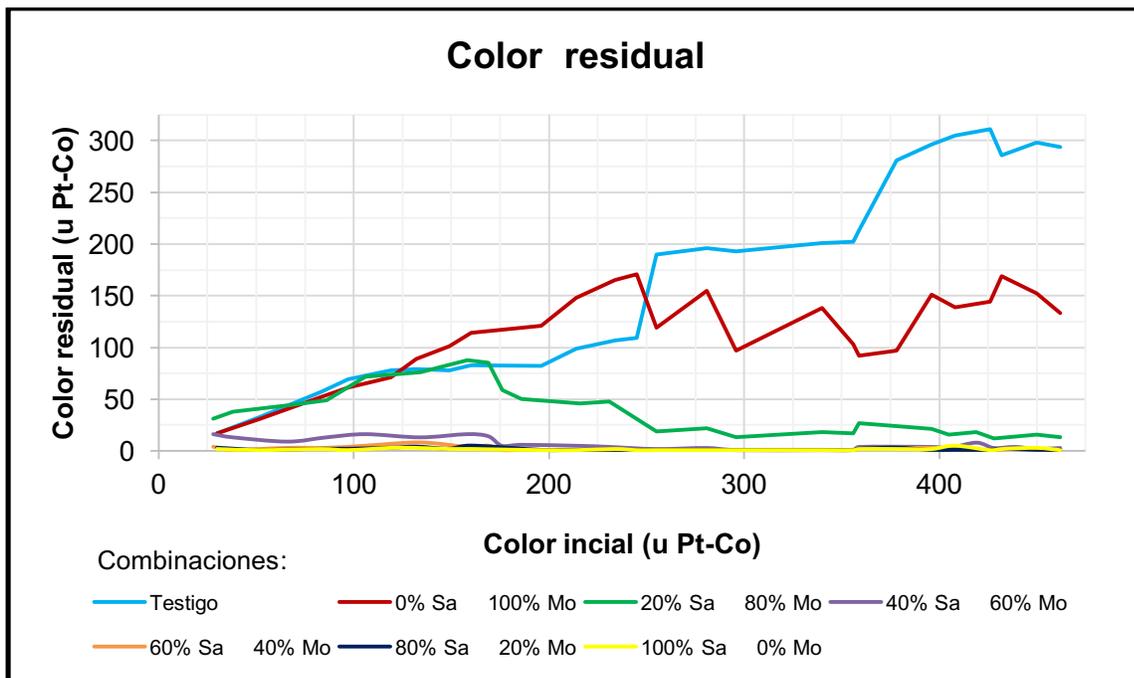
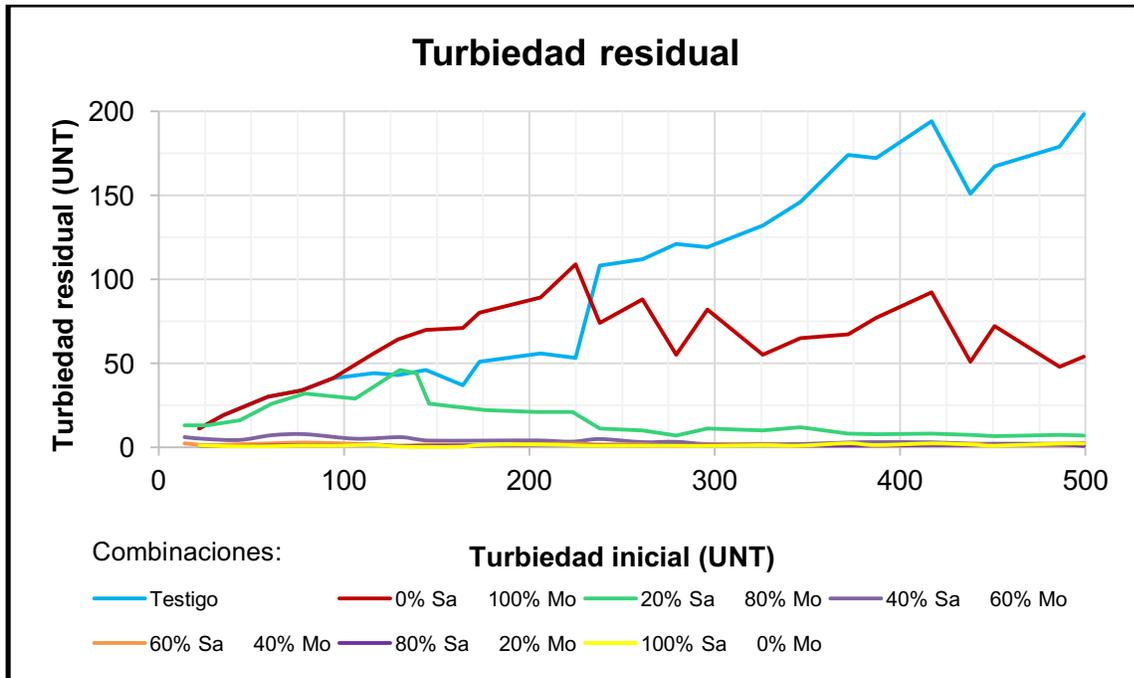
Figura 19. **Turbiedad y color residual utilizando combinaciones, 15 minutos de sedimentación**



Sa = Sulfato de aluminio    Mo = Semilla de moringa

Fuente: elaboración propia, con datos obtenidos en el laboratorio.

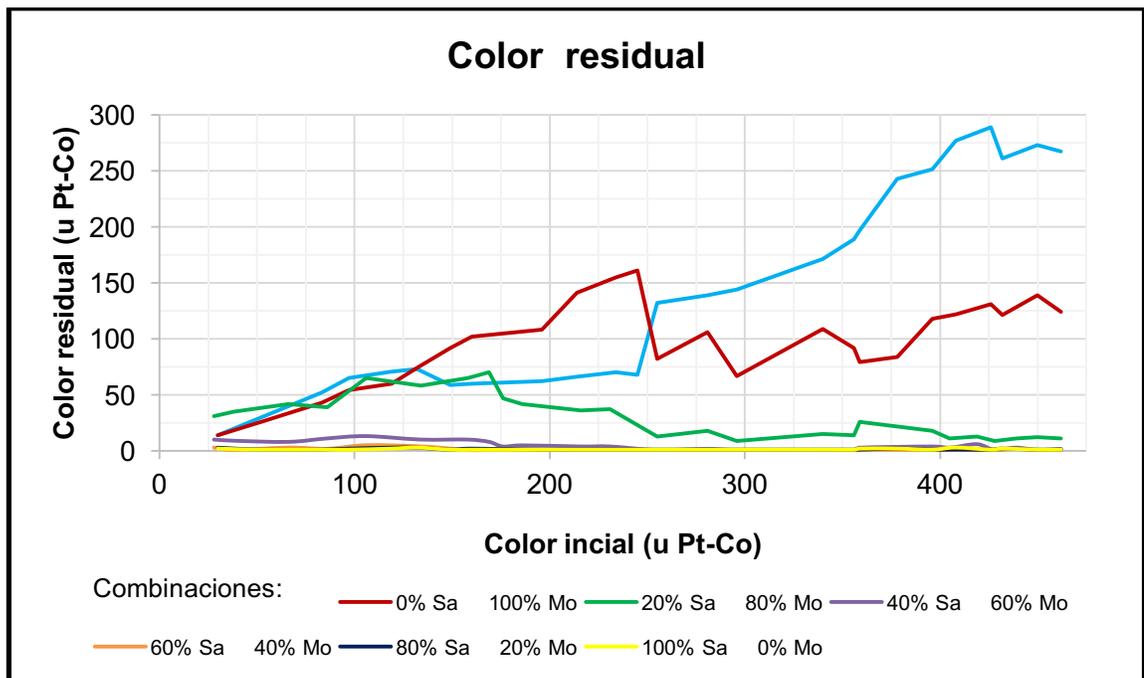
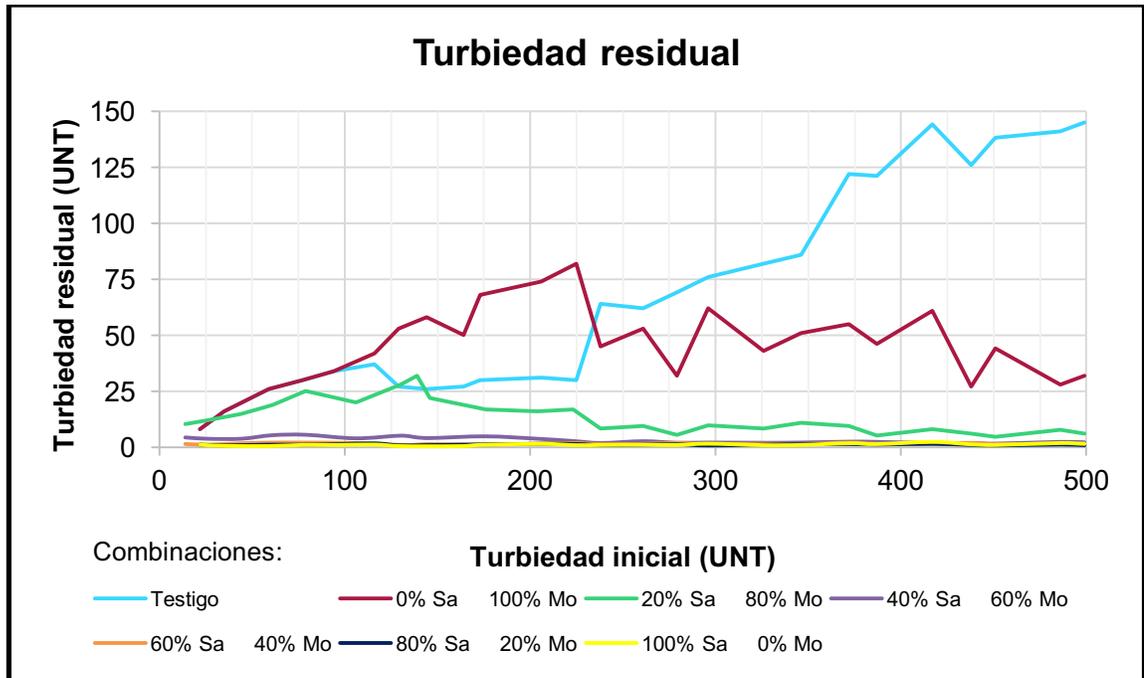
Figura 20. Turbiedad y color residual utilizando combinaciones, 30 minutos de sedimentación



Sa = Sulfato de aluminio    Mo = Semilla de moringa

Fuente: elaboración propia, con datos obtenidos en el laboratorio.

Figura 21. **Turbiedad y color residual utilizando combinaciones, 60 minutos de sedimentación**



Sa = Sulfato de aluminio    Mo = Semilla de moringa

Fuente: elaboración propia, con datos obtenidos en el laboratorio.

#### 4.6. Comparación entre la semilla de moringa y el almidón de yuca

Se compararon los resultados de remoción de turbiedad del presente estudio con el efectuado por Moscozo Barrios, Luis Roberto, en el año 2015. El cálculo del porcentaje de remoción se realizó con base a los valores iniciales de turbiedad, es decir sin tomar en cuenta los valores de control o testigos.

La metodología en ambos estudios es similar, se indujo la turbiedad por medio de caolín, la mezcla rápida fue de un minuto a 100 rpm, el tiempo de floculación fue de 15 minutos a 40 rpm y el tiempo de sedimentación 15 minutos.

En promedio, el coagulante a base de almidón de yuca, logra una remoción del 49 % en la turbiedad; mientras que a base de polvo de semilla de moringa un 55% a los 15 minutos de sedimentación. Los datos del almidón de yuca se observan en la tabla XXII.

Tabla XXII. **Porcentaje de remoción de turbiedad utilizando almidón**

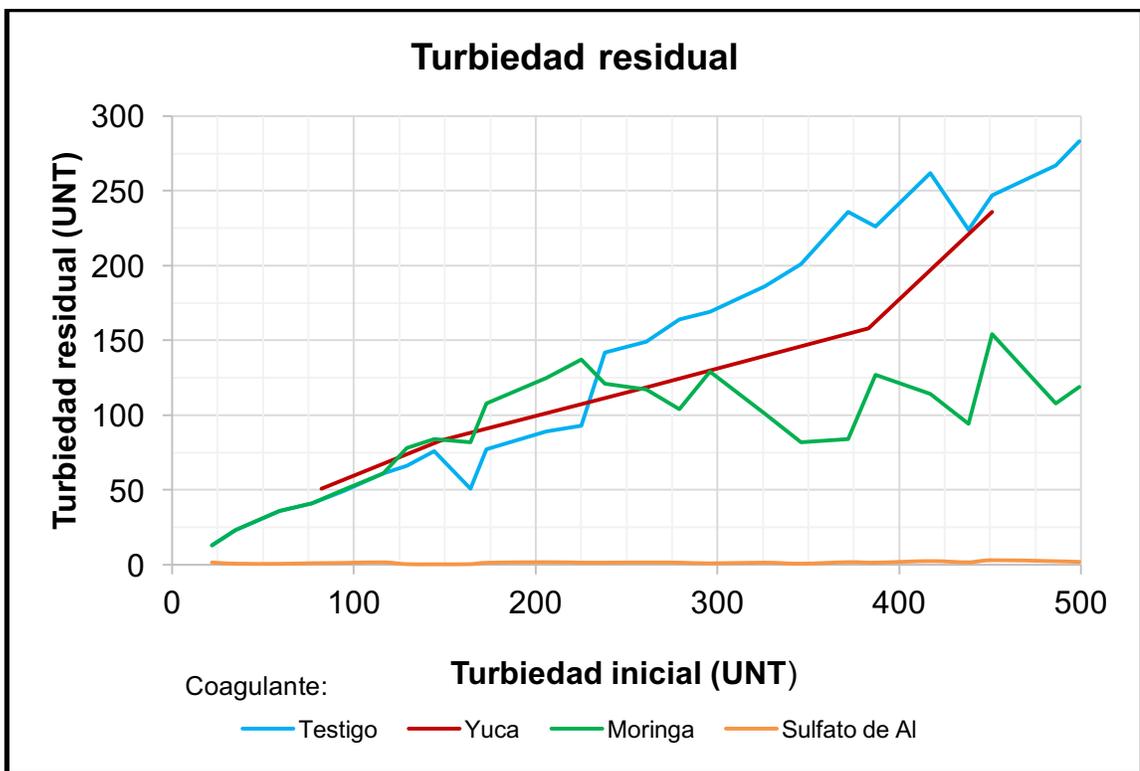
YUCA	No.	Turbiedad (UNT)		% Remoción de turbiedad
		Inicial	Final	Sedimentación (minutos)
				15
	1	82	51	38
	2	148	83	44
	3	262	119	55
	4	383	158	59
	5	451	236	48
	Promedio:			54
	Desv. estándar:			7.46

Fuente: elaboración propia, con datos de Moscozo (2015).

De 0 a 230 unidades de turbiedad, tanto el almidón de yuca como la moringa, no presentan ninguna remoción de turbiedad, dado que los valores residuales son similares a los obtenidos en las muestras testigos.

A partir de las 230 unidades de turbiedad, la semilla de moringa logra una eficiencia de remoción de turbiedad de 68 %; mientras que el almidón de yuca un 54%, evidenciando así un mejor comportamiento (14 %) del coagulante a base de polvo de semilla de moringa

Figura 22. **Comparación de remoción de turbiedad entre moringa y almidón de yuca**



Fuente: elaboración propia, con datos obtenidos en el laboratorio y Moscozo (2015).

#### **4.7. Comparación entre la semilla de moringa y tamarindo**

Se compararon los resultados de remoción de turbiedad y color aparente del presente estudio con el efectuado por Álvarez (2016). El cálculo del porcentaje de remoción se realizó con base a los valores iniciales de turbiedad y color, es decir, sin tomar en cuenta los valores de control o testigos.

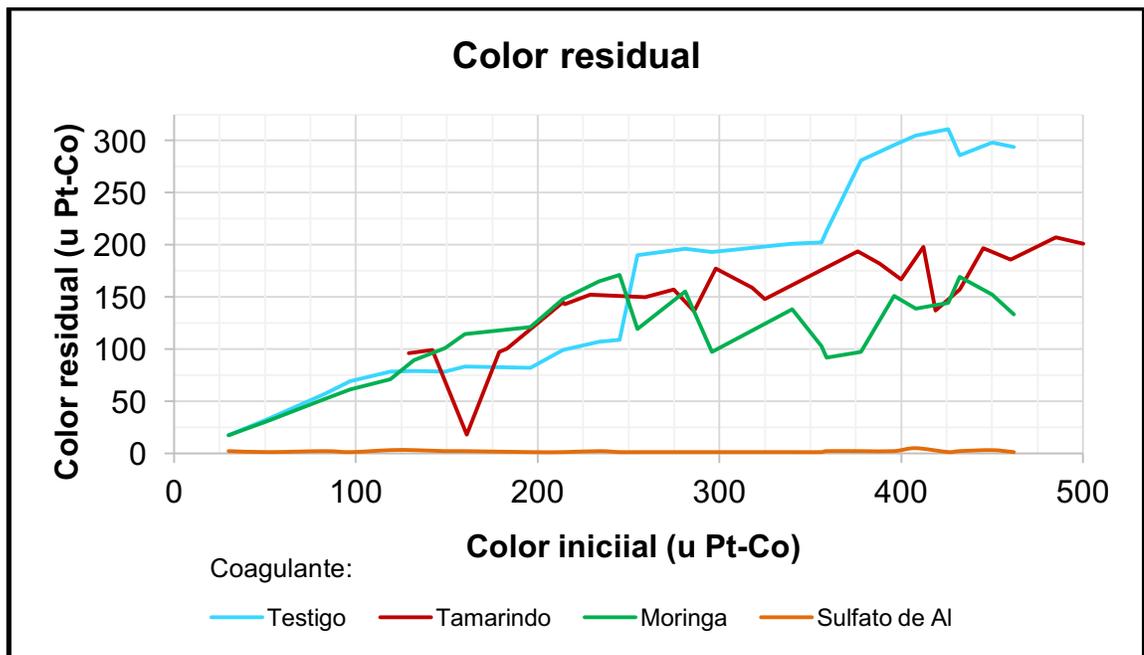
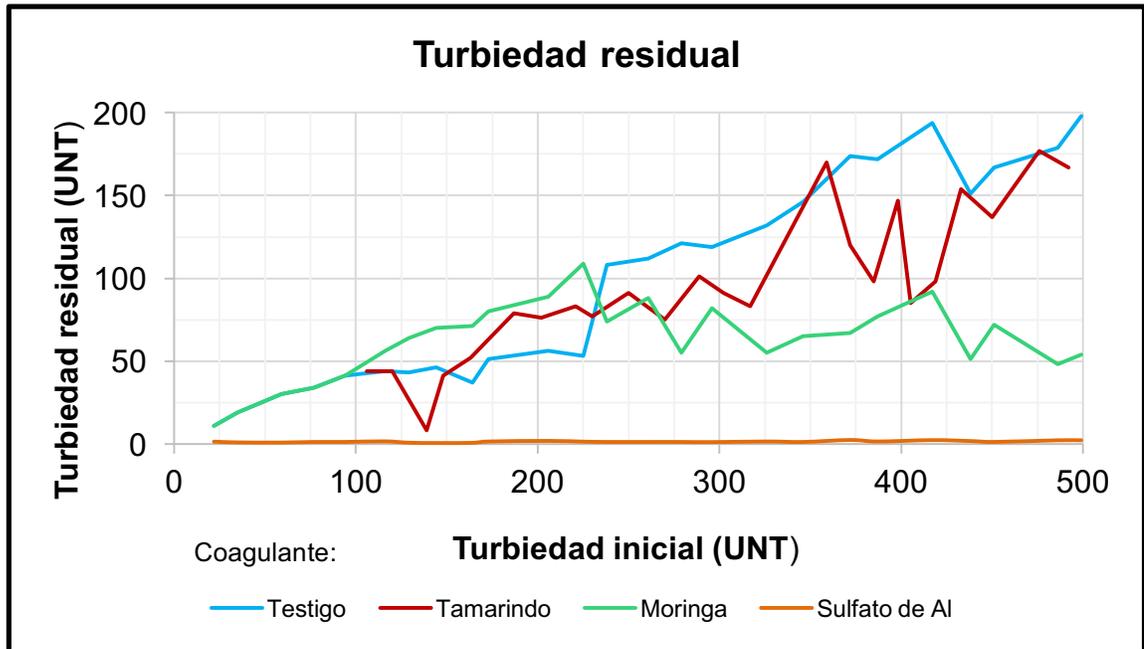
La metodología en ambos estudios es similar, se indujo la turbiedad por medio de caolín, la mezcla rápida fue de un minuto a 100 rpm y el tiempo de sedimentación de 30 minutos, únicamente difiere que para el presente estudio el tiempo de floculación fue de 15 minutos a 40 rpm; mientras que para el de semilla de tamarindo fue de 20 minutos a 30 rpm.

En promedio, el coagulante a base de semilla de tamarindo logra una remoción del 68 % en la turbiedad y 50 % en el color aparente; mientras que a base de polvo de semilla de moringa un 67 % y 50 % respectivamente, a los 15 minutos de sedimentación.

De 0 a 225 unidades de turbiedad, tanto la semilla de tamarindo como la moringa, no presentan ninguna remoción de turbiedad, dado que los valores residuales son similares a los obtenidos en las muestras testigos. Mientras que, para la remoción del color aparente, muestran remoción únicamente a partir de las 250 unidades de color.

A partir de las 225 unidades de turbiedad y 250 de color, a los 30 minutos de sedimentación, en promedio la semilla de tamarindo logra una remoción del 68% en la turbiedad y 54 % en color; mientras que la moringa un 80 % y 55 % respectivamente. Los datos de la semilla de tamarindo se observan en la tabla XXIII y la comparación en la figura 23.

Figura 23. **Comparación de eficiencia de remoción de turbiedad y color aparente entre semilla de moringa y semilla de tamarindo**



Fuente: elaboración propia, con datos obtenidos en el laboratorio y Álvarez (2016).

Tabla XXIII. **Porcentaje de remoción de turbiedad utilizando tamarindo**

No.	Turbiedad (UNT)		Color (u Pt-Co)		Sedimentación (30 min)	
	Inicial	Final	Inicial	Final	% Remoción	
					Turbiedad	Color
1	106	44	129	96	58	26
2	120	44	142	99	63	30
3	139	8	161	18	94	89
4	148	41	179	97	72	46
5	163	52	183	100	68	45
6	187	79	214	145	58	32
7	202	76	215	143	62	33
8	221	83	229	152	62	34
9	230	77	259	150	67	42
10	250	91	275	157	64	43
11	270	75	286	136	72	52
12	289	101	298	177	65	41
13	302	91	318	159	70	50
14	317	83	325	148	74	54
15	359	170	376	194	53	48
16	372	120	388	182	68	53
17	385	98	400	167	75	58
18	398	147	412	198	63	52
19	405	85	419	137	79	67
20	419	98	432	157	77	64
21	433	154	445	197	64	56
22	450	137	460	186	70	60
23	476	177	485	207	63	57
24	492	167	500	201	66	60
Promedio:					68	50
Desv.estándar:					8.20	13.63

TAMARINDO

Fuente: elaboración propia, con datos obtenidos en el laboratorio y Álvarez (2016).

## CONCLUSIONES

1. La utilización de polvo de semilla de moringa como coagulante orgánico para la remoción de turbiedad y color aparente del agua destinada a consumo humano, no es técnicamente factible, dado que luego de realizar los ensayos del presente estudio no se logró alcanzar los niveles límites máximos permisibles requeridos en la norma COGUANOR NGO 29001 de 15.0 UNT en turbiedad y 35.0 u Pt-Co en color aparente, evaluando al menos una hora de sedimentación.
2. Utilizando coagulante orgánico a base de polvo de semilla de moringa, la remoción real promedio reportada es de 23 % en la turbiedad y 20 % en el color aparente a 15 minutos de sedimentación, mientras que a los 60 minutos estos porcentajes alcanzan una remoción de 27 % y 28 % respectivamente.
3. La semilla de tamarindo tiene una eficiencia de remoción promedio de 68% en la turbiedad y de 50% en el color aparente a los 30 minutos de sedimentación; mientras que el almidón de yuca reporta un 49% respecto a la turbiedad a los 15 minutos de sedimentación. El coagulante a base de polvo de semilla de moringa reporta porcentajes de remoción similares a los coagulantes anteriores, 67% en la turbiedad y 50% en color aparente a los 30 minutos de sedimentación y 55% respecto a la turbiedad a los 15 minutos de sedimentación. Estos porcentajes reportados no son los de la remoción real, ya que se está incluyendo en ellos la remoción que se produce por sedimentación natural, a través del tiempo.

4. La mayor eficiencia utilizando combinaciones, se alcanza con un 80 % de sulfato de aluminio y 20 % de moringa (combinación número 2) la cual no genera ningún beneficio económico, dado que la mayor actividad coagulante lo genera el sulfato de aluminio, por lo que no se lograría sustituir un porcentaje significativo de sulfato de aluminio por coagulante orgánico.
  
5. No es recomendable el desarrollo de una propuesta a nivel domiciliario, porque los niveles de eficiencia alcanzados no son lo suficientemente satisfactorios como para utilizar el coagulante orgánico como propuesta alternativa al sulfato de aluminio, en la remoción de turbiedad y color aparente en aguas superficiales destinadas al consumo humano.

## RECOMENDACIONES

1. Realizar un estudio comparativo sobre el comportamiento de la turbiedad natural y la turbiedad inducida por medio de arcillo tipo caolín, con el objeto de establecer las diferencias de turbiedad para un mismo tiempo de sedimentación.
2. Aplicar en los procesos de investigación el uso de muestras testigo, las cuales permiten evaluar el proceso sin el efecto que se encuentra en observación.
3. En todos los procesos de investigación que se desarrollen, debe dejarse especificado los materiales y métodos utilizados, ello con el objeto de facilitar replicar los procesos de investigación y darles más rigurosidad científica a las investigaciones.
4. Desarrollar una investigación que permita estandarizar el desarrollo de las pruebas de jarras para futuros estudios de tesis, tales como tiempos de mezclado rápido y lento, velocidad de agitación y tiempos de sedimentación, para comparar y analizar los resultados más fácilmente.
5. Realizar estudios donde se extraiga el aceite de la semilla de moringa por métodos químicos o físicos, a efecto de evaluar si existe una mejora en la eficiencia de remoción de turbiedad y color.

## BIBLIOGRAFÍA

1. ÁLVAREZ, T., 2016. *Uso de la semilla de tamarindo (Tamarindus Indica) como coagulante orgánico en procesos de coagulación-floculación en el tratamiento de agua para potabilización*. Tesis de maestría, USAC, Escuela Regional de Ingeniería Sanitaria.
2. ARNOLDSSON, E., BERGMAN M., MATSHINE N., PERSSON M.K., 2008. *Assessment of drinking water treatment using Moringa Oleífera natural coagulant*. Vatten, vol. 64, 137-150.
3. BRADBY, J., 2006. *Coagulation and Flocculation in Water and Wastewater Treatment*. IWA Publishing.
4. CÁCERES, A., 1996. *Plantas de uso medicinal en Guatemala*. Guatemala: Editorial Universitaria USAC.
5. CÁCERES, A., 1991. *Pharmacological properties of moringa oleifera preliminary screening for antimicrobial activity*. (33), 213-220.
6. CEPIS/OPS., 2004. *Manual I: Tratamiento de agua para consumo humano Plantas de filtración rápida*. Lima, Perú.
7. CONAGUA., 2011. *Manual de Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento. Diseño de Plantas Potabilizadoras de Tecnología Simplificada*. vol. 24. D.F., Coyoacán, México.

8. INSTITUTO NACIONAL DE ESTADÍSTICA (INE)., 2014. *Encuesta Nacional de Condiciones de Vida*. Guatemala.
9. MARTÍNEZ, E., 1987. *El uso de fécula de maíz como una alternativa de ayuda en el proceso de coagulación del agua cuando se emplea el sulfato de aluminio*. Tesis de maestría, USAC, Escuela Regional de Ingeniería Sanitaria.
10. MEJÍA, J.M., 1986. *La utilización de la semilla de la moringa Oleifera como coagulante natural*. Tesis de maestría, USAC, Escuela Regional de Ingeniería Sanitaria.
11. MENDOZA, I., Fernández, N., Ettiene, G. Y Diaz, A., 2000. Scientific Journal from the Experimental. vol. 8, 235-242.
12. MOSCOZO, L.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*. Tesis de maestría, USAC, Escuela Regional de Ingeniería Sanitaria, Guatemala.
13. MWH, 2012. *Water Treatment Principles and Design*. John Wiley & Sons, Inc.
14. NDABIGENGESERE, A., Y NARASIAH, S., 1998. *Quality of water treated by coagulation using moringa oleifera seeds*. Water Research, vol. 32(3), 781-791.

15. NDABIGENGESERE, A., NARASIAH, S. Y TALBOT, B., 1995. *Active Agents and Mechanism of Coagulation of Turbid Waters Using Moringa Oleifera*. Water Research, vol. 29(2), 405-410.
16. NIETO, C., & ORELLANA., 2011. *Aplicación del quitosano como promotor de floculación para disminuir la carga contaminante*. Trabajo de grado, Universidad Politécnica Salesiana, Facultad de Ciencias Agropecuarias y Ambientales, Cuenca.
17. OLSON, M.E., Y FAHEY J.W., 2011. *Moringa Oleifera: un árbol multiusos para las zonas tropicales secas*. Revista Mexicana de Biodiversidad. (82), 1071-1082.
18. ROMERO, J.A., 1999. *Potabilización del Agua* (3a. Edición ed.). D. F., México: ALFAOMEGA GRUPO EDITOR, S.A. de C.V.
19. 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, 6639-6643.
20. SANDOVAL, M.M., Y LAINES, J. (2013). *Moringa Oleifera una alternativa para sustituir coagulantes metálicos en el tratamiento de aguas superficiales*. Revista Académica de la FI-UADY, vol. 17(2), 93-101.
21. WALPOLE, Ronald E., Myers, R.H., Myers, S.L., 2012. *Probabilidad y estadística para ingeniería y ciencias*. Novena edición. México: Pearson Educación.

## APÉNDICES

### RESULTADOS DE ENSAYOS DEL LABORATORIO

Tabla XXIV. Porcentaje de remoción de turbiedad, combinación 2

	No.	Turbiedad inicial (UNT)	Utilizando valor inicial			Utilizando valor control		
			Sedimentación (minutos)			Sedimentación (minutos)		
			15	30	60	15	30	60
Sulfato 80% Moringa 20%	1	22	91	95	95	85	89	86
	2	35	95	98	98	93	96	95
	3	59	98	98	98	96	96	96
	4	77	98	98	99	97	96	96
	5	94	98	99	99	97	97	96
	6	116	99	99	99	97	96	95
	7	129	99	99	99	99	98	97
	8	144	99	99	99	99	98	97
	9	164	99	99	99	98	97	96
	10	173	99	99	99	98	98	96
	11	206	99	99	99	98	97	95
	12	225	99	99	99	98	97	95
	13	238	99	99	100	99	99	99
	14	261	99	100	100	99	99	98
	15	279	99	99	100	99	99	98
	16	296	99	100	100	99	99	99
	17	326	99	100	100	99	99	99
	18	346	100	100	100	99	99	98
	19	372	100	100	100	99	99	99
	20	387	100	100	100	99	99	99
	21	417	100	100	100	99	99	99
	22	438	100	100	100	99	99	99
	23	451	99	100	100	99	99	99
	24	486	100	100	100	99	99	99
	25	499	100	100	100	99	99	99
Promedio:			99	99	99	98	98	97
Desv. estándar:			1.7	1.1	1.0	2.9	2.1	2.7

Fuente: elaboración propia.

Tabla XXV. **Porcentaje de remoción de color, combinación 2**

	No.	Color inicial (u Pt-Co)	Utilizando valor inicial			Utilizando valor control		
			Sedimentación (minutos)			Sedimentación (minutos)		
			15	30	60	15	30	60
<b>Sulfato 80% Moringa 20%</b>	1	30	90	90	90	85	82	79
	2	52	98	98	98	97	97	97
	3	83	96	98	99	95	96	98
	4	97	98	98	98	97	97	97
	5	119	97	97	97	96	96	96
	6	132	97	97	98	96	95	96
	7	149	99	99	99	98	97	98
	8	160	97	97	99	96	94	97
	9	196	99	99	99	99	99	98
	10	214	100	100	100	99	99	98
	11	234	99	100	100	99	99	99
	12	245	100	100	100	99	99	99
	13	255	100	100	100	100	99	99
	14	281	100	100	100	100	99	99
	15	296	100	100	100	100	99	99
	16	340	100	100	100	100	100	99
	17	356	100	100	100	100	100	99
	18	359	99	99	100	99	99	99
	19	378	99	99	99	99	99	99
	20	396	100	100	100	100	100	100
	21	408	100	100	100	100	100	100
	22	426	100	100	100	100	100	100
	23	432	99	100	100	99	99	99
	24	450	100	100	100	99	100	100
	25	462	100	100	100	100	100	100
Promedio:			99	99	99	98	98	98
Desv. estándar:			2.0	2.0	1.9	3.0	3.5	4.1

Fuente: elaboración propia.

Tabla XXVI. **Porcentaje de remoción de turbiedad, combinación 3**

	No.	Turbiedad inicial (UNT)	Utilizando valor inicial			Utilizando valor control		
			Sedimentación (minutos)			Sedimentación (minutos)		
			15	30	60	15	30	60
<b>Sulfato 60% Moringa 40%</b>	1	22	88	90	93	79	79	81
	2	35	95	96	97	92	93	93
	3	59	96	97	97	94	94	93
	4	77	96	97	97	93	93	93
	5	94	96	97	98	93	93	94
	6	116	98	98	98	97	95	95
	7	129	99	99	99	98	97	96
	8	144	99	99	99	98	97	95
	9	164	99	99	99	95	96	94
	10	173	99	99	99	97	97	96
	11	206	99	99	99	97	97	95
	12	225	99	99	99	97	96	94
	13	238	99	99	99	99	98	98
	14	261	99	99	99	99	98	98
	15	279	99	100	99	99	99	97
	16	296	99	99	100	99	99	98
	17	326	99	99	100	99	99	98
	18	346	100	100	100	99	99	98
	19	372	99	100	99	99	99	98
	20	387	100	100	100	99	99	99
	21	417	100	100	100	99	99	99
	22	438	100	100	100	99	99	98
	23	451	100	100	100	99	99	99
	24	486	100	100	100	99	99	99
	25	499	99	100	100	99	99	99
	Promedio:		98	99	99	97	96	96
	Desv. estándar:		2.5	2.1	1.4	4.2	4.1	3.7

Fuente: elaboración propia.

Tabla XXVII. Porcentaje de remoción de color, combinación 3

No.	Color inicial (u Pt-Co)	Utilizando valor inicial			Utilizando valor control		
		Sedimentación (minutos)			Sedimentación (minutos)		
		15	30	60	15	30	60
1	30	80	87	90	70	76	79
2	52	96	98	98	95	97	97
3	83	95	96	96	93	95	94
4	97	97	97	98	96	96	97
5	119	95	96	96	93	94	93
6	132	96	94	97	95	90	95
7	149	97	97	99	95	95	98
8	160	97	97	99	96	94	98
9	196	99	99	99	99	99	98
10	214	100	100	100	99	99	98
11	234	99	100	100	99	99	99
12	245	100	100	100	99	99	99
13	255	99	100	100	99	99	99
14	281	100	100	100	100	99	99
15	296	100	100	100	100	99	99
16	340	100	100	100	100	100	99
17	356	100	100	100	100	100	99
18	359	99	99	100	99	99	99
19	378	99	99	100	99	99	100
20	396	100	100	100	100	100	100
21	408	100	100	100	100	100	100
22	426	100	100	100	100	100	100
23	432	99	100	100	99	99	99
24	450	100	100	100	100	100	100
25	462	100	100	100	99	100	100
Promedio:		98	98	99	97	97	98
Desv. estándar:		4.0	2.8	2.1	5.9	4.9	4.3

Fuente: elaboración propia.

Tabla XXVIII. Porcentaje de remoción de turbiedad, combinación 4

	No.	Turbiedad inicial (UNT)	Utilizando valor inicial			Utilizando valor control		
			Sedimentación (minutos)			Sedimentación (minutos)		
			15	30	60	15	30	60
<b>Sulfato 40% Moringa 60%</b>	1	22	61	72	80	34	45	44
	2	35	76	86	89	63	74	76
	3	59	87	92	93	79	85	85
	4	77	82	91	93	66	79	82
	5	94	85	92	94	71	81	83
	6	116	95	96	96	91	88	89
	7	129	93	95	96	86	86	80
	8	144	95	97	97	91	89	83
	9	164	97	98	97	90	89	84
	10	173	97	98	97	93	92	83
	11	206	98	98	98	94	93	87
	12	225	98	98	99	94	93	90
	13	238	98	98	99	96	95	97
	14	261	98	99	99	96	97	95
	15	279	98	99	99	97	97	97
	16	296	99	99	99	98	98	97
	17	326	98	99	99	97	98	97
	18	346	99	99	99	99	99	97
	19	372	99	99	99	98	98	98
	20	387	99	99	99	98	98	98
	21	417	99	99	100	99	98	99
	22	438	99	99	100	99	98	98
	23	451	99	99	100	98	99	99
	24	486	99	100	99	99	99	98
	25	499	99	99	100	98	99	98
	Promedio:		94	96	97	89	91	89
	Desv. estándar:		9.1	5.9	4.4	15.2	11.7	11.8

Fuente: elaboración propia.

Tabla XXIX. Porcentaje de remoción de color, combinación 4

No.	Color inicial (u Pt-Co)	Utilizando valor inicial			Utilizando valor control		
		Sedimentación (minutos)			Sedimentación (minutos)		
		15	30	60	15	30	60
1	30	20	47	67	0	6	29
2	52	58	75	83	41	61	70
3	83	83	89	90	77	84	85
4	97	77	87	89	70	81	83
5	119	81	87	89	72	79	82
6	132	89	90	92	86	84	86
7	149	89	89	93	85	79	83
8	160	88	91	95	84	83	87
9	196	97	97	98	95	94	94
10	214	95	97	98	92	94	92
11	234	97	98	98	95	95	94
12	245	97	98	98	94	96	94
13	255	99	99	100	99	99	99
14	281	98	99	99	98	98	99
15	296	99	100	100	99	99	99
16	340	99	100	100	99	100	99
17	356	99	100	100	99	100	99
18	359	99	99	99	98	98	98
19	378	99	99	99	98	99	98
20	396	99	99	99	99	99	99
21	408	97	98	99	96	97	98
22	426	99	99	100	99	99	100
23	432	99	99	99	99	99	99
24	450	99	100	100	99	99	100
25	462	99	99	100	98	99	99
Promedio:		90	93	95	87	89	91
Desv. estándar:		17.3	11.3	7.3	22.2	19.4	14.8

Fuente: elaboración propia.

Tabla XXX. **Porcentaje de remoción de turbiedad, combinación 5**

	No.	Turbiedad inicial (UNT)	Utilizando valor inicial			Utilizando valor control		
			Sedimentación (minutos)			Sedimentación (minutos)		
			15	30	60	15	30	60
<b>Sulfato 20% Moringa 80%</b>	1	22	32	41	52	0	0	0
	2	35	54	63	66	30	32	25
	3	59	66	73	75	44	47	42
	4	77	64	66	75	32	24	37
	5	94	57	66	73	18	22	26
	6	116	66	75	83	36	34	46
	7	129	49	64	78	0	0	0
	8	144	65	69	78	33	4	0
	9	164	73	84	87	12	30	19
	10	173	78	87	90	51	57	43
	11	206	86	90	92	67	63	48
	12	225	84	91	92	61	60	43
	13	238	92	95	96	86	90	87
	14	261	92	96	96	86	91	85
	15	279	95	97	98	91	94	92
	16	296	94	96	97	89	91	87
	17	326	95	97	97	91	92	90
	18	346	96	97	97	93	92	87
	19	372	96	98	97	93	95	92
	20	387	97	98	99	95	96	96
	21	417	98	98	98	96	96	94
	22	438	97	98	99	94	95	95
	23	451	95	99	99	91	96	97
	24	486	98	98	98	96	96	94
	25	499	98	99	99	96	96	96
	Promedio:		81	85	88	63	64	61
	Desv. estándar:		18.5	15.7	12.4	33.4	34.8	34.5

Fuente: elaboración propia.

Tabla XXXI. Porcentaje de remoción de color, combinación 5

No.	Color inicial (u Pt-Co)	Utilizando valor inicial			Utilizando valor control		
		Sedimentación (minutos)			Sedimentación (minutos)		
		15	30	60	15	30	60
1	30	0	0	0	0	0	0
2	52	19	27	33	0	0	0
3	83	40	47	49	18	23	19
4	97	39	49	60	19	29	40
5	119	34	39	45	5	8	8
6	132	32	42	56	8	4	21
7	149	33	41	56	7	0	0
8	160	44	47	56	25	0	0
9	196	60	70	76	22	28	24
10	214	71	77	80	50	49	36
11	234	75	80	85	57	57	49
12	245	73	80	85	54	56	46
13	255	90	93	95	88	90	90
14	281	89	92	94	85	89	87
15	296	94	96	97	91	93	94
16	340	90	95	96	84	91	91
17	356	93	95	96	88	92	93
18	359	92	92	93	87	87	87
19	378	93	94	95	92	93	93
20	396	95	96	97	94	95	96
21	408	95	96	97	94	94	95
22	426	96	97	98	95	96	97
23	432	93	97	97	91	95	96
24	450	95	96	97	94	95	96
25	462	96	97	98	95	96	96
Promedio:		69	73	77	58	58	58
Desv. estándar:		29.2	27.5	25.4	37.1	38.8	38.5

Fuente: elaboración propia.

## **ANEXOS**

## Anexo 1. Especificaciones técnicas turbidímetro Hach® modelo 2100AN.

Specification	Details
Measurement method	Nephelometric
Regulatory	Meets EPA Method 180.1 ASTM D7315 - Standard Test Method for Determination of Turbidity Above 1 Turbidity Unit (TU) in Static Mode ASTM D6655 - Standard Test Method for Determination of Turbidity Below 5 NTU in Static Mode
Light source	Tungsten filament lamp
Measurement modes	NTU, NEP (Nephelo), EBC, Abs (absorbance), %T (% transmittance), CU (color units) and two user-defined units

Specification	Details
Range	NTU (Ratio on, manual range): 0–0.999, 0–9.99, 0–99.9, 0–10,000 NTU (Ratio on, auto range): 0–10,000 auto decimal NTU (Ratio off): 0–40 Nephelo (Ratio on, manual range): 0–9.99, 0–99.9, 0–67,000 Nephelo (Ratio on, auto range): 0–67,000 auto decimal Nephelo (Ratio off): 0–268 EBC (Ratio on, manual range): 0–0.999, 0–9.99, 0–99.9, 0–2450 EBC (Ratio on, auto range): 0–2450 auto decimal EBC (Ratio off): 0–9.8 Absorbance (manual range): 0–0.999, 0–2.00 Absorbance (auto range): 0–2.00 Transmittance (%): 1.0–100 Color units (at 455 nm): 0–500
Accuracy <sup>1, 2, 3, 4</sup>	Ratio on: ±2% of reading plus 0.01 NTU from 0–1000 NTU, ±5% of reading from 1000–4000 NTU, ±10% of reading from 4000–10,000 NTU Ratio off: ±2% of reading plus 0.01 NTU from 0–40 NTU Absorbance: ±0.005 Abs from 0–1 Abs at 455 nm Transmittance: 0.12% T from 10–100% T at 455 nm Color: ±2 CU from 0–30 (calibrated at 15 CU), ±5 CU from 0–500 CU (calibrated at 500 CU)

<sup>1</sup>Turbidity specifications identified using USEPA filter assembly, recently prepared formazin standard and matched 25-mm sample cells.

<sup>2</sup> Use of a flow cell is necessary to get color measurement specifications.

<sup>3</sup> Intermittent electromagnetic radiation of 3 volts/meter or greater may cause slight accuracy shifts.

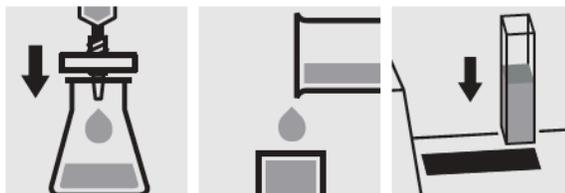
<sup>4</sup> Reference conditions: 23 ± 2 °C, 50% ± 10% RH noncondensing, 115/230 VAC, 50/60 Hz

Fuente: imagen tomada del manual de usuario Hach® 2100AN sexta edición, 2014.

## Anexo 2. Especificaciones técnicas fotómetro Merck modelo NOVA® 60



<b>Intervalo</b>	0 – 500 Pt/Co (Hz)	340 nm	cubeta de 10 mm
<b>de medida:</b>	0 – 250 Pt/Co (Hz)	340 nm	cubeta de 20 mm
	0 – 100 Pt/Co (Hz)	340 nm	cubeta de 50 mm



Filtrar la solución de le muestra a través de filtro de membrana de diámetro de poro 0,45 µm.

Introducir la solución en una cubeta deseada.

Introducir la cubeta en el compartimiento para cubetas, elegir método 032.

**Nota:**  
muestra filtrada = color real.  
muestra no filtrada = color aparente.

Fuente: imagen tomada del manual de usuario Merck® Spectroquant NOVA 60, métodos de análisis. 2003.

## Anexo 3. Límites máximos permisibles para las características físicas del agua, de la norma guatemalteca COGUANOR NGO 29001

Características	LMA	LMP
Color	5.0 u	35.0 u (1)
Olor	No rechazable	No rechazable
Sabor	No rechazable	No rechazable
Turbiedad	5.0 UNT	15.0 UNT (2)

(1) Unidades de color en la escala de platino-cobalto  
(2) Unidades nefelométricas de turbiedad (UNT). Estas siglas deben considerarse en la expresión de los resultados.

Fuente: imagen tomada de COGUANOR NGO 29001