

**Instituto Tecnológico de Costa Rica**  
**INFORME FINAL DE PROYECTO**  
**ESCUELA DE QUIMICA**



**“DESARROLLO DE COAGULANTES Y FLOCULANTES PARA LA  
REMOCIÓN DEL COLOR EN AGUAS DE CONSUMO HUMANO; EL RIO  
HUMO, RESERVA FORESTAL RIO MACHO”**

**INVESTIGADORES**

**B.Q. NOEMI QUIRÓS BUSTOS**  
**Lic. MARICRUZ VARGAS CAMARENO (Coordinadora)**  
**M.Sc. JOAQUÍN JIMÉNEZ ANTILLÓN**

29-06-2010

# Índice general

PORTADA .....	1
ÍNDICE GENERAL.....	<b>II</b>
LISTA DE ACRÓNIMOS .....	IV
RESUMEN .....	V
ABSTRACT .....	VI
<b>1. INTRODUCCIÓN.....</b>	<b>1</b>
1.1 REVISIÓN DE LA LITERATURA .....	2
1.1.1 Origen de la turbiedad y el color.....	2
1.1.2 Coloides .....	3
1.1.2.1 Clasificación de los coloides .....	3
1.1.2.2 Estabilidad de los coloides .....	3
Carga eléctrica de las partículas coloidales .....	4
Fuerzas de Van der Waals.....	4
Doble capa eléctrica.....	4
Mecanismos de desestabilización de los coloides .....	6
1.1.3 Polímeros.....	7
1.1.3.1 Polímeros sintéticos.....	7
1.1.3.2 Polímeros naturales .....	8
1.1.3.3 Modos de empleo de los polielectrolitos .....	8
1.1.4 Mecanismos en la remoción del color .....	9
1.1.4.1 Factores que afectan la coagulación del color .....	9
1.1.5 Sistemas de simulación del proceso de coagulación.....	9
1.2 OBJETIVOS .....	10
1.2.1 Objetivo general: .....	10
1.2.2 Objetivos específicos: .....	10
<b>2. MATERIALES Y MÉTODOS .....</b>	<b>11</b>
2.1 CONSIDERACIONES GENERALES .....	11
2.2 PROPUESTA DE TRATAMIENTO .....	11
2.3 ENSAYOS DE PRUEBA DE JARRAS EMPLEANDO SULFATO DE ALUMINIO COMO COAGULANTE Y POLÍMERO SINTÉTICO COMO FLOCULANTE.....	11
2.3.1 Preparación de agua artificial.....	11
2.3.2 Preparación de disoluciones acuosas de sulfato de aluminio, ácidos húmicos, caolín y CaO	11
2.3.3 Preparación del floculante aniónico y catiónico sintéticos .....	12
2.3.4 Pruebas de jarras aplicando sulfato de aluminio como coagulante y polímero aniónico sintético como floculante utilizando agua de río y agua artificial.....	12
2.3.5 Pruebas de jarras aplicando sulfato de aluminio como coagulante y polímero catiónico sintético como floculante utilizando agua de río y agua artificial.....	12
2.4 ENSAYOS DE PRUEBA DE JARRAS UTILIZANDO MORINGA OLEIFERA .....	13
2.4.1 Preparación de las disoluciones acuosas de Moringa oleifera y determinación de su capacidad coagulante .....	13
2.4.2 Ensayos utilizando Moringa oleifera como floculante empleando SA como coagulante.....	17
2.5 ENSAYOS DE PRUEBA DE JARRAS UTILIZANDO QUITOSANO COMO COAGULANTE.....	17
2.5.1 Preparación de disoluciones acuosas del quitosano al 0,1% (m/v).....	17
2.5.2 Determinación de la dosis óptima de quitosano como coagulante en una prueba preliminar de jarras empleando agua artificial .....	18
2.5.3 Determinación del pH y de la dosis óptima de quitosano empleando agua de río .....	18
2.6 ENSAYOS DE PRUEBA DE JARRAS UTILIZANDO MOZOTE DE CABALLO, TRIUNFETTA SEMITRILoba ...	18
2.6.1 Preparación de la disolución acuosa de mozote.....	18
2.6.2 Determinación de la capacidad coagulante del mozote de caballo Triumfetta semitriloba. ...	18
2.6.3 Determinación de la capacidad floculante del mozote de caballo Triumfetta semitriloba empleando SA como coagulante .....	19
2.7 ENSAYOS DE PRUEBA DE JARRAS UTILIZANDO TUNA CACTUS LEFARIA .....	19
2.7.1 Preparación de la disolución acuosa de tuna.....	19
2.7.2 Determinación de la capacidad coagulante de la tuna Cactus lefaria .....	19

2.7.3 <i>Determinación de la capacidad floculante de la tuna Cactus lefaria empleando SA como coagulante</i> .....	19
2.8 DETERMINACIÓN DE PARÁMETROS FISCOQUÍMICOS.....	20
2.8.1 <i>Temperatura y pH</i> .....	20
2.8.2 <i>Turbidez, color aparente y taninos</i> .....	20
2.8.3 <i>Alcalinidad, dureza, demanda química de oxígeno, color verdadero, ion amonio, oxígeno disuelto, su porcentaje de saturación y conductividad</i> .....	20
<b>3. RESULTADOS</b> .....	<b>21</b>
3.1 PRUEBA DE JARRAS APLICANDO SULFATO DE ALUMINIO COMO COAGULANTE Y FLOCULANTES SINTÉTICOS PARA EL TRATAMIENTO DE AGUA ARTIFICIAL Y DE RÍO .....	21
3.1.1 <i>Floculante aniónico NOVAFLOC PHA</i> .....	21
3.1.1.1 Agua artificial.....	21
3.1.1.2 Agua de río.....	23
3.1.2. <i>Floculante catiónico KF-930-S</i> .....	29
3.1.2.1 Agua artificial.....	29
3.1.2.2 Agua de río.....	31
3.2 EVALUACIÓN DE LA MORINGA PARA EL TRATAMIENTO DE AGUA DE RÍO Y AGUA ARTIFICIAL.....	35
3.2.1 <i>Evaluación de moringa como coagulante</i> .....	35
3.2.1.1 Agua de río.....	35
3.2.1.2 Agua artificial.....	37
3.2.2 <i>Evaluación de la moringa como floculante en agua artificial</i> .....	43
3.3 EVALUACIÓN DEL QUITOSANO COMO COAGULANTE PARA EL TRATAMIENTO DE AGUA ARTIFICIAL Y DE RÍO.....	44
3.3.1 <i>Agua artificial</i> .....	44
3.3.2 <i>Agua de río</i> .....	44
3.4 EVALUACIÓN DEL MOZOTE DE CABALLO TRIUMFETTA SEMITRILOBA PARA EL TRATAMIENTO DE AGUA ARTIFICIAL Y DE RÍO .....	46
3.4.1 <i>Evaluación del mozote como coagulante</i> .....	46
3.4.2 <i>Evaluación del mozote como floculante</i> .....	46
3.4.2.1 Agua artificial.....	46
3.5 EVALUACIÓN DE LA TUNA CACTUS LEFARIA PARA EL TRATAMIENTO DE AGUA DE RÍO Y AGUA ARTIFICIAL .....	48
3.5.1 <i>Evaluación de la tuna como coagulante</i> .....	48
3.5.1.1 Agua de río con y sin alcalinidad artificial.....	48
3.5.1.2 Agua modelo con alcalinidad artificial.....	48
3.5.2 <i>Evaluación de la tuna como floculante</i> .....	49
3.5.2.1 Agua modelo con alcalinidad artificial.....	49
3.5.2.2 Agua de río con alcalinidad artificial.....	51
3.6 EVALUACIÓN DEL FLOCULANTE CATIÓNICO KF-930-S COMO AYUDANTE DE COAGULACIÓN DEL SULFATO DE ALUMINIO EN AGUA ARTIFICIAL PARA SU COMPARACIÓN CON LOS FLOCULANTES NATURALES .....	52
3.7 COMPARACIÓN DEL DESEMPEÑO DEL SULFATO DE ALUMINIO CON LOS PRODUCTOS NATURALES UTILIZADOS COMO COAGULANTES EN AGUA ARTIFICIAL .....	53
3.8 COMPARACIÓN DEL DESEMPEÑO DE LOS FLOCULANTES NATURALES CON EL FLOCULANTE CATIÓNICO EN AGUA ARTIFICIAL .....	54
<b>4. DISCUSIÓN</b> .....	<b>56</b>
4.1 PRUEBAS PRELIMINARES APLICANDO SULFATO DE ALUMINIO COMO COAGULANTE Y FLOCULANTES SINTÉTICOS PARA EL TRATAMIENTO DE AGUA ARTIFICIAL Y DE RÍO .....	56
4.1.1 <i>Empleo del floculante aniónico NOVAFLOC PHA</i> .....	56
4.1.1.1 Agua artificial.....	56
4.1.1.2 Agua de río.....	57
4.1.2 <i>Comparación de la efectividad del floculante catiónico con el floculante aniónico para la clarificación del color en agua artificial</i> .....	59
4.1.2.1 Agua artificial.....	59
4.1.2.2 Agua de río.....	60
4.2. EVALUACIÓN DE LA MORINGA OLEIFERA PARA EL TRATAMIENTO DE AGUA DE RÍO Y AGUA ARTIFICIAL .....	61
4.2.1 <i>Evaluación de la moringa como coagulante</i> .....	61
4.2.1.1 Agua de río.....	61
4.2.1.2 Agua artificial.....	62

<i>Agua de río con alcalinidad y turbidez adicional</i> .....	63
4.2.2. <i>Evaluación de la moringa como floculante en agua artificial</i> .....	64
4.3 EVALUACIÓN DEL QUITOSANO PARA EL TRATAMIENTO DE AGUA ARTIFICIAL Y DE RÍO .....	65
4.3.1 <i>Agua artificial</i> .....	65
4.3.2 <i>Agua de río</i> .....	65
4.4 EVALUACIÓN DEL MOZOTE DE CABALLO TRIUMFETTA SEMITRILOBA PARA EL TRATAMIENTO DE AGUA ARTIFICIAL Y DE RÍO .....	66
4.4.1 <i>Evaluación del mozote como coagulante</i> .....	66
4.4.2 <i>Evaluación del mozote como floculante</i> .....	66
4.4.2.1 <i>Agua artificial</i> .....	66
<i>Agua de río con CaO añadido artificialmente</i> .....	67
4.5 EVALUACIÓN DE LA TUNA CACTUS LEFARIA PARA EL TRATAMIENTO DE AGUA DE RÍO Y AGUA ARTIFICIAL .....	67
4.5.1 <i>Evaluación de la tuna como coagulante</i> .....	67
4.5.1.1 <i>Agua de río con y sin alcalinidad artificial</i> .....	67
4.5.1.2 <i>Agua artificial con alcalinidad adicional</i> .....	67
4.5.2 <i>Evaluación de la tuna como floculante</i> .....	68
4.5.2.1 <i>Agua modelo con alcalinidad artificial</i> .....	68
4.5.2.2 <i>Agua de río con alcalinidad artificial</i> .....	68
4.6 EVALUACIÓN DEL FLOCULANTE CATIONICO KF-930-S COMO AYUDANTE DE COAGULACIÓN DEL SULFATO DE ALUMINIO EN AGUA ARTIFICIAL PARA SU COMPARACIÓN CON LOS FLOCULANTES NATURALES .....	68
4.7 COMPARACIÓN DEL DESEMPEÑO DEL SULFATO DE ALUMINIO CON LOS PRODUCTOS NATURALES UTILIZADOS COMO COAGULANTES EN AGUA ARTIFICIAL .....	69
4.8 COMPARACIÓN DEL DESEMPEÑO DE LOS FLOCULANTES NATURALES CON EL FLOCULANTE CATIONICO KF-930-S .....	69
4.9 VIABILIDAD TÉCNICA Y ECONÓMICA DE LA UTILIZACIÓN DE FLOCULANTES/COAGULANTES NATURALES PARA EL TRATAMIENTO DE AGUAS PARA CONSUMO HUMANO. ....	70
<b>5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....</b>	<b>71</b>
<b>6. REFERENCIAS .....</b>	<b>73</b>

## Lista de Acrónimos

QT	Quitosano
DOC	Carbono orgánico disuelto
TOC	Carbono orgánico total
SA	sulfato de aluminio
MO	Moringa oleifera
TU	tuna
MO	mozote
ICAA	Instituto Costarricense de Acueductos y Alcantarillados
ICE	Instituto Costarricense de Electricidad
FTU	Unidades nefelométricas de turbidez
UC	Unidades de color
DQO	Demanda Química de Oxígeno
NOM	Materia orgánica natural

## Resumen

*Se evaluó la efectividad de los productos naturales moringa (*Moringa oleifera*), mozote de caballo (*Triumfetta semitriloba*), tuna (*Cactus lefaria*) y quitosano para remover el color en agua de río y agua artificial, para consumo humano. Se utilizó agua del Río Humo, que es el principal afluente de la toma de agua que ingresa a la Planta Potabilizadora de Tres Ríos proveniente del Embalse El Llano, con la intención de sustituir los productos importados sulfato de aluminio o el floculante catiónico KF-930-S, que son utilizados en el proceso de potabilización. Como agua artificial se empleó agua del tubo con caolín y ácidos húmicos. Los productos naturales se evaluaron como coagulantes, y como floculantes. El agua de río se caracterizó por contener alto color, baja turbidez, baja alcalinidad y dureza y alta sobresaturación de oxígeno disuelto. En muestras de agua de río el producto natural que como coagulante presentó la mejor remoción de color fue el quitosano con un 30 % de eficiencia, comparado con un 89 % aplicando el tratamiento convencional. En agua artificial, el producto natural que mostró la mejor remoción de color, al ser evaluado como coagulante único, fue la tuna con una eficiencia del 94 % dejando un valor de DQO del agua tratada de 21 mg/l, en comparación con el tratamiento convencional con un 89 % de remoción y una DQO final de 10,3 mg/l. En agua artificial, el producto natural que como floculante mostró la mejor remoción de color, fue la tuna con un 96 % de eficiencia y una DQO del agua tratada de 42 mg/l. La moringa mostró una actividad coagulante del 89 % en la remoción del color cuando el agua presentó una turbidez de al menos 20 FTU. Los productos naturales ensayados no son sustituibles de forma total por los productos comerciales ya fuera como coagulantes o floculantes en el tratamiento de agua artificial o del Río Humo. Se recomienda extraer los principios activos de los productos naturales para reducir la carga orgánica en el agua tratada”.*

**Palabras clave:** coagulante, floculante, demanda química de oxígeno, Río Humo, sustancias húmicas

## Abstract

*The efficiency of the natural products moringa (*Moringa oleifera*), mozote (*Triumfetta semitriloba*), tuna (*Cactus lefaria*) and chitosan was evaluated for removing colour from river and artificial water, for human consumption. Water samples from Río Humo were used- which is the main tributary from El Llano reservoir which enters the Potabilization Treatment Plant in Tres Ríos- in order to substitute the imported products aluminium sulphate or the cationic flocculant KF-930-S. These products are added in the treatment process. Artificial water was prepared using tap water with kaolin and humic acids. The natural products were evaluated as coagulants and as flocculants. The river water samples were found to have a high colour content, low in turbidity, low in alkalinity and hardness, and showed high soluble oxygen saturation. In river water samples, the natural product which showed the best colour removal as coagulant was chitosan with 30 % efficiency, compared with 89 % using conventional treatment. In artificial water samples, the natural product which showed the best colour removal, as unique coagulant, was tuna, with 94 % efficiency and a soluble COD in the finished water of 21 mg/L, compared with 89 % efficiency colour removal and 10,3 mg/L of soluble COD, using the conventional treatment. In artificial water samples, the natural product which showed the best colour removal as flocculant was tuna with 89 % efficiency and a soluble COD of 42 mg/L. Moringa seeds showed 89 % coagulant efficiency for colour removal in water samples with at least 20 FTU in turbidity. The tested natural products are not completely replaceable as coagulants or flocculants instead of the commercial products for the clarification of Río Humo or artificial water samples. It is recommended to complement the conventional coagulant or flocculant doses with doses of the natural products, to diminish the amount used in the first ones.*

**Key words:** coagulant, flocculant, chemical oxygen demand, Humo River, humic substances



# 1. Introducción

La demanda de agua potable para la población del Área Metropolitana se ha incrementado enormemente en las últimas décadas. Para hacer frente a esta situación, el Instituto Costarricense de Acueductos y Alcantarillados (ICAA) ha buscado nuevas fuentes de abastecimiento de agua, como lo es captar 1,8 m<sup>3</sup>/s de agua del Embalse El Llano del Proyecto Hidroeléctrico de Río Macho, que es administrado por el Instituto Costarricense de Electricidad (ICE). Este caudal se conduce a la Planta Potabilizadora de Tres Ríos donde recibe el tratamiento adecuado, previo a ser enviado al sistema de distribución para su consumo. Esta fuente de agua tiene muy buena calidad física y química, excepto por el color que presenta. (Ruiz 1991)

La presencia de alto contenido de color en aguas superficiales o subterráneas se debe a la existencia de cierto tipo de sustancias orgánicas denominadas húmicas. En la actualidad se emplean varias tecnologías para clarificar el color proveniente de sustancias húmicas en el agua, para consumo humano. La filtración con membranas es una de ellas y da porcentajes de remoción de 60 a 70% (Domany Z et al. 2002) y puede ser tan eficiente como para eliminar hasta el 95 % del color inicial (Mora 2007). Sin embargo, esta tecnología resulta demasiado costosa para países como Costa Rica. El proceso de tratamiento de aguas de bajo costo, tanto para agua potable como para residual se basa en un tratamiento químico inicial a base de coagulantes y floculantes para remover la mayoría de la contaminación. Estos materiales son principalmente sulfato de aluminio o alumbre Al<sub>2</sub>(SO<sub>4</sub>)<sub>3</sub>, el cloruro férrico (FeCl<sub>3</sub>) y ciertos polímeros sintéticos, todos ellos importados de países desarrollados que constituyen un alto porcentaje en el costo total del agua potable (Picado 1984).

Los coagulantes y floculantes son sustancias que permiten remover principalmente sólidos suspendidos en el tratamiento de aguas. Las sustancias húmicas son ácidos orgánicos estructuralmente complejos que imparten un color oscuro al agua. Estas sustancias son causantes de muchos problemas durante el tratamiento del agua, en especial durante el proceso de coagulación, porque requiere de mayor cantidad de coagulantes y de polímeros, específicos para lograr la máxima eficiencia en la remoción del color. Las sustancias húmicas pueden además formar complejos con los metales o incluso con plaguicidas, los cuales pueden pasar a través de las plantas de tratamiento convencionales. Más aún, las sustancias húmicas interfieren en el proceso de cloración, porque generan trihalometanos, los cuales son tóxicos por su carácter carcinógeno o mutagénico (Ruiz 1991).

La Planta Potabilizadora de Agua de Tres Ríos recibe en promedio de 1,5 a 1,6 m<sup>3</sup>/s de agua del Embalse el Llano que proviene del Parque Nacional de Tapantí. Este caudal suministra agua potable a gran parte de la población del Área Metropolitana (alrededor de 600 mil habitantes). Los tributarios del embalse son los Ríos Humo, (que suministra en promedio 0,7 m<sup>3</sup>/s (Peña 2008), Porras, Villegas y Pejiballe (Montero, 2008). El caudal que proviene de Tapantí es también aprovechado para generar el nueve por ciento de la energía hidroeléctrica que produce el país (Gutiérrez F 2009).

Por un lado, el caudal que aporta el Río Humo representa alrededor del 50 por ciento del caudal total que ingresa al Embalse El Llano y, por otro lado, este río contiene un alto contenido de color (Ruiz 1991, Vargas et al. 2010), por lo tanto, es de gran importancia buscar soluciones a la remoción del color para su posterior consumo. El principal problema que presenta el agua proveniente del Río Humo es su baja turbidez y baja alcalinidad sumada a la sobresaturación de oxígeno disuelto, que provoca que este cuerpo de agua libere ese gas al aumentar la temperatura, lo que tiende a dificultar la precipitación de los flóculos que se forman en el proceso de clarificación. A su vez, la baja alcalinidad no da oportunidad de formar hidróxidos de aluminio (Vargas et al. 2010, Montero 2008). Cuando existe baja turbidez en el agua en presencia de color, se disminuye la superficie de los coloides, lo que desestimula la adsorción de las moléculas de color, situación que requiere consecuentemente mayores dosis de coagulantes (Arboleda 2000).

El empleo de productos naturales en el tratamiento de aguas que eventualmente podrían sustituir la importación de coagulantes metálicos y polímeros sintéticos, también se ha estudiado en Costa Rica. Por ejemplo, se ha ensayado el almidón en el tratamiento de agua potable (Picado 1984), como también el mozote de caballo en aguas residuales con remociones de turbiedad y DQO de hasta un 100 por ciento (Vargas y Romero 2009). Por lo anterior expuesto, se pretende determinar, caracterizar y evaluar las posibilidades técnicas, ambientales y económicas de utilizar materiales de origen natural como coagulantes y/o floculantes en la remoción del color de las aguas del Río Humo, como medida alterna en el uso de coagulantes o floculantes importados.

## **1.1 Revisión de la literatura**

### **1.1.1 Origen de la turbiedad y el color**

La turbidez es una característica del agua debida a la presencia de partículas suspendidas cuyo tamaño varía desde suspensiones groseras hasta coloides. La presencia de esas partículas provoca la dispersión y absorción de la luz, dando una apariencia turbia, estéticamente indeseable y potencialmente peligrosa (Spinelli 2001). La principal causa responsable de la turbidez en el agua son arcillas, minerales, sedimentos, materia orgánica e inorgánica finamente dividida, plancton y otros organismos microscópicos, siendo las arcillas la causa más común de turbiedad (Picado 1984). En cuanto al tamaño de las partículas formadoras de color existe desacuerdo respecto si estas sustancias están completamente disueltas en el agua o en estado coloidal. Arboleda señala que la mayoría de las partículas presentan tamaños inferiores a 3,5  $\mu\text{m}$ , lo que está muy cerca del límite entre dispersión coloidal y solución verdadera (Arboleda 2000).

La presencia del color en aguas superficiales o subterráneas se debe a la existencia de cierto tipo de sustancias orgánicas denominadas húmicas. La intensidad del color en el agua depende de varios factores, como lo es la cantidad de lluvia que disuelve o arrastra a este tipo de sustancias que originalmente están presentes en la materia orgánica del bosque. El color puede variar considerablemente, siendo nula en época seca o muy intensa después de una fuerte precipitación. Otros factores causantes del color son el tipo de superficie en el área de desagüe, la cantidad de materia orgánica en descomposición y la velocidad con que esta se efectúa. El color puede ser causado también por la presencia de iones metálicos en disolución como el hierro o el

manganeso, no obstante, se ha demostrado que la concentración de estos iones no aporta color al agua del Río Humo (Ruiz 1991).

En el tratamiento del agua, el objetivo de la coagulación y floculación es transformar las impurezas que se encuentran en suspensión fina, en estado coloidal o en solución, los microorganismos y el plancton, en partículas de mayor tamaño (flóculos) para que puedan ser eliminadas por sedimentación, y/o filtración o, en algunos casos, por flotación. Las partículas coloidales presentes en el agua exhiben los mayores problemas cuando se trata la remoción de la turbidez y el color. Lo anterior se debe a las propiedades electrocinéticas de los coloides y también a la consecuencia del tamaño tan reducido de las partículas (Spinelli 2001).

En general, los coagulantes producen flóculos mediante la desestabilización de partículas que tienen carga negativa, mientras que los floculantes favorecen el crecimiento de los flóculos por la formación de puentes poliméricos entre las partículas/coloides, sin embargo, la distinción entre los dos puede ser complicado en tanto que pueden ocurrir múltiples mecanismos en la formación de los flóculos. Las sales metálicas, como el sulfato de aluminio, usadas como coagulantes forman especies activas al ser adicionadas al agua. Estas especies activas desestabilizan a las partículas ya sea por neutralización de cargas, donde las especies catiónicas con alta densidad de carga que se forman con la hidrólisis se adsorben a las partículas presentes en el agua, o por coagulación por barradura (*sweep coagulation*) donde los precipitados del oxihidróxido de aluminio aglomeran a las partículas al momento de su sedimentación. Los procesos de hidrólisis y desestabilización ocurren en fracciones de segundo (Droppo et al. 2008).

## **1.1.2 Coloides**

### **1.1.2.1 Clasificación de los coloides**

En los estudios sobre las técnicas del tratamiento de aguas se consideran los coloides hidrofílicos e hidrofóbicos. Los primeros son compuestos polares, solubles en agua, que atraen hacia sí moléculas del medio dispersante (agua), formando una película que ejerce una acción protectora, dándole así bastante estabilidad (difícil de coagular y flocular). Los jabones y detergentes corresponden a este grupo. En los coloides hidrofóbicos, la fase dispersa está constituida por material insoluble en agua, como por ejemplo, arcillas, metales, grasas y aceites, y por tal razón, son mucho menos estables que los hidrofílicos. Este tipo de coloide generalmente ocurre en mayor cantidad que los hidrofílicos, en aguas destinadas para consumo humano (Spinelli 2001, Arboleda 2000).

### **1.1.2.2 Estabilidad de los coloides**

Entre las fuerzas que intervienen en la estabilización o repulsión entre las partículas está la carga de las partículas y la hidratación. Esta última tiene importancia en los coloides hidrofílicos. Los factores de desestabilización de importancia son el movimiento browniano y las fuerzas de Van der Waals. (Picado 1984)).

### ***Carga eléctrica de las partículas coloidales***

Se ha demostrado que la carga eléctrica de las partículas coloidales es negativa y ayuda en la estabilización de las suspensiones coloidales (Picado 1984).

### ***Fuerzas de Van der Waals***

Las fuerzas de Van der Waals son la principal fuerza atractiva entre las partículas coloidales. Son de origen eléctrico y de débil magnitud en tanto que disminuyen rápidamente con la distancia, ocurren por la interacción de dipolos permanentes o inducidos en las partículas (Picado 1984).

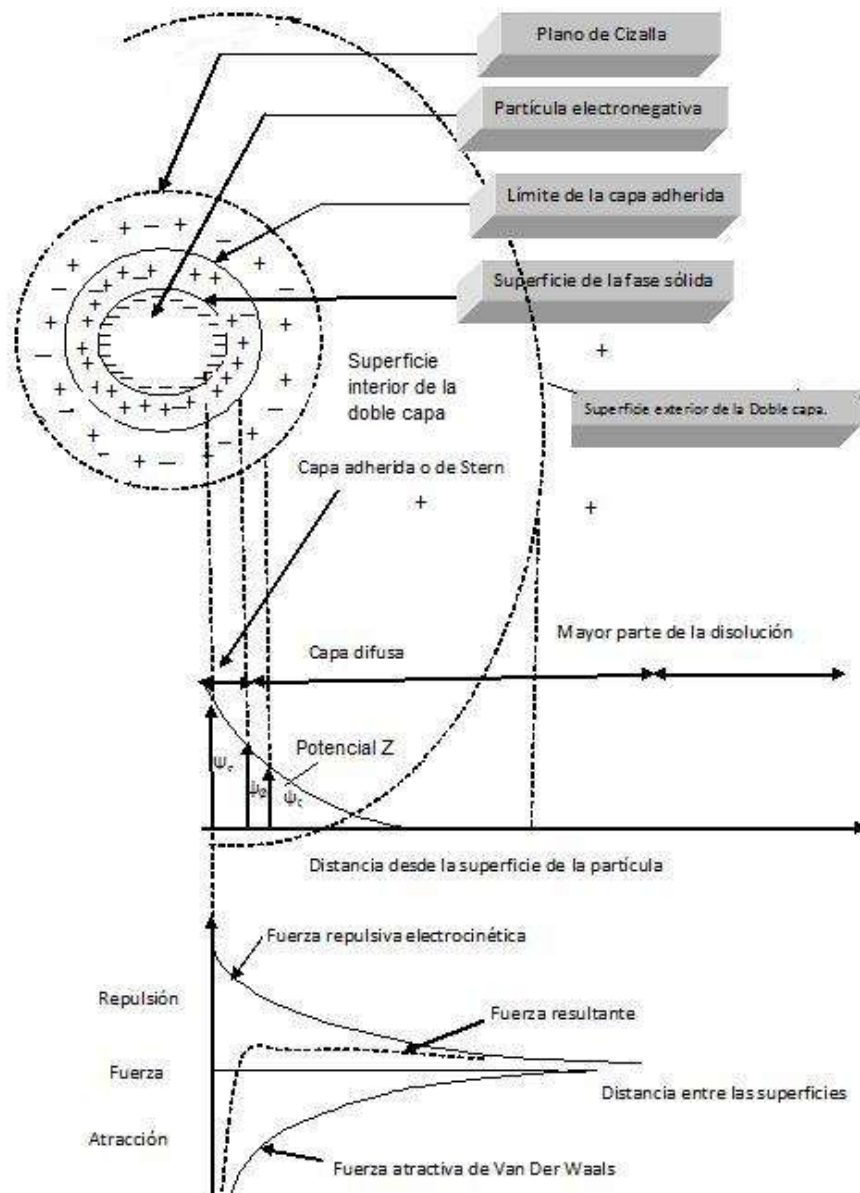
### ***Doble capa eléctrica***

Las partículas tienen carga eléctrica pero la dispersión coloidal no tiene carga eléctrica neta, porque la carga de la partícula es equilibrada en la fase acuosa. Por lo tanto, existe una doble capa eléctrica en cada interfase entre un sólido y el agua. Esta doble capa está formada por la partícula con su carga correspondiente y un conglomerado igual de iones de carga contraria que se ubican cerca de la superficie de la partícula en la fase acuosa. Para explicar este concepto se han presentado tres teorías, entre las cuales la que postuló Stern en 1924, es la que mejor explica este fenómeno. En este modelo se acepta la coexistencia de una capa adherida y una capa difusa alrededor del coloide, como se indica en la Figura I-1. El potencial cae rápidamente en la capa adherida y lentamente en la capa difusa. La capa adherida se denomina capa de Stern, la cual por moverse junto con la partícula se puede considerar como parte del coloide (Picado 1984).

En este modelo deben tenerse en cuenta los siguientes potenciales:

- a) el que existe en la superficie del coloide (potencial de Nernst)
- b) el que existe en el interior de la superficie de la doble capa, en donde empieza la capa difusa
- c) el potencial en el plano de cizalla (zeta).

El plano de cizalla es el que separa del resto de la dispersión, la sección de la capa que se mueve con la partícula formando parte integral de ella; y se encuentra en algún punto entre la superficie interior y la exterior de la capa difusa.



**Figura I-1: Modelo de la doble capa eléctrica para una partícula coloidal (Arboleda 2000)**

Cuando dos coloides se acercan mutuamente, dos fuerzas opuestas empiezan a operar. La fuerza electrostática debida a la carga de los coloides que los repele y la fuerza de Van der Waals que los atrae. La fuerza resultante entre estos coloides se muestra en la Figura I-1 como línea punteada y tiene una cresta que es llamada barrera de energía. Para que un coloide flocule, es decir, que se aglutine con otros, se requiere que las partículas se aproximen a una distancia menor que la que existe entre el centro del coloide y la barrera de energía. La ubicación de la barrera de energía varía con el pH. Los coloides se acercan a distancias menores que la de la barrera de energía cuando el potencial zeta baja hasta un punto llamado “punto isoelectrico” ( $Z = 0$ ), lo cual sucede si se neutraliza la carga “q”, o se comprime la doble capa por incrementar la cantidad de iones en la solución (Picado 1984, Arboleda 2000, Spinelli 2001).

## ***Mecanismos de desestabilización de los coloides***

Se describen cuatro mecanismos empleados para describir la acción de los coagulantes en la remoción de las partículas coloidales.

### (a) Compresión de la doble capa

Un sistema coloidal puede ser desestabilizado por la adición de iones de carga contraria a la de las partículas coloidales. La desestabilización de un coloide por un electrolito ocurre debido a interacciones electrostáticas y cuanto mayor es la carga del ion positivo, menor es la cantidad requerida para la coagulación. Para el caso de los iones sodio, calcio y aluminio, las concentraciones molares de esos metales para causar la desestabilización de un coloide varían en una proporción de  $1:10^{-2}:10^{-3}$  (Spinelli 2001). En la Figura I-1 se observan las energías involucradas en el modelo de doble capa. A pesar de que la fuerza de atracción es fija, la fuerza de repulsión eléctrica puede ser disminuida con el aumento de la concentración de iones de carga opuesta en la solución. Al suceder esto, disminuye la curva resultante de interacción, permitiendo que las partículas puedan acercarse entre ellas lo suficiente para ser desestabilizadas por efecto de la fuerza de atracción Van Der Waals (Picado 1984).

### (b) Adsorción y neutralización de cargas

La desestabilización de una dispersión coloidal consiste de interacciones entre el coagulante-coloide, coagulante-disolvente y coloide-disolvente. Este mecanismo es muy importante cuando el tratamiento es realizado a través de filtración directa, pues no hay necesidad de producir flóculos para su posterior sedimentación, sino de partículas desestabilizadas que serán retiradas del medio filtrante (Spinelli 2001)

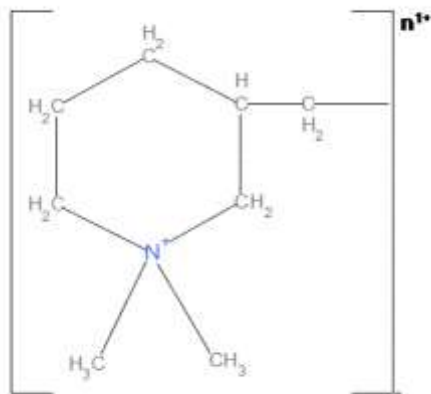
### (c) Barredura o “*sweep coagulation*”

Este mecanismo se produce cuando se agrega una concentración de coagulantes tan alta, que se supera el producto de solubilidad de esos compuestos en el agua, esto es, hidróxidos metálicos, como el  $\text{Al}(\text{OH})_3$  y  $\text{Fe}(\text{OH})_3$ . En ese momento los hidróxidos se forman por la reacción de la alcalinidad del agua misma con los coagulantes, con lo que se induce la producción de una masa esponjosa (floc de barrido) que atrapa en su caída a los coloides y partículas suspendidas que decantan, incorporadas dentro del precipitado que desciende (Arboleda 2000). Este mecanismo es el más frecuente en tanto que las dosis que se utilizan están por encima del límite de solubilidad de los hidróxidos de aluminio o hierro en el agua, a los pH y temperaturas normales de trabajo.

### (d) Adsorción y formación de puentes

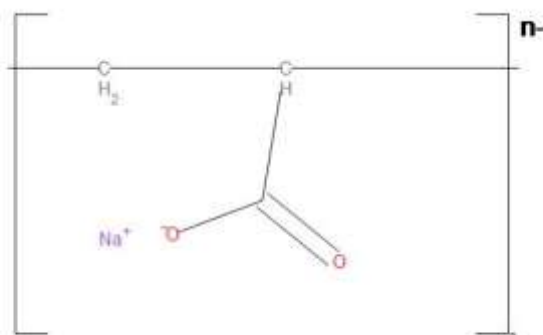
Existe un grupo de compuestos orgánicos sintéticos y naturales que se caracterizan por tener grandes cadenas moleculares y pueden presentar sitios ionizables a lo largo de la cadena y por tanto, de actuar como coagulantes (Spinelli 2001). Para tener una idea gráfica de este mecanismo, referirse al trabajo realizado por Picado (Picado 1984). Estos polímeros pueden ser clasificados como:

Catiónicos: que presentan sitios ionizables positivos, por ejemplo el cloruro de polidialil-dimetilamonio (véase la Figura I-2)



**Figura I-2: Estructura molecular del floculante catiónico cloruro de polidialil-dimetilamonio empleado en la Planta Potabilizadora de Tres Ríos**

Aniónicos: presentan sitios ionizables negativos, por ejemplo el poliacrilato de sodio (véase la Figura I-3).



**Figura I-3: Estructura molecular del poliacrilato de sodio como floculante aniónico**

No iónicos: no presentan sitios ionizables (óxido de polietileno)

### 1.1.3 Polímeros

#### 1.1.3.1 Polímeros sintéticos

Los polímeros orgánicos sintéticos pueden ser usados ya sea como coagulantes o como floculantes, dependiendo del carácter molecular y de la forma de acción sobre los sólidos suspendidos. Los coagulantes poliméricos poseen típicamente una masa molar pequeña y una alta densidad de carga, y actúan sobre los coloides produciendo coagulación por neutralización de cargas. Los floculantes poliméricos- que para el caso de esta investigación son los floculantes aniónico y catiónico utilizados- poseen una elevada masa molar y baja densidad de carga, y actúan principalmente formando puentes interpartícula (Droppo et al. 2008). La coagulación es a menudo favorecida con el uso de ayudantes de la coagulación o floculantes. Algunas veces, se añade un exceso

del coagulante para favorecer flóculos de gran tamaño y velocidades de sedimentación rápidas. No obstante, en ciertos casos, aún grandes dosis de coagulante no van a producir flóculos satisfactorios. En estos casos se adiciona un floculante para acelerar las reacciones y producir flóculos más densos y con ello se reduce la cantidad de coagulante requerido. Los floculantes actúan por la formación de puentes de polímero que aglomeran rápidamente a los flóculos pequeños formando un floc más grande y cohesivo, que sedimenta más rápido. Los floculantes también ayudan a formar una coagulación satisfactoria en un mayor ámbito de pH. Los tipos de floculantes más efectivos son las poliácridamidas ligeramente aniónicas con masas moleculares muy elevadas que se aplican en muy bajas concentraciones (0,01 a 1,0 mg/l) lo que compensa su alto precio (Arboleda 2000).

En la Planta Potabilizadora del ICAA, se utilizó en el pasado un polímero aniónico sólido, no obstante, debido a su difícil solubilización en agua no se utiliza. Actualmente, se emplea el cloruro de polidialil-dimetilamonio KF-930 S que es catiónico (Montero G, 2008) y cuya estructura molecular se muestra en la Figura I-2 anterior.

Hasta el presente se emplea una gran variedad de polímeros sintéticos, sin embargo, la toxicidad de estos productos es un factor de importancia en tanto que en ocasiones los monómeros que los componen pueden ser tóxicos, como lo son los monómeros acrílicos (Van Breemen, 2001).

### **1.1.3.2 Polímeros naturales**

Son aquellos que se producen por reacciones bioquímicas naturales en animales y plantas. Son polímeros que muchas veces no tienen una sola composición química definida, pues están constituidos principalmente por varios tipos de polisacáridos (por ejemplo almidón, celulosa, glucósidos, entre otros) y proteínas (por ejemplo caseína, gelatina, olieratina, entre otros). Se ha encontrado que proteínas solubles en agua contenidas en semillas de *Moringa oleifera* presentan propiedades coagulantes y floculantes, y se han utilizado tradicionalmente como clarificadores para aguas de consumo humano (Ndabigengesere et al. 1995). La toxicidad de los polímeros naturales es, por lo general, mínima o nula, incluso se utilizan en muchos casos como combustibles o como aditivos en diversos productos alimenticios (CEPIS 1975).

### **1.1.3.3 Modos de empleo de los polielectrolitos**

Los polielectrolitos, ya sea naturales o sintéticos pueden ser añadidos al agua de tres maneras distintas: como coagulantes; como ayudantes de la coagulación y como ayudantes de floculación. El primer caso supone que el electrolito es agregado al agua como único coagulante en lugar del coagulante metálico. En el segundo caso, el polímero es añadido antes del coagulante metálico y en el tercero, después del mismo. Los tres casos suponen mecanismos de acción diferentes (Arboleda 2000).



#### **1.1.4 Mecanismos en la remoción del color**

Existe bastante desacuerdo entre autores con relación a cuáles pueden ser los mecanismos que inducen la coagulación del color, debido a la falta de conocimiento acerca de la estructura química de las sustancias que lo producen. Sin embargo, existe un consenso en que la máxima remoción ocurre cuando la carga de las partículas está cerca del punto isoeléctrico, pero casi nunca exactamente en el punto isoeléctrico. La cantidad de coagulantes metálicos necesarios para remover el color es directamente proporcional a la cantidad de color removido (Arboleda 2000).

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

##### **1.1.4.1 Factores que afectan la coagulación del color**

La coagulación del color es un fenómeno complejo donde intervienen al menos ocho factores que pueden modificarlo: dosis de coagulantes; pH; concentración de coloides o turbiedad; concentración de sustancias orgánicas en el agua; iones disueltos presentes; intensidad de la mezcla rápida y gradiente de velocidad de la mezcla lenta; movilidad electroforética de las partículas y la temperatura (Arboleda 2000).

Las aguas de más difícil coagulación son las que tienen baja turbidez (turbiedades menores de 20 FTU), ya sea en presencia de color o no. El color cuando está solo requiere de altas dosis de coagulantes y los iones en disolución interfieren en la coagulación. Por ejemplo, cationes divalentes ( $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ) ayudan a la desestabilización de los coloides, razón por la cual se recomienda añadir cal al agua, en especial si esta es poco mineralizada (Arboleda 2000).

#### **1.1.5 Sistemas de simulación del proceso de coagulación**

Estos sistemas consisten en imitar en unos vasos de precipitado o jarras el proceso de coagulación producido en la planta potabilizadora. Con ellos se evalúa el funcionamiento de los ensayos. Las pruebas de jarras es un sistema de simulación que consta de un agitador múltiple de velocidad variable que puede crear turbulencia simultáneamente en 6 vasos de precipitado (Arboleda 2000) y es utilizada por el ICAA para efectuar el control de calidad del agua tratada (Montero 2008).

En Costa Rica el agua definida como apta para consumo humano debe cumplir con los parámetros de calidad que se indican en el reglamento 32327-S-MINAE, publicado el 3 de mayo del 2005. Dentro de los parámetros que se norman, se encuentra el color y la turbiedad, los cuales se muestran en el Cuadro I-1:

Cuadro I-1: Parámetros de Calidad del agua para consumo humano (MINSA 2005)

Parámetro	Unidad	Valor recomendado	Valor máximo admisible <sup>(b)</sup>
Color aparente	mg/L (Unidades de Pt-Co o UC)	5	15
Turbiedad	FTU	Menor que 1	5

(a) Valores tomados del reglamento 32327-S-MINAE, publicado el 3 de mayo del 2005.

(b) VMA en no más del 10 % de las muestras analizadas durante el año

Dentro de este contexto, se propone el empleo de coagulantes o floculantes naturales como sustitutos de los coagulantes sintéticos importados.

## 1.2 Objetivos

### 1.2.1 Objetivo general:

Determinar, caracterizar y evaluar las posibilidades técnicas, ambientales y económicas de utilizar materiales naturales como coagulantes y/o floculantes en la remoción del color de las aguas del Río Humo.

### 1.2.2 Objetivos específicos:

- 1) Determinar la eficiencia y las condiciones experimentales para la remoción de color en agua utilizando coagulantes y/o floculantes naturales.
- 2) Realizar pruebas en alguna (s) planta (s) de tratamiento de agua a nivel piloto utilizando los coagulantes y/o floculantes identificados previamente.
- 3) Determinar la factibilidad económica y técnica ambiental de los materiales identificados en el proyecto como coagulantes y/o floculantes potencialmente prometedores.

## **2. Materiales y métodos**

### **2.1 Consideraciones generales**

En esta sección se exponen los materiales y métodos clasificados según el tipo de material utilizado como coagulante o floculante en los ensayos de pruebas de jarras. Para cada material se siguió el orden cronológico en que fueron llevados a cabo los ensayos.

### **2.2 Propuesta de tratamiento**

Para establecer los parámetros óptimos se empleó el procedimiento de la prueba de jarras siguiendo el método recomendado por el Instituto de Salud Pública de la Ciudad de Sapporo, Japón (Sapporo City Institute of Public Health, 2003). Los parámetros óptimos considerados fueron: pH de coagulación, dosis de coagulante y de floculante, velocidad y tiempo de agitación lenta. En algunos tratamientos se determinó el color y turbidez filtrados, así como la DQO soluble. En los casos donde el método Sapporo resultó insuficiente, se utilizaron métodos recomendados por otros autores.

### **2.3 Ensayos de prueba de jarras empleando sulfato de aluminio como coagulante y polímero sintético como floculante**

#### **2.3.1 Preparación de agua artificial**

Agua modelo con altos valores de turbidez y color fue preparada con la intención de evaluar los coagulantes en condiciones que se sabe dan buenos resultados para remover color y turbidez en forma eficiente (Ruiz 1991).

#### **2.3.2 Preparación de disoluciones acuosas de sulfato de aluminio, ácidos húmicos, caolín y CaO**

Se utilizó sulfato de aluminio  $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 18 \text{H}_2\text{O}$  de la marca J.T.Baker grado reactivo, sales de sodio de ácidos húmicos y caolín de Sigma-Aldrich.

Se prepararon disoluciones madre al 10 % m/v en  $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$  pesando 19,49 g del reactivo y disolviendo en 100 ml de agua destilada. Se diluyó con agua destilada para obtener la disolución de trabajo al 1 % en  $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ . La disolución de trabajo se prepara nueva cada vez que se utiliza.

La disolución madre de ácidos húmicos se preparó disolviendo 2,0 g de la sal de sodio de ácidos húmicos en 500 ml de agua destilada. Luego se filtró con papel Whatman 40 *ashless* y se almacenó en botella de vidrio color ámbar. La disolución de trabajo de ácidos húmicos se obtuvo tomando una alícuota de 1,25 ml de la disolución madre y diluyendo a 100 ml.

La disolución madre de caolín se preparó disolviendo 2,5 g del sólido en 500 ml de agua destilada con posterior agitación por 30 minutos. La disolución se deja reposar por 24 horas y luego se decanta el sobrenadante.

La disolución saturada de óxido de calcio se preparó suspendiendo 0,3 g del reactivo en 100 ml de agua destilada con posterior agitación durante 20 minutos. La suspensión resultante se filtró al vacío con papel Whatman 1.

### **2.3.3 Preparación del floculante aniónico y catiónico sintéticos**

El floculante aniónico es NOVAFLOC PHA de la casa Novamax Technologies cuyo componente es acrilamida y copolímero del acrilato de sodio. Se prepararon disoluciones acuosas de trabajo al 0,02 % masa/volumen pesando 0,2 g del polímero sólido en 1000 ml de agua desionizada.

El floculante catiónico FK-930 S (polímero del cloruro de dialildimetilamonio) fue suministrado por el personal de la Planta Potabilizadora del ICAA y se preparó diluyendo 1 ml del producto comercial en 1 litro de agua desionizada, dando una concentración de trabajo del 0,1 %.

### **2.3.4 Pruebas de jarras aplicando sulfato de aluminio como coagulante y polímero aniónico sintético como floculante utilizando agua de río y agua artificial**

Los ensayos se realizaron siguiendo el método recomendado por el Instituto de Salud pública de la Ciudad de Sapporo (Sapporo City Institute of Public Health, 2003).

Primero se evaluó la eficiencia del sulfato de aluminio (SA) variando el pH de coagulación. Se utilizó una dosis fija de SA de 10 mg/l (1,00 ml) de la disolución al 1%. El gradiente de agitación rápida fue de  $100 \text{ s}^{-1}$  (100 rpm) durante 1 minuto. Luego se bajó la velocidad a 60 rpm y se reguló el pH. Se añadió 3,00 ml de la disolución del floculante aniónico NPHA a una concentración de 0,02 % dando una dosis de 0,60 mg/l y se agitó a un gradiente de  $42 \text{ s}^{-1}$  (50 rpm) durante 5 minutos. Las mezclas se dejaron decantar durante 20 minutos para luego determinar turbidez y color aparente remanentes y en algunos casos la calidad del flóculos. Con el valor de pH que mostró el mejor tratamiento se procedió a determinar la dosis de SA dejando el resto de los parámetros fijos. Con la mejor dosis de SA se procedió a determinar la dosis óptima del floculante.

### **2.3.5 Pruebas de jarras aplicando sulfato de aluminio como coagulante y polímero catiónico sintético como floculante utilizando agua de río y agua artificial**

Para los ensayos donde se utilizó agua de río, se siguió el método citado en el apartado 2.3.4 para obtener los valores óptimos de pH, dosis de SA y de floculante. Con estos parámetros se procedió a determinar el mejor tiempo de agitación lenta aplicando tres distintos gradientes de agitación lenta, a saber: 30 rpm ( $23 \text{ s}^{-1}$ ), 40 rpm ( $33 \text{ s}^{-1}$ ) y 50

rpm ( $44 \text{ s}^{-1}$ ). A partir de los mejores tratamientos se filtran las muestras al vacío y se les determina turbidez, color, aluminio residual y DQO. Los resultados de estos ensayos se observan en la sección 3.2.2.

La siguiente metodología se refiere a la evaluación del floculante KF-930-S en agua artificial para su comparación con los productos naturales como floculantes. Se siguió el método citado en el apartado 2.3.4 utilizando un pH de floculación de 7,50 y se aplicó un volumen de CaO (disolución saturada) de 0,5 ml, en todas las jarras. Se determinó la dosis óptima de sulfato de aluminio a tres dosis distintas del floculante. Se utilizó una velocidad de floculación de 50 rpm durante 8 minutos. Los mejores tratamientos se filtraron y se les determinó la turbidez, el color y la DQO. Los resultados de estos ensayos se observan en la sección 3.6.

## **2.4 Ensayos de prueba de jarras utilizando *Moringa oleifera***

### **2.4.1 Preparación de las disoluciones acuosas de *Moringa oleifera* y determinación de su capacidad coagulante**

Las semillas de moringa fueron obtenidas de Nicaragua a través del Centro Agrícola Cantonal de Hojancha, Guanacaste. Inicialmente se siguió el método citado por Muyibi y Evison (Muyibi y Evison, 1995) para la preparación de la disolución del coagulante, sin embargo, al no obtener resultados satisfactorios, este procedimiento fue modificado. El procedimiento fue modificado en los siguientes aspectos: porción de la semilla que fue procesada; tipo de molienda; tipo de extracción y de filtración. Como consecuencia, la preparación de las disoluciones de moringa fue de muy diversas maneras. En este estudio se efectuó una gran cantidad de pruebas de jarras empleando moringa ya fuera como coagulante (con o sin floculante) o como floculante utilizando como coagulante el sulfato de aluminio, sin embargo, muchas de ellas no dieron resultados favorables. Por lo anterior, en este informe se indica únicamente cómo fueron preparadas las disoluciones de moringa en los casos donde se obtuvieron remociones de color o turbidez superiores al tratamiento control.

Las semillas con que se prepararon todas las disoluciones se les removieron las alas. La dosis expresada de moringa en mg/l, ya fuera como coagulante o floculante, se refiere a la masa del polvo crudo utilizado para preparar dichas disoluciones. Sin embargo, después de filtrar la mezcla agua y polvo de semillas, una gran parte del sólido permaneció en el papel filtro. Por tal razón, las dosis reportadas son teóricas.

El 14 de agosto de 2008 se molieron las semillas con la cáscara en un procesador de alimentos Food Processor marca Nacional hasta obtener un polvo bastante fino. El procesador fue esterilizado previamente con alcohol en gel. El polvo fino se almacenó en desecador hasta su próximo uso. Se añaden 5,0 g del polvo de las semillas a 200 ml de agua destilada y se licua por 30 segundos en una licuadora común, para extraer el ingrediente activo. La suspensión resultante se filtra al vacío con papel Whatman 4; el filtrado se filtra a través de microfibras de vidrio FV-C Abet. El filtrado se afora a 500 ml con agua destilada para obtener una disolución al 1%.

### 2.4.1.1 Agua de río

Pruebas preliminares aplicando moringa como coagulante y polímero aniónico sintético como floculante utilizando agua de río siguiendo el Método Sapporo.

#### Determinación del pH óptimo

Se añade 1 L de agua del tercer muestreo de la época lluviosa 2008 (Cuadro 1 en la sección Resultados) a todas las jarras y se agita a 100 rpm, luego se añaden 5,00 ml de la disolución de moringa al 1 % a cada jarra excepto al blanco y se deja en agitación por 1 minuto. Ese volumen supone una dosis teórica de 50 mg/l. Se baja la velocidad a 60 rpm y se ajusta el pH a las muestras excepto al blanco que utiliza el pH original de 7,15. Se añaden 3,00 ml de una disolución del floculante aniónico al 0,02 % a cada jarra (excepto al blanco) dando una dosis de 0,60 mg/l. La velocidad de agitación se baja a 50 rpm y se mantiene durante 5 minutos. Se deja en reposo durante 20 minutos para luego medir la turbidez, color y pH finales. Los resultados de esta prueba de jarras corresponden a la **Figura 23** en la sección de Resultados.

Determinación de la dosis óptima de moringa al 1% utilizando el pH óptimo obtenido de la prueba de jarras anterior.

Se añade 1 L de agua del tercer muestreo de la época lluviosa 2008 a todas las jarras y se agita a 100 rpm, luego se añaden dosis de la disolución de moringa al 1 % desde 50 hasta 130 mg/l excepto para el blanco y se deja en agitación por 1 minuto. Se baja la velocidad a 60 rpm y se ajusta el pH a las muestras excepto al blanco que utiliza el pH original de 7,18. Se añaden 3,00 ml de una disolución del floculante aniónico al 0,02 % a cada jarra excepto al blanco dando una dosis de 0,60 mg/l. La velocidad de agitación se baja a 50 rpm y se mantiene durante 5 minutos. Se deja en reposo durante 20 minutos para luego medir la turbidez, color y pH finales. Los resultados de esta prueba de jarras corresponden a la **Figura 25** en la sección de Resultados.

Determinación de la dosis óptima de moringa al 20 % como coagulante único siguiendo el método recomendado por Muyibi y Evison (Muyibi y Evison, 1995)

Preparación de la disolución de coagulante, 5 de mayo 2009

Se morterizan 20 g de núcleos de las semillas hasta obtener el tamaño de partícula más pequeño posible y se añaden a 100 ml de agua desionizada. Se deja en agitación por 2 horas y se deja en reposo hasta el día siguiente. Suspensión resultante se filtra al vacío con papel filtro Whatman 4 y después con Whatman 1. La disolución resultante tiene una concentración al 20 %.

Se añade 1L del agua del segundo muestreo de la época seca de 2009 a todas las jarras y se agita a 100 rpm. Se añaden volúmenes de moringa al 20 % en dosis crecientes hasta 1000 mg/l, excepto para un blanco y se deja en agitación por 1 minuto. Se baja la velocidad a 20 rpm y se mantiene durante 20 minutos. El tiempo de reposo es de una hora. Los resultados de este ensayo se observan como cuadros verdes en las **Figuras 33 y 34** en la sección de Resultados.

### 2.4.1.2 Agua artificial

Determinación de la capacidad coagulante de *Moringa oleifera* siguiendo el método citado por Muyibi y Evison (Muyibi y Evison, 1995) en agua artificial

Preparación de disolución de moringa, 18 de febrero de 2009

Se añaden 5,0 g de las semillas pulverizadas (el 14-08-2008) a 200 ml de agua destilada y se agita durante 30 minutos con agitación magnética. Se filtra la suspensión por papel filtro Albert DP150 125 mm al vacío. Luego se afora hasta 250 ml con agua destilada dando una concentración del 2 %.

Se añade 1 L de agua artificial a todas las jarras y se agita a 170 rpm, luego se añaden al agua a su pH natural las dosis de disolución al 2 % de moringa. Las dosis van desde 50 hasta 300 mg/l y se deja en agitación por 2 minutos. Se baja la velocidad a 35 rpm y se mantiene durante 20 minutos. El tiempo de reposo es de 2 horas. Luego se mide la turbidez, color, pH y calidad del flóculo finales. Los resultados de esta prueba de jarras corresponden a la **Figura 27** en la sección de Resultados.

Determinación de la capacidad coagulante de *Moringa oleifera* utilizando polímero catiónico como floculante siguiendo el método citado por Muyibi y Evison

Se añade 1 L de agua artificial a todas las jarras y se agita a 170 rpm, luego se añaden al agua a su pH natural las dosis de disolución al 2 % de moringa. Las dosis van desde 50 hasta 300 mg/l y se deja en agitación por 2 minutos. Se baja la velocidad a 35 rpm y se añade 1,00 ml de disolución al 0,1 % del polímero catiónico como floculante, equivalente a una dosis de 1,00 mg/l. La agitación se mantiene durante 20 minutos. El tiempo de reposo es de 2 horas. Luego se mide la turbidez, color, pH y calidad del flóculo finales. Los resultados de esta prueba de jarras corresponden a la **Figura 29** en la sección de Resultados.

Determinación de la capacidad coagulante de *Moringa oleifera* al 20 % siguiendo el método citado por Muyibi y Evison (Muyibi y Evison, 1995)

Preparación de disolución de moringa, 16 de abril 2009

Se secan semillas a 40 °C durante 5 horas, luego se morterizan para removerles la cáscara y dejar los núcleos. Se morterizan 20,71 g de núcleos hasta obtener el tamaño de partícula más pequeño posible y se añaden a 100 ml de agua desionizada. Se deja en agitación. Al día siguiente se filtra suspensión con filtro para coffee maker. La pasta que queda en el filtro se presiona con la mano para extraer todo el coagulante. Luego se filtra por gravedad en papel filtro Whatman 1. La disolución tiene una concentración de 200 mg/ml o 20 %.

Se añade 1 L de agua artificial a todas las jarras y se agita a 175 rpm, luego se añaden al agua (con su pH natural) las dosis de disolución al 20 % de moringa, excepto para un blanco. Las dosis van desde 200 hasta 1000 mg/l y se deja en agitación por 2 minutos. Se baja la velocidad a 35 rpm y se mantiene durante 20 minutos. El tiempo de reposo es de 1 hora. Luego se mide la turbidez, color, pH y calidad del flóculo finales. Los

resultados de esta prueba de jarras corresponden a la **Figura 30** en la sección de Resultados.

Determinación de la capacidad coagulante de *Moringa oleifera* siguiendo el método citado por Muyibi y Evison (Muyibi y Evison, 1995) en agua del río adicionando turbidez y alcalinidad artificialmente.

Preparación de disolución de moringa, 12 de mayo 2009

Se secan semillas a 40 °C durante 2 horas. Se remueve la cáscara con mortero y se dejan los núcleos. Se morterizan 20,12 g de núcleos hasta obtener el tamaño de partícula más pequeño posible y se añaden a 100 ml de agua desionizada. Se deja en agitación. Al día siguiente se filtra suspensión con papel filtro Whatman 4 al vacío y luego con filtro de fibra de vidrio FVC 047. La disolución tiene una concentración de 200 mg/ml o 20 % y es utilizada el día siguiente.

Preparación del agua artificial, 13 de mayo de 2009

A 6 litros de una muestra de agua del río Humo del segundo muestreo de la época seca 2009 (turbidez original 7 FTU y color aparente 60 UC) se añaden 30 ml de una disolución de trabajo de caolín. La muestra resultante tiene una turbidez final de 21 FTU y un color aparente de 164 UC, un pH de 7,40.

Se añade 1L del agua a todas las jarras y se agita a 175 rpm, luego se añade 0,500 ml de una disolución de CaO al 0,3 % a cada jarra, dando una dosis final de 1,5 mg/l de CaO. Se añaden volúmenes de moringa al 20 % en dosis creciente, excepto para un blanco. Las dosis van desde 100 hasta 1800 mg/l y se deja en agitación por 2 minutos. Se baja la velocidad a 35 rpm y se mantiene durante 20 minutos. El tiempo de reposo es de 2 horas. Luego se mide la turbidez, color, pH y calidad del flóculo finales. Los resultados de esta prueba de jarras corresponden a la **Figura 31** en la sección de Resultados.

Preparación de disolución de moringa, 27 de mayo 2009

Se morterizan 20 g de núcleos hasta obtener el tamaño de partícula más pequeño posible y se añaden a 100 ml de agua desionizada. Se deja en agitación por 2 horas y se deja en reposo hasta el día siguiente. Al día siguiente se filtra la suspensión con filtro de coffee maker y después con fibra de vidrio Whatman 934 AH al vacío. La disolución tiene una concentración de 200 mg/ml o 20 % y es aplicada en no más de 24 horas.

Optimización de la dosis de *Moringa oleifera* como coagulante para distintos valores de iniciales de turbidez

Para determinar dosis óptimas a distintos valores de turbidez se empleó la muestra de agua original del segundo muestreo de época seca del 2009 a la cual se le añadieron 0, 15 y 30 ml de disolución madre de caolín, siguiendo el método citado por Muyibi y Evison (Muyibi y Evison, 1995).

Se añade 1L del agua a todas las jarras y se agita a 100 rpm, luego se añade 0,500 ml de una disolución de CaO al 0,3 % a cada jarra, dando una dosis final de 1,5 mg/l de CaO.



Se añaden volúmenes de moringa al 20 % en dosis creciente, excepto para un blanco y se deja en agitación por 1 minuto. Se baja la velocidad a 20 rpm y se mantiene durante 20 minutos. El tiempo de reposo es de 2 horas. Se midió turbidez, color, pH y calidad del floculo finales. Los resultados de estas pruebas corresponden se aprecian en las **Figuras 33 y 34** en la sección de Resultados y se hace un resumen de las eficiencias de remoción en las Figuras 35 y 36.

#### **2.4.2 Ensayos utilizando *Moringa oleifera* como floculante empleando SA como coagulante**

Se llenan las seis jarras a 1 litro de agua sintética previamente preparada, luego se agita a 100 rpm y se agrega 0,5 mL de disolución saturada de CaO al 0,3 % m/v. Posteriormente se agrega el SA en dosis crecientes a cada jarra manteniendo la agitación rápida por 1 minuto; después se baja la velocidad a 20 rpm y se ajusta el pH a 7,50 en todas las jarras. Se aplica una dosis fija de la disolución de trabajo de la moringa a cada jarra y se reduce la agitación a 30 rpm por 30 minutos, dejando sedimentar los floculos por 2 horas. Se determina turbidez, color, calidad del floculo y pH finales. La prueba se repite añadiendo una dosis fija y diferente de moringa. También se ensaya un blanco, esto es, sin el floculante. Los resultados se observan en las **Figuras 37 y 38**.

### **2.5 Ensayos de prueba de jarras utilizando quitosano como coagulante**

#### **2.5.1 Preparación de disoluciones acuosas del quitosano al 0,1% (m/v)**

El quitosano se obtuvo del Laboratorio de Polímeros de la Universidad Nacional (LAGEDE) con las siguientes especificaciones: tipo camellito lobo en hojuelas semi amarillas con un grado de desacetilación del 46,29 %, porcentaje de humedad del 8,99 % y un porcentaje de cenizas del 28,88 %.

La manera como se preparan las disoluciones de este polímero no es la misma en todos los casos. A continuación se muestra la forma de preparar el coagulante en orden cronológico.

En una prueba preliminar, el quitosano se deja secando durante 7 horas en estufa a 45 °C. Para preparar las disoluciones del quitosano se sigue el método recomendado por Guibal (Guibal et al. 2006), sin embargo, el material no es pulverizado ni tamizado. Se disolvió 0,1000 g de hojuelas secas del quitosano en HOAc al 5 % hasta llevar a 100 ml. Esta disolución se aplicó en la prueba de jarras indicada en la sección 2.5.2.

Para las pruebas donde se utiliza agua del primer muestreo de la época seca del 2009, la preparación de la disolución fue la siguiente: se dejan en 50 ml de agua destilada 0,1000 g del quitosano durante toda una noche para su hidratación. Se añade 2 ml de HOAc glacial al 100 % y se deja en agitación durante 3 horas. Finalmente la disolución se lleva a 100 ml con agua destilada. Esto da una disolución al 2 % en HOAc y 1000 mg/l del coagulante.

## **2.5.2 Determinación de la dosis óptima de quitosano como coagulante en una prueba preliminar de jarras empleando agua artificial**

Se utiliza agua artificial con las siguientes características:

Turbidez: 11 FTU    color aparente: 105 UC    pH: 7,68    temperatura: 20,8 °C

Se emplearon los siguientes parámetros siguiendo el procedimiento citado por Guibal y Roussy (Guibal y Roussy, 2007): tiempo de mezcla rápida 3 minutos a 200 rpm ( $G = 240 \text{ s}^{-1}$ ); se añadió el coagulante a una concentración de 1000 mg/L en dosis crecientes; se bajó la velocidad de agitación a 40 rpm y se mantuvo durante 37 minutos lapso durante el cual se ajustó el pH a un valor de 6,40 en todas las jarras. El tiempo de reposo fue de 20 minutos. Las muestras se tomaron a una profundidad de 4 cm de la superficie utilizando una pipeta automática.

## **2.5.3 Determinación del pH y de la dosis óptima de quitosano empleando agua de río**

Se realizaron 6 ensayos. Para cada ensayo la variación de la dosis de quitosano fue siempre de 0,5 - 1,0 - 1,5 - 2,5 - 4,0 y 5,0 mg/l para cada jarra, respectivamente. En el primer ensayo no se añadió alcalinizante (NaOH 0,1 mol/l) en ninguna jarra. Para los siguientes 5 ensayos se añadieron volúmenes fijos de alcalinizante a todas las jarras por cada ensayo, en el siguiente orden: 0,500 ml – 1,000 ml – 1,500 ml – 2,500 ml y 3,250 ml. Los parámetros fueron los siguientes: tiempo de mezcla rápida 3 minutos a 200 rpm ( $G = 240 \text{ s}^{-1}$ ); se adicionó el coagulante a las concentraciones indicadas y se bajó la velocidad de agitación a 40 rpm ( $G = 33 \text{ s}^{-1}$ ) durante 20 minutos. Finalmente, se dejó decantar por 20 minutos (Guibal y Roussy, 2007).

## **2.6 Ensayos de prueba de jarras utilizando mozote de caballo, *Triumfetta semitriloba***

### **2.6.1 Preparación de la disolución acuosa de mozote**

Se corta los tallos del mozote en pequeños pedazos y se les separa la corteza con un cuchillo. Se pesan 20 g de los tallos y cortezas y se mezclan en 100 ml de agua desionizada. Se agita la mezcla durante 1 hora y se deja en reposo durante 24 horas a temperatura ambiente. La suspensión se filtra con filtro de tela para eliminar partículas. La disolución resultante tiene una concentración teórica de 20 % o 200 mg/ml con un pH de 6,43.

### **2.6.2 Determinación de la capacidad coagulante del mozote de caballo *Triumfetta semitriloba*.**

Se llenan las seis jarras a 1 litro de agua sintética previamente preparada, luego se agita a 100 rpm y se agrega 0,5 mL de disolución saturada de CaO al 0,3 % m/v. Posteriormente se agrega la dosis de la disolución de trabajo de mozote a cada jarra manteniendo la agitación rápida por 1 minuto; después se reduce a una agitación lenta

de 30 rpm por 30 minutos, dejando sedimentar el flóculo por 1 hora. Se determina turbidez, color, calidad del flóculo y pH finales.

### **2.6.3 Determinación de la capacidad floculante del mozote de caballo *Triumfetta semitriloba* empleando SA como coagulante**

Se llenan las seis jarras a 1 litro de agua sintética previamente preparada, luego se agita a 100 rpm y se agrega 0,5 mL de disolución saturada de CaO al 0,3 % m/v. Posteriormente se agrega el SA en dosis crecientes a cada jarra manteniendo la agitación rápida por 1 minuto; después se baja la velocidad a 60 rpm y se ajusta el pH a 7,50 en todas las jarras. Se aplica una dosis fija de la disolución de trabajo del mozote a cada jarra y se reduce la agitación a 30 rpm por 30 minutos, dejando sedimentar los flóculos por 1 hora. Se determina turbidez, color, calidad del flóculo y pH finales. Se determina el DQO soluble en los mejores tratamientos obtenidos.

## **2.7 Ensayos de prueba de jarras utilizando tuna *Cactus lefaria***

### **2.7.1 Preparación de la disolución acuosa de tuna**

Se utilizaron siempre hojas frescas de tuna a las cuales se les eliminó la cáscara dejando la parte sólida y gelatinosa. De la parte sólida y gelatinosa se pesaron 50 g y se mezclaron en 200 ml de agua destilada. La mezcla se agitó lentamente por 1 hora, se dejó reposar por 30 minutos y se filtró con filtro de tela para eliminar partículas. Para estimar la concentración de la disolución resultante se determinó el contenido de humedad de la parte sólida y gelatinosa de la planta desecándola a 60 °C hasta lograr peso constante. El contenido de humedad fue del 91 %. De lo anterior, la concentración de la disolución de trabajo de la tuna fue de 2,25 % o 22,5 mg/ml

### **2.7.2 Determinación de la capacidad coagulante de la tuna *Cactus lefaria***

Se llenan las seis jarras a 1 litro de agua sintética previamente preparada, luego se agita a 100 rpm y se agrega 0,5 mL de disolución saturada de CaO al 0,3 % m/v. Posteriormente se agrega la dosis de la disolución de trabajo de tuna a cada jarra manteniendo la agitación rápida por 1 minuto; después se reduce a una agitación lenta de 30 rpm por 30 minutos, dejando sedimentar el flóculo por 1 hora. Se determina turbidez, color, calidad del flóculo y pH finales.

### **2.7.3 Determinación de la capacidad floculante de la tuna *Cactus lefaria* empleando SA como coagulante**

Se llenan las seis jarras a 1 litro de agua sintética previamente preparada, luego se agita a 100 rpm y se agrega 0,5 mL de disolución saturada de CaO al 0,3 % m/v. Posteriormente se agrega el SA en dosis crecientes a cada jarra manteniendo la agitación rápida por 1 minuto; después se baja la velocidad a 60 rpm y se ajusta el pH a 7,50 en todas las jarras. Se aplica una dosis fija de la disolución de trabajo de tuna a cada jarra y se reduce la agitación a 30 rpm por 30 minutos, dejando sedimentar los

flóculos por 1 hora. Se determina turbidez, color, calidad del flóculo y pH finales. Se determina DQO soluble en los mejores tratamientos obtenidos.

En otro ensayo se repite la prueba anterior modificando la velocidad y el tiempo de agitación lenta a 20 rpm durante 20 minutos.

## **2.8 Determinación de parámetros fisicoquímicos**

### **2.8.1 Temperatura y pH**

La temperatura y el pH se midieron con un peachimetro marca YSI modelo pH-100.

### **2.8.2 Turbidez, color aparente y taninos**

La turbidez, el color aparente y los taninos se determinaron directamente con un colorímetro marca LaMotte modelo Smart 2. La turbidez se determinó mediante el método de absorción y el color mediante el método de platino cobalto. Los taninos se determinaron mediante el método del ácido tungsto-molibdofosfórico.

### **2.8.3 Alcalinidad, dureza, demanda química de oxígeno, color verdadero, ion amonio, oxígeno disuelto, su porcentaje de saturación y conductividad**

Los análisis de alcalinidad, dureza, DQO, sólidos suspendidos y color real se efectuaron en el Centro de Investigación y de Servicios Químicos y Microbiológicos CEQIATEC siguiendo los procedimientos establecidos en el Standard Methods of Water and Wastewater (SMWW 2005). La determinación del ion amonio se efectuó *in situ* mediante el uso de un kit de medición marca HACH. El oxígeno disuelto, su porcentaje de saturación y la conductividad se determinaron mediante un oxigenómetro portátil marca YSI modelo 85 el cual se calibró antes de utilizarse.

### **3. Resultados**

En esta sección se exponen los resultados clasificados según el tipo de material utilizado como coagulante o floculante en los ensayos de pruebas de jarras los cuales siguen, en la medida de lo posible, el orden cronológico en que fueron realizados.

Como referencia a los resultados obtenidos en esta investigación, los parámetros de operación de la Planta Potabilizadora en Tres Ríos son los siguientes: tiempo de mezcla rápida es 1 minuto a 100 rpm: tiempo de mezcla lenta es de 25 minutos a 40 rpm. Y no pueden ser modificados. El máximo valor admisible de color aparente que puede tener el agua tratada antes de ser filtrada es de 20 UC (Montero 2009), por tanto, la escogencia de parámetros óptimos en esta investigación se basó en este criterio.

#### ***3.1 Prueba de jarras aplicando sulfato de aluminio como coagulante y floculantes sintéticos para el tratamiento de agua artificial y de río***

##### **3.1.1 Floculante aniónico NOVAFLOC PHA**

###### **3.1.1.1 Agua artificial**

Caracterización del agua artificial

Se preparó agua modelo con turbidez y color alto con el propósito de tener condiciones de fácil remoción del color.

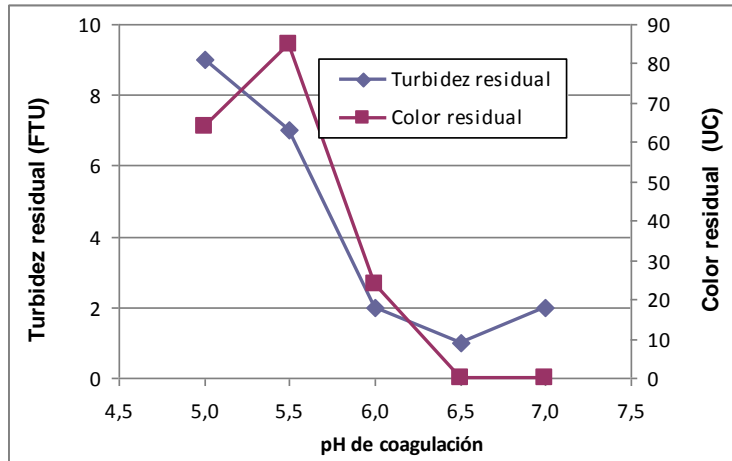
Fecha: octubre de 2008

Turbidez: 69-74 FTU.                      Color aparente: 541-557 UC.  
Temperatura: 22-23 °C.                      El pH no se midió.                      Alcalinidad: no se midió.

Determinación del pH óptimo de coagulación

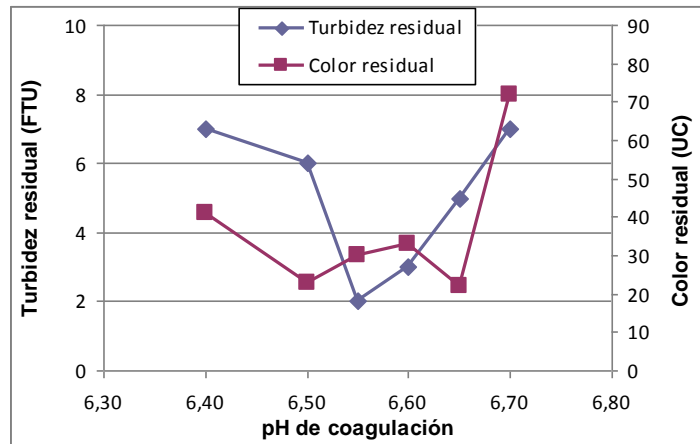
Los diagramas de coagulación se muestran en las Figuras 1, 2 y 3.

En el primer ensayo se evaluó la eficiencia del SA en un intervalo amplio de pH (5,0-7,0) como se aprecia en la Figura 1.

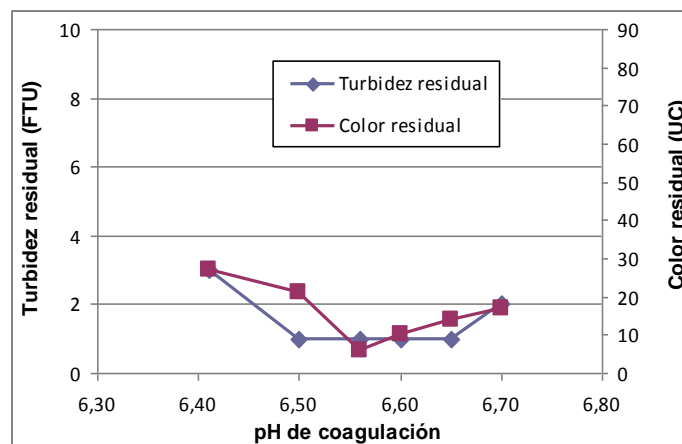


**Figura 1: Determinación del pH óptimo para la remoción de color y turbiedad en agua artificial (color inicial 541 UC, turbidez inicial 72 UFT) a 22,7°C (8-10-08)**

De este resultado se evalúa el SA en un ámbito de pH más reducido, esto es, de 6,40 hasta 6,70. (Figuras 2 y 3).



**Figura 2: Determinación del pH óptimo para la remoción de color y turbidez en agua artificial (color inicial 557 UC, turbidez inicial: 69 FTU) a 22,3 °C (10-10-08)**



**Figura 3: Determinación del pH óptimo para la remoción de color y turbidez en agua artificial (color inicial 553 UC, turbidez inicial: 74 FTU) (17-10-08)**

De la Figura 2 se aprecia que la remoción de turbidez y color es máxima a un pH de 6,55 y 6,50 respectivamente. De la figura 3 los valores de pH óptimos son 6,50-6,65 para la turbidez y 6,55 para el color. Valores de pH superiores a 7,00 no se ensayaron dado que valores óptimos de pH para remover color y turbidez se obtuvieron por debajo de 7,00 unidades de pH.

### 3.1.1.2 Agua de río

En este apartado se muestran los resultados de prueba de jarras obtenidos a partir de cada muestreo efectuado durante la época lluviosa de 2008 y la época seca de 2009. Los siguientes resultados van en orden cronológico.

Cuadro 1. Caracterización de la calidad fisicoquímica del agua del Río Humo (época lluviosa 2008 y época seca 2009)

Parámetro	Resultado-muestreo				
	Época lluviosa			Época seca	
	1 21-10	2 4-11	3 18-11	1 4-3	2 19-4
pH ( $\pm 0,01$ )	7,63	6,80	6,78	6,78	7,03
Temperatura ( $\pm 0,1^{\circ}\text{C}$ )	14,2	14,1	11,0	12,9	14,0
Oxígeno disuelto (OD)( $\pm 0,01\text{mg/L}$ )	11,50	10,73	10,91	8,81	sin datos
Porcentaje de saturación de OD ( $\pm 0,1$ )	99,0	NC	100,1	NC	sin datos
Conductividad ( $\pm 0,1 \mu\text{S/cm}$ )	44,4	27,7	NC	<0,1	<0,1
Amonio ( $\text{NH}_4^+$ ) (mg/l)	ND	NC	ND	< 0,5	< 0,5
Color aparente ( $\pm 1 \text{UC}$ )	85	104	475	142	195
Color real ( $\pm 1 \text{UC}$ )	10	40	NC	70	70
Turbiedad (FTU) ( $\pm 1$ )	9	13	64	11	25
Alcalinidad (mg $\text{CaCO}_3/\text{L}$ )	( 4,00 $\pm$ 0,17)	( 20,9 $\pm$ 1,5)	NC	< 6	No detectada
Dureza (mg $\text{CaCO}_3/\text{L}$ )	(13,92 $\pm$ 0,23)	(8,97 $\pm$ 0,06)	NC	(3,86 $\pm$ 0,47)	20

ND = no detectado

UNT o FTU = unidades nefelométricas de turbiedad

NC = no cuantificado

Los resultados siguientes fueron obtenidos utilizando agua del primer muestreo de la época lluviosa.

Determinación de los parámetros óptimos para clarificar color

Con base a los valores obtenidos de las Figuras 1-3, se escoge un valor de pH óptimo de coagulación de 6,55 para determinar posteriormente la mejor dosis de coagulante y de floculante como lo muestran los resultados de las figuras 4 y 5.

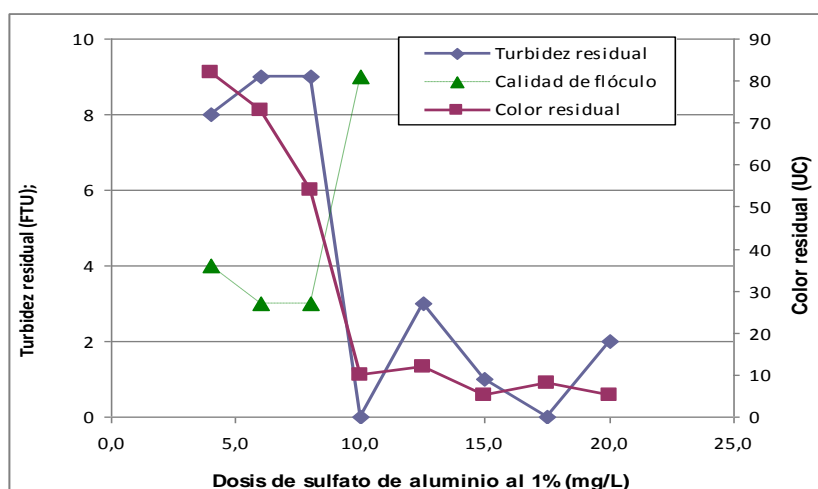


Figura 4: Dosis óptima de coagulante  $Al_2(SO_4)_3$  para la remoción de color y turbidez en agua del primer muestreo Río Humo (color inicial 82 UC, turbidez inicial 8 FTU, pH inicial 7,28) (22-10-08). Véase Cuadros 4 y 5 del Apéndice.

Se encuentra una dosis óptima de 10,0 mg/l de SA, dando valores de turbidez y color residuales de 0 FTU y 10 UC. Esta dosis se emplea en la siguiente prueba de jarras para obtener la dosis óptima de floculante.

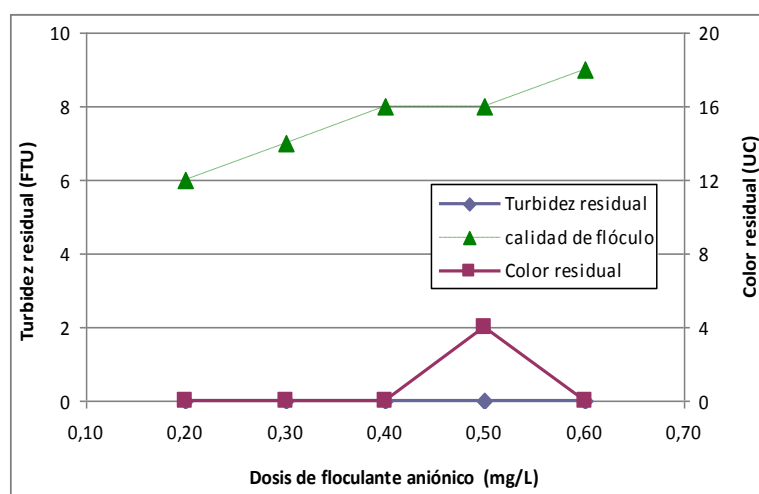


Figura 5: Dosis óptima de floculante aniónico al 0,02% para la remoción de color y turbidez en agua del Río Humo (color inicial 78 UC, turbidez inicial 11 FTU, pH 7,24) (4-11-08). Referirse a Cuadro 7 de Apéndice.

De la Figura 5 se encuentra una dosis óptima de floculante de 0,20 mg/L (1,00 ml al 0,02 %), sin embargo, si se considera la calidad del flóculo la mejor dosis sería de 0,60 mg/l (3,00 ml). Lo anterior se basa en que a mayor tamaño de floc más eficiente es la filtración, no obstante, se recomienda cuantificar el Carbono orgánico total (TOC) para



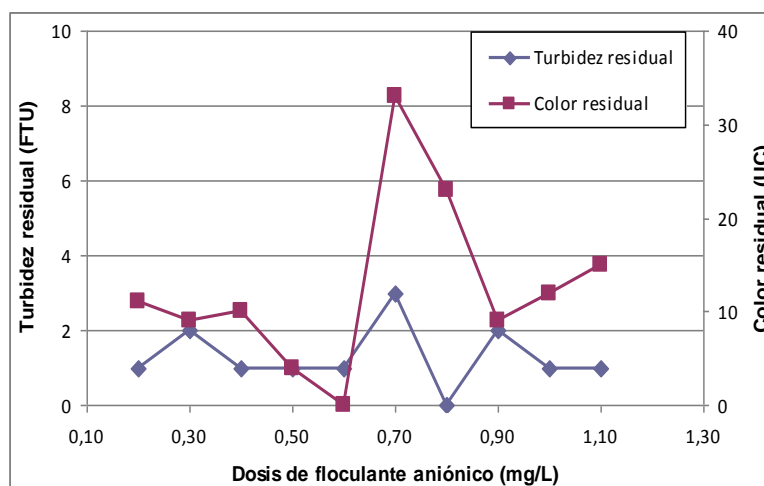
determinar cuál tratamiento fue el que produjo la menor cantidad de materia orgánica residual.

Los parámetros óptimos experimentales para eliminar turbidez y color de la primera muestra de agua del río fueron:

**pH: 6,55      dosis de SA: 10 mg/l      dosis de floculante aniónico: 0,60 mg/l**

**Los resultados siguientes fueron obtenidos utilizando agua del segundo muestreo.**

Dada la similitud en los parámetros fisicoquímicos de los muestreos 1 y 2, se decide utilizar los mismos valores óptimos de pH de coagulación y de SA obtenidos en el primer muestreo para las pruebas del segundo. Para la muestra de agua del segundo muestreo se determina únicamente la dosis óptima de floculante. De la siguiente figura se encuentra que la dosis óptima es similar a la de la muestra de agua anterior (0,60 mg/l) con un color residual aparente de 0 UC. No obstante, se recomienda la dosis mínima encontrada de 0,20 mg/l dado que el color residual aparente fue inferior a 20 UC.



**Figura 6: Dosis óptima de floculante aniónico al 0,02% para la remoción de color y turbidez en agua del Río Humo (color inicial 87 UC, turbidez inicial 9 FTU, pH 7,27) a 23.5 °C (4-11-08). Véase Cuadros 8 y 11 del Apéndice.**

Los parámetros óptimos experimentales para eliminar turbidez y color de la segunda muestra de agua del río fueron:

**pH: 6,55      dosis de SA: 10 mg/l      dosis de floculante aniónico: 0,60 mg/l**

**Los resultados siguientes fueron obtenidos utilizando agua del tercer muestreo.**

Para esta muestra se determina primero la dosis óptima de floculante aniónico utilizando una dosis fija de 10 mg/l de SA, ver figura 7. De esta figura se observa que la turbidez se remueve eficientemente pero no el color con las dosis de coagulante y floculante empleadas. De este resultado se escoge un valor de 0,80 mg/l del floculante para seguidamente determinar la dosis óptima de coagulante (ver Figura 8). De esta figura se observa que para una dosis de 15 mg/l de SA los valores de turbidez y color residuales son óptimos. Posteriormente, se determinó de nuevo una dosis óptima de coagulante

aplicando una dosis inferior de floculante (0,60 mg/l), véase la Figura 9. De este gráfico se aprecia que con 15 mg/l de SA la eficiencia de remoción fue cercana al 100 % para color y turbidez.

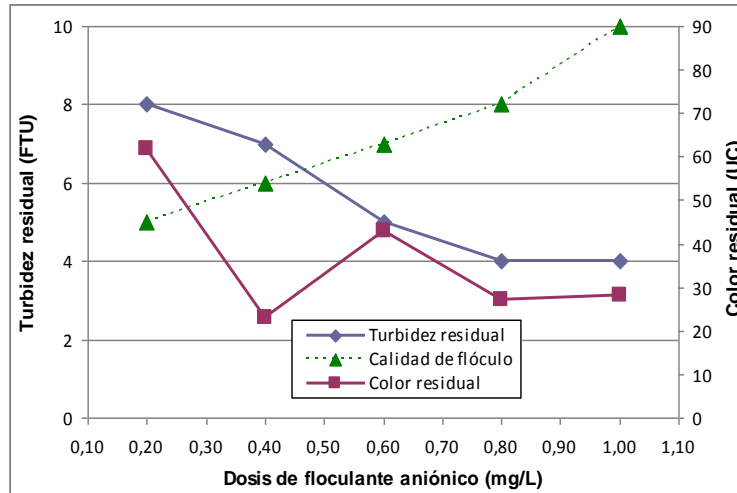


Figura 7: Dosis óptima de floculante aniónico al 0,02% a una dosis fija de SA de 10 mg/l para remover color y turbidez en agua de río (color inicial 476 UC, turbidez inicial 72 FTU, pH 7,07) (20-11-08). Véase Cuadro 13 del Apéndice.

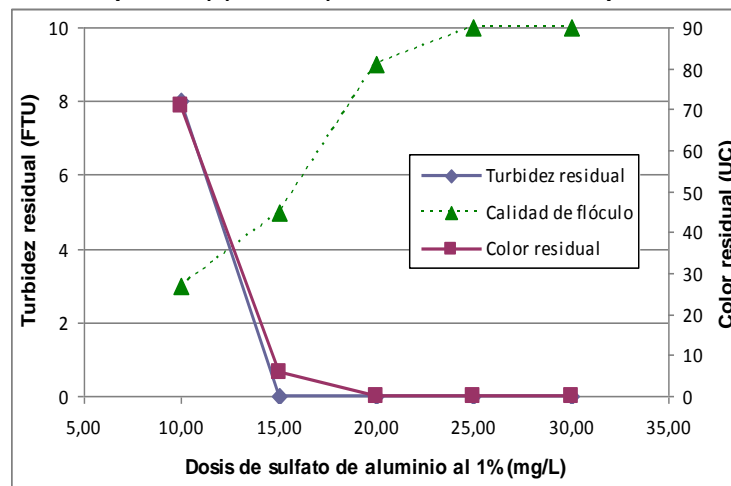


Figura 8: Dosis óptima de  $Al_2(SO_4)_3$  al 1 % aplicando una dosis de 0,80 mg/l de floculante para remover color y turbidez en agua de río (color inicial 476 UC, turbidez inicial 72 FTU, pH 7,07) (25-11-08). Véase Cuadro 14 del Apéndice.

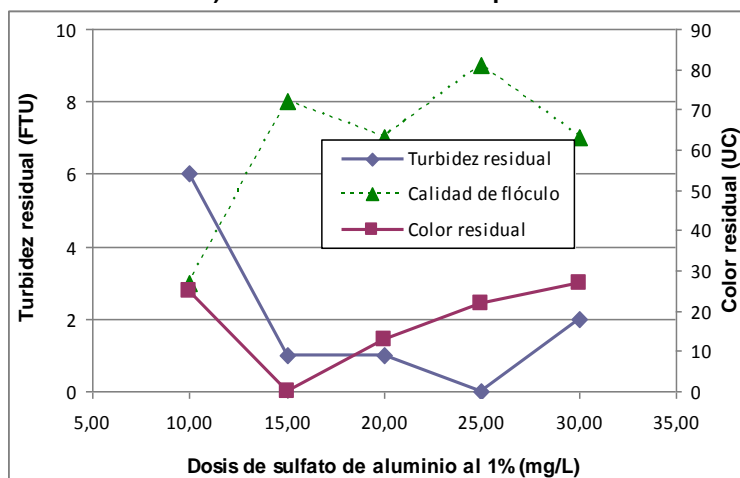


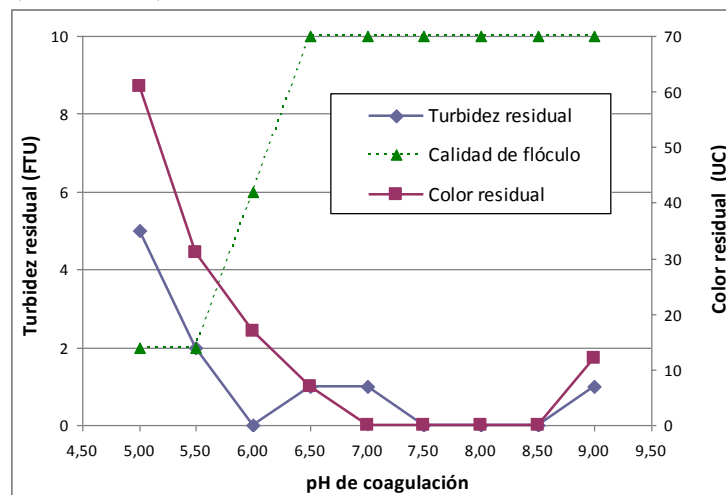
Figura 9: Dosis óptima de coagulante al 1 % aplicando una dosis de 0,60 mg/l de floculante para remover color y turbidez en agua de río (color inicial 496 UC, turbidez inicial 65 FTU, pH 7,12) (27-11-08). Véase Cuadro 15 del Apéndice.

Los parámetros óptimos experimentales para eliminar turbidez (65 FTU) y color (496 UC) de la tercera muestra de agua del río fueron:

**pH: 6,55      dosis de SA: 15 mg/l      dosis de floculante aniónico: 0,60 mg/l**

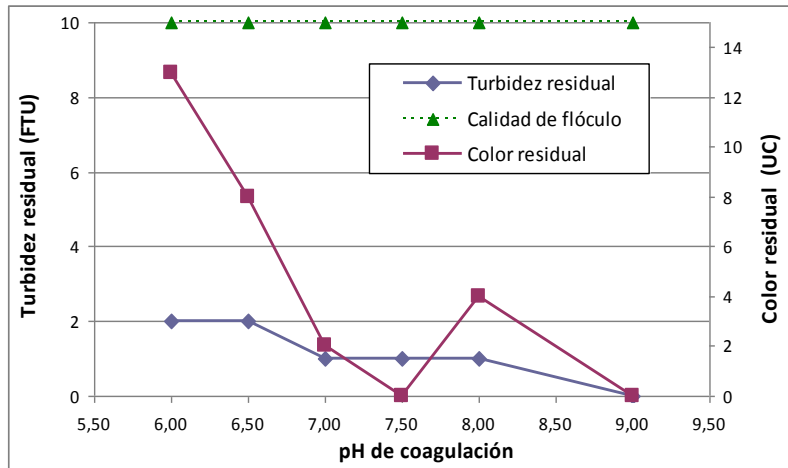
Determinación del pH óptimo en agua de río empleando la muestra de agua del tercer muestreo con 48 días de almacenamiento

Esta muestra de agua corresponde al último muestreo de la época lluviosa que tenía 48 días de almacenamiento. Se aplicó una dosis fija de 10 mg/l de SA y una dosis de floculante aniónico de 0,60 mg/l. Como se observa de la Figura 10, se obtiene un rango de pH óptimo de remoción para color que va desde 6,50 hasta 9,00 mientras que para la turbidez de 5,50 a 9,00, considerando una eficiencia superior al 85 por ciento. Sin embargo, si se considera la calidad del flóculo (línea punteada) a valores de pH inferiores a 6,00 la calidad de los flóculos no es tan buena en comparación con los que se formaron a partir de un pH de 6,50. Por lo anterior, se recomienda utilizar valores de pH que van de 6,50 hasta 9,00.



**Figura 10: Determinación del pH óptimo para remover color y turbiedad en agua de río (color inicial 107 UC, turbidez inicial 15 FTU, pH 7,70) a 16,7°C. Refiérase a Cuadros 24 y 25 del Apéndice.**

Ese mismo ensayo se repitió reduciendo a 5,0 mg/l la dosis de SA en un menor ámbito de pH. Se aprecia que el ámbito de pH óptimo de remoción de turbidez es para valores superiores a 6,00 mientras que para el color se obtuvo un valor óptimo de 7,50 (véase Figura 11).



**Figura 11: Determinación del pH óptimo para remover color y turbiedad en agua de río (color inicial 121 UC, turbidez inicial 14 FTU, pH 7,74) a 17,1°C Refiérase a Cuadro 28 del Apéndice**

Los ámbitos de pH óptimos experimentales fueron los siguientes:

**Turbidez: pH: 6,00-9,00                      color: pH = 7,50**

Por lo anterior, se decide utilizar un pH de 7,50 como valor óptimo en las siguientes pruebas de jarras.

Determinación de la dosis óptima de sulfato de aluminio para la remoción del color en agua modelo semejando la calidad del agua de la época lluviosa de 2008

Se efectuó otra prueba de jarras utilizando agua artificial para imitar la calidad del agua de los dos primeros muestreos de la época lluviosa. Para su comparación véase el Cuadro 1.

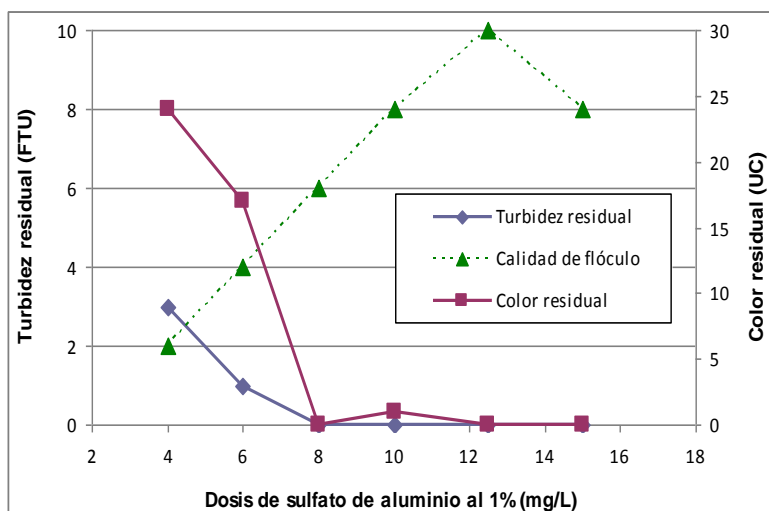
Fecha: 11 de febrero de 2009

Turbidez: 12 FTU.                      Color aparente: 105 UC.

Temperatura: 21,1 °C.                      pH: 7,55

Alcalinidad: 13,0 mg/l                      Dureza: 43,05 mg/l

Se utiliza el polímero aniónico a una dosis fija de 0,60 mg/l y se ajusta el pH en todas las jarras a 6,55 para reproducir las condiciones óptimas experimentales de estos parámetros de la prueba de jarras utilizadas en ese muestreo. De la Figura 12 se encuentra que a una dosis de 8,0 mg/l de SA el color residual fue de 0 UC con una turbidez residual casi nula también.



**Figura 12: Dosis óptima de SA para remover color y turbiedad en agua artificial (color inicial 105 UC, turbidez inicial 12 FTU, pH 7,55) a 21,1°C (11-02-09). Véase Cuadro 29 del Apéndice.**

La dosis óptima experimental de coagulante para eliminar turbidez y color de la muestra de agua modelo fue:

**dosis de SA: 8,0 mg/l      pH: 6,55      dosis de floculante aniónico: de 0,60 mg/l**

### 3.1.2. Floculante catiónico KF-930-S

#### 3.1.2.1 Agua artificial

Los parámetros del agua artificial se escogen tal que reproducen condiciones difíciles de clarificación en la planta de tratamiento, esto es, alto color y baja turbidez.

Caracterización del agua artificial

Fecha: 10 de diciembre de 2008

Turbidez: 11-14 FTU.

Color aparente: 101-106 UC.

Temperatura: 22-23 °C.

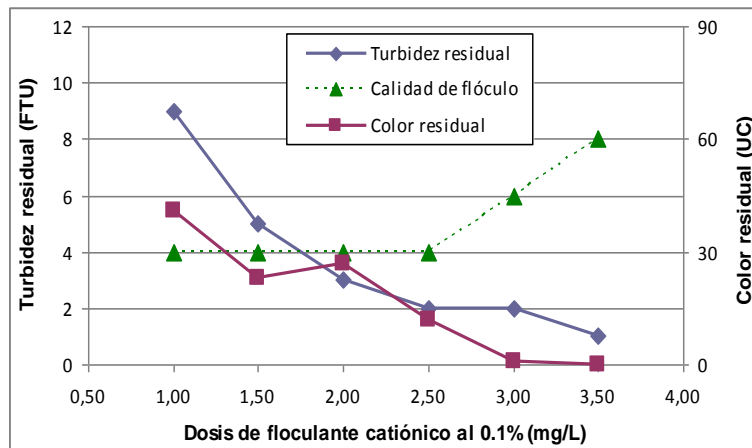
pH: 7,23-7,51

Alcalinidad: no se midió.

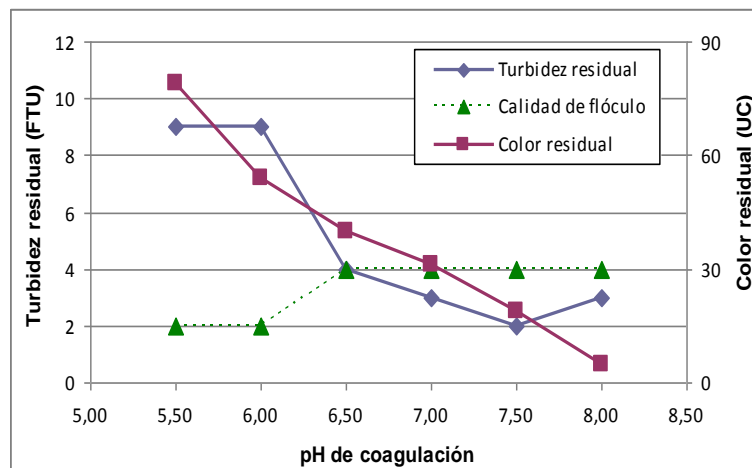
Evaluación del pH y de la dosis óptima de floculante aplicando una dosis de sulfato de aluminio de 10 mg/l

Primero se determina una dosis óptima del polímero catiónico con base a una dosis fija de SA de 10 mg/l en todas las jarras y al pH original del agua que es de 7,23 para tener una idea de cómo es la eficiencia de remoción de ese polímero siguiendo el método Sapporo. De la Figura 13 se obtiene una dosis óptima de floculante de 2,50 mg/l, en tanto que el color remanente tuvo un valor de 15 UC. Con esa dosis de floculante se procedió a determinar el pH óptimo con la misma dosis de coagulante de 10 mg/l y una dosis de floculante de 3,00 mg/l (esto porque a la dosis de 2,50 mg/l mencionada, el color remanente fue de 12 UC y se creía que este era un valor de color residual todavía muy alto; sin embargo, después de conversar con el Ing. Guillermo Montero, Gerente de Planta Potabilizadora de Tres Ríos, se nos indicó que el valor máximo de color

remanente antes de filtrar puede ser de hasta 20 UC, porque después de filtrar puede obtenerse un valor por debajo del máximo recomendado de 5 UC) (Montero 2009 comunicación personal) (MINSA 2005).



**Figura 13: Dosis óptima de floculante catiónico KF-930-S a una dosis de SA de 10 mg/l para remover color y turbiedad en agua artificial (color inicial 105 UC, turbidez inicial 14 FTU, pH 7,23) (20-02-09). Véase Cuadro ML-A del Apéndice.**



**Figura 14: Determinación del pH óptimo a una dosis de SA de 10 mg/l y de floculante catiónico de 3 mg/l, para remover color y turbidez en agua artificial (color inicial 104 UC, turbidez inicial 11 FTU, pH 7,34) (20-02-09). Véase Cuadro ML-B del Apéndice.**

De la Figura 14 se observa que a un pH de 7,50 los valores de color y turbidez remanentes son aceptables con 19 UC y 2 FTU, respectivamente. Este resultado tuvo reproducibilidad como se aprecia del Cuadro ML-C del Anexo. La calidad de los flóculos empleando este polímero no es tan buena en comparación con los flóculos donde se utiliza el polímero aniónico. El problema del empleo del polímero aniónico en la planta potabilizadora es el prolongado tiempo en la preparación de la disolución de trabajo (por su difícil solubilización) y por tanto, no se le utiliza (Montero 2008, comunicación personal).

Los parámetros óptimos experimentales para eliminar turbidez y color de la muestra de agua modelo imitando la calidad del agua del primer muestreo de época lluviosa 2008 fueron:

**pH: 7,50      dosis de SA: 10,0 mg/l      dosis de floculante catiónico: 2,50 mg/l**

Sin embargo, para comparar la efectividad de los dos tipos de flocculantes (aniónico y catiónico) se utiliza el tratamiento que produjo valores residuales de color similares, esto es, cercano a 1 UC, y a una misma dosis de coagulante. Véase el Cuadro 5 en la Discusión. Con base a lo anterior, los parámetros óptimos fueron los siguientes:

**pH: 7,23      dosis de SA: 10,0 mg/l      dosis de flocculante catiónico: 3,00 mg/l**

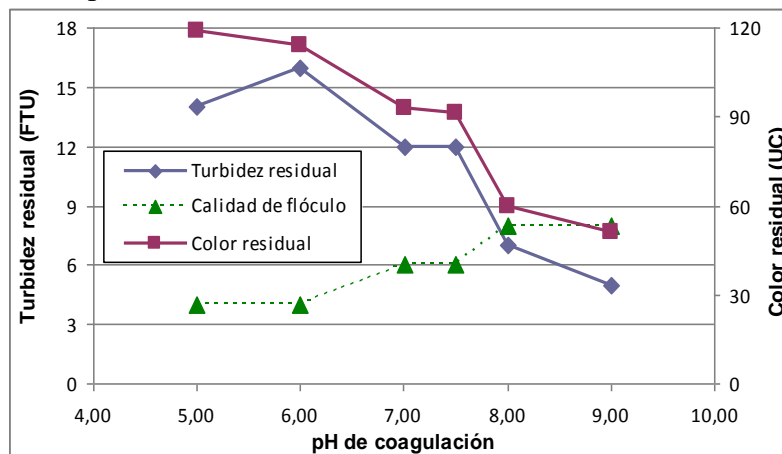
### 3.1.2.2 Agua de río

En este apartado se muestran los resultados de prueba de jarras obtenidos a partir de cada muestreo efectuado durante la época seca de 2009. En el Cuadro 1 se muestra la caracterización fisicoquímica del agua de los muestreos de la época seca. Los siguientes resultados van en orden cronológico.

**Los resultados siguientes utilizan agua del primer muestreo de la época seca de 2009.**

Determinación de los parámetros óptimos para clarificar color

De la Figura 15 se aprecia un pH óptimo de 7,50 con valores de turbidez y color remanentes de 12 FTU y 91 UC, respectivamente. No se ensayaron valores superiores de pH porque esto hubiera requerido una etapa adicional en la planta de tratamiento que sería neutralizar un pH alcalino.



**Figura 15: Determinación del pH óptimo a una dosis de SA de 10 mg/l y de flocculante catiónico de 3,5 mg/l para remover color y turbiedad en agua de río (color inicial 122 UC, turbiedad inicial 13 FTU, pH 7,24) (06-03-09). Cuadro ML-1 Apéndice.**

Posteriormente, con el valor óptimo de pH obtenido anteriormente y una dosis de flocculante de 3,5 mg/l se evalúa el coagulante SA en un amplio rango para determinar la dosis más efectiva (Figura 16). Bajo esas condiciones la dosis óptima fue de 20 mg/l de sulfato de aluminio para bajar la turbidez hasta 4 FTU y de 40 mg/l para bajar el color hasta 21 UC, sin embargo, se escogió una dosis de 50 mg/l de ese coagulante que fue un valor demasiado alta para ser utilizado en la planta (Montero G, 2009), sin embargo, en ese momento no se sabía que el valor máximo de color remanente aceptable antes de filtrar podía tener un valor de 20 UC.

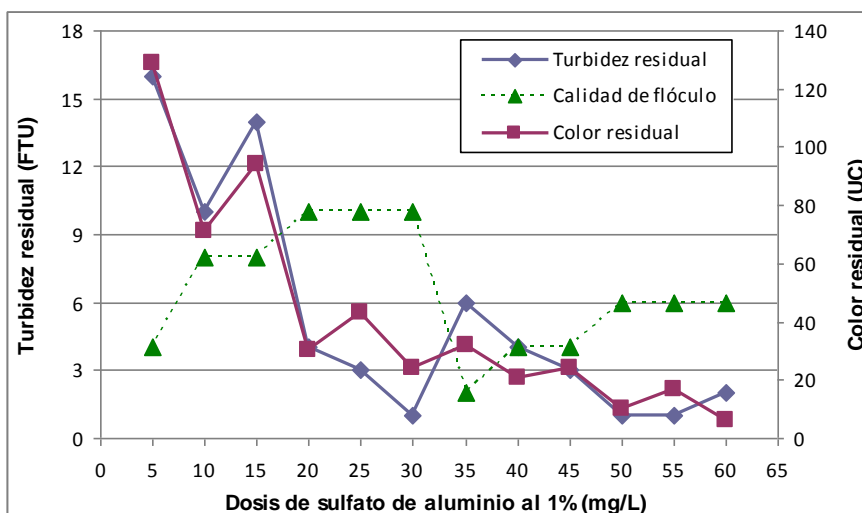


Figura 16: Dosis óptima de SA a una dosis de floculante catiónico de 3,5 mg/l para remover color y turbiedad en agua de río (color inicial 116 UC, turbiedad inicial 17 FTU, pH 7,40) (06-03-09). Cuadro ML-3 Apéndice.

Seguidamente, se evaluó el floculante catiónico a una dosis fija de SA de 50 mg/l. Se obtuvo una dosis de floculante óptima de 2,50 mg/l para dejar un color remanente de 17 UC y una turbidez de 2 FTU, como se observa de la Figura 17.

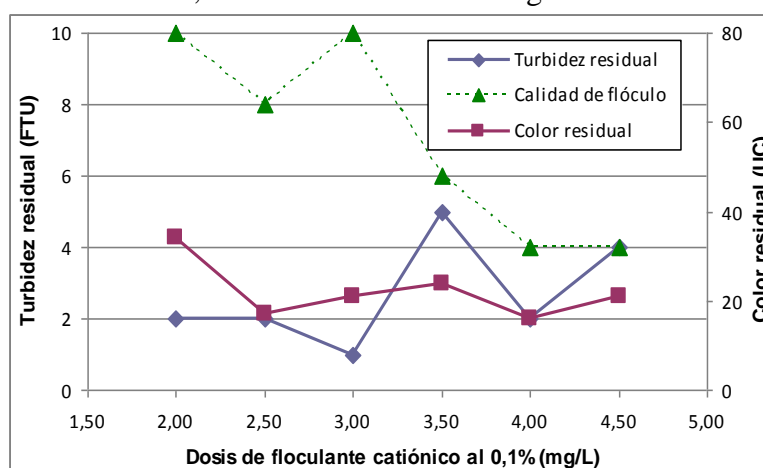
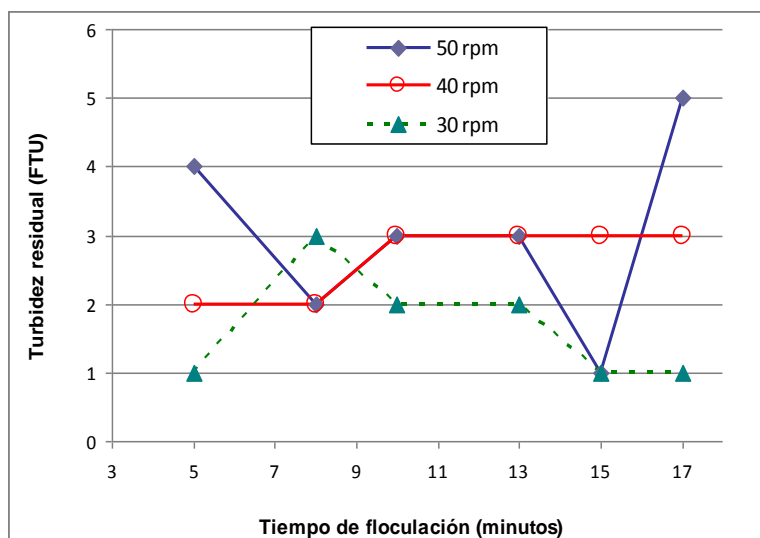


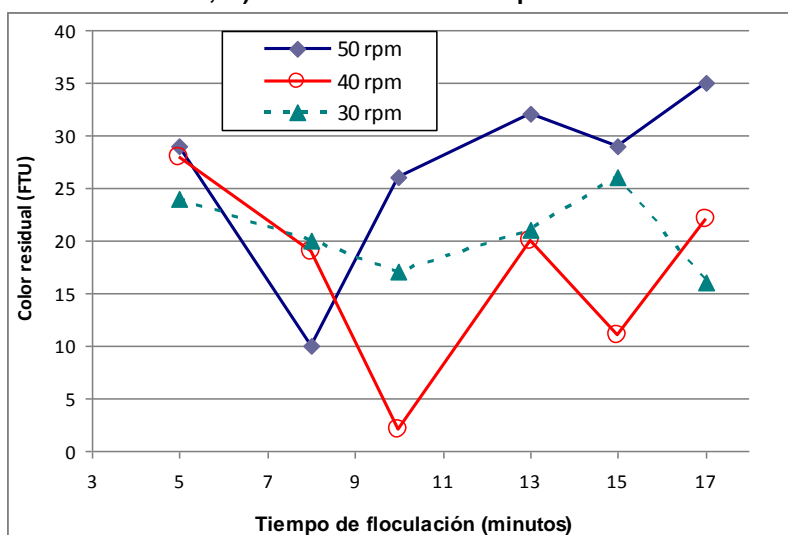
Figura 17: Dosis óptima de floculante catiónico a una dosis de SA de 50 mg/l para remover color y turbiedad en agua del río (color inicial 117 UC, turbiedad inicial 14 FTU, pH 6.97) (13-03-09). Cuadro ML-5 Apéndice.

Posteriormente, se evaluaron los tiempos de floculación óptimos medidos a tres gradientes de mezcla lenta distintos, a saber: 50, 40 y 30 rpm, aplicando dosis iguales de SA de 50 mg/l, de floculante catiónico de 2,5 mg/l y a un pH de 7,50 en todas las jarras. Los resultados se aprecian en las Figuras 18 y 19 para la turbidez y el color residuales, respectivamente. Parra todos los gradientes ensayados se encontró un tiempo óptimo de floculación de 8 minutos para la clarificación del color; sin embargo, el color residual más bajo obtenido en el mínimo tiempo posible ocurrió a un gradiente de 50 rpm ( $44 \text{ s}^{-1}$ ) como lo muestra la Figura 19. La mínima turbidez residual registrada se logró a un tiempo de 5 minutos a una velocidad de 30 rpm. Sin embargo, se aplica en los siguientes ensayos los parámetros óptimos encontrados para el color.





**Figura 18:** Turbidez residual en función del tiempo de floculación a tres diferentes velocidades de floculación ensayada en agua de río (color inicial 115-131 UC, turbidez inicial 14-16 FTU, pH 6.97-7,01). Cuadro ML-6 a ML-8 Apéndice.



**Figura 19:** Color residual en función del tiempo de floculación a tres diferentes velocidades de floculación ensayada en agua de río (color inicial 115-131 UC, turbidez inicial 14-16 FTU, pH 6.97-7,01). Cuadro ML-6 a ML-8 Apéndice.

Con este gradiente y tiempo de mezcla lenta se realizó otra prueba de jarras bajando la dosis de SA a 30 mg/l para determinar nuevamente la dosis óptima del floculante. Los resultados (Figura 20) muestran que con una dosis de 1,00 mg/l de floculante se obtuvo la mejor remoción con 1 FTU y 13 UC para turbidez y color remanentes, respectivamente. Se escogió este tratamiento dado que es la menor dosis de floculante aplicado con excelente calidad de flóculo.

Al filtrar las muestras se encontró que para esa dosis de floculante los valores de turbidez y color se encontraron dentro de la norma para consumo humano (MINSA 2005). Véase la Figura 21. En la Figura 22 se observa el DQO soluble para el agua tratada y filtrada.

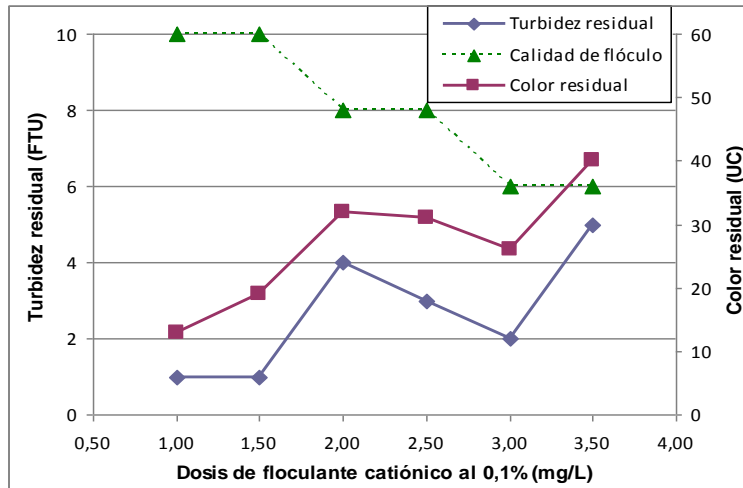


Figura 20: Dosis óptima de floculante a una dosis se SA de 30 mg/l para remover color y turbiedad en agua de río (color inicial 122 UC, turbidez inicial 12 FTU, pH 7,01). Cuadro ML-10 Apéndice.

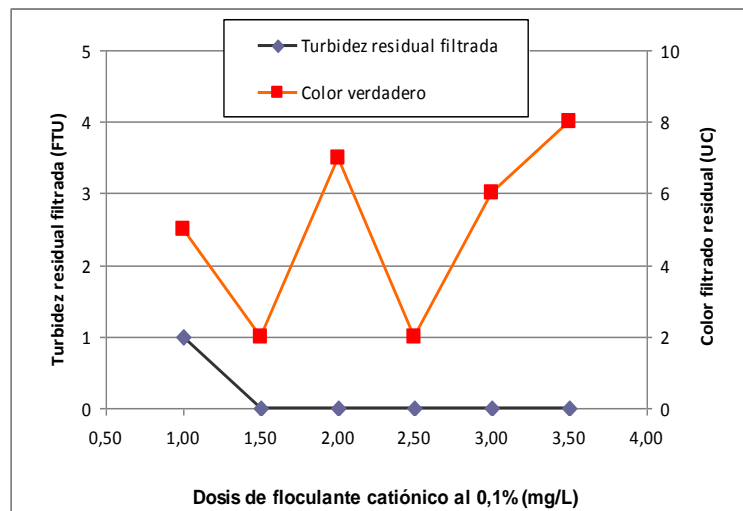


Figura 21: Turbidez y color filtrados en función de la dosis de floculante en agua de río aplicando 30 mg/l de SA (color inicial 122 UC, turbidez inicial 12 FTU, pH 7,01). Cuadro ML-10 Apéndice.

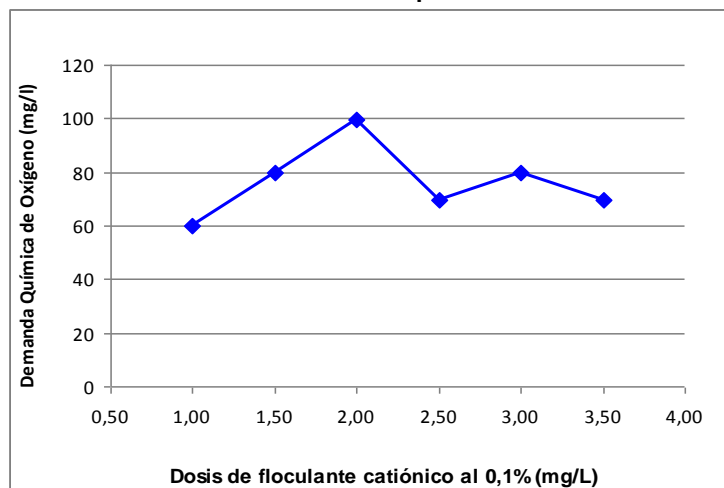


Figura 22: Demanda química de oxígeno (DQO) soluble en función de la dosis de floculante catiónico en agua de río (color inicial 122 UC, turbidez inicial 12 FTU, pH 7,01). Cuadro ML-10 Apéndice.

Los parámetros óptimos experimentales para eliminar turbidez y color de la muestra de río para el primer muestreo de la época seca del 2009 fueron:

<b>pH: 7,50</b>	<b>dosis de SA: 30,0 mg/l</b>	<b>dosis de floculante catiónico: 1,00 mg/l</b>
<b>tiempo de agitación rápida: 1 minuto</b>		<b>velocidad agitación rápida: 100 rpm</b>
<b>tiempo de agitación lenta: 8 minutos</b>		<b>velocidad agitación lenta: 50 rpm</b>

## **3.2 Evaluación de la moringa para el tratamiento de agua de río y agua artificial**

### **3.2.1 Evaluación de moringa como coagulante**

Los resultados siguen el orden cronológico de los ensayos.

#### **3.2.1.1 Agua de río**

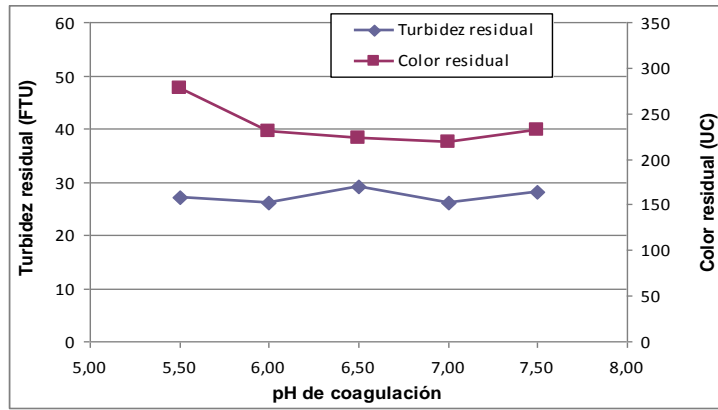
##### **Época lluviosa 2008**

Se aplicó la moringa en muestras de agua de diferentes muestreos de la época lluviosa de 2008.

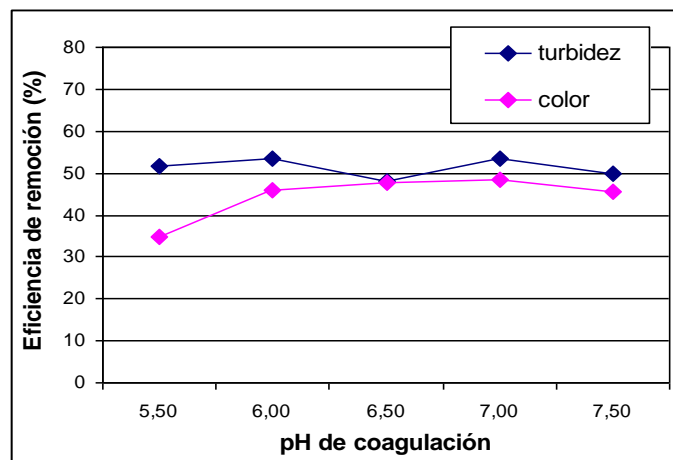
La primera disolución de moringa que se preparó tuvo una concentración del 1 % masa-volumen. Se utilizaron parámetros óptimos de prueba de jarra similares a los recomendados para el sulfato de aluminio como coagulante siguiendo el método Sapporo, esto es, un tiempo de agitación rápida de 1 minuto a 100 rpm, luego se bajó a 60 rpm donde se ajustó el pH (si es del caso), luego se añade el floculante aniónico y se deja durante 5 minutos a una agitación de 50 rpm y se deja 20 minutos en reposo. Siguiendo el procedimiento anterior, se determinó el pH óptimo de coagulación utilizando una dosis fija de moringa de 50 mg/l y una dosis fija del floculante aniónico de 0,60 mg/l.

##### **Determinación del pH óptimo de coagulación**

El producto natural no mostró ninguna actividad en una muestra de agua de río con una turbidez inicial de 17 FTU, un color inicial de 130 UC a un pH de 7,29. Posteriormente, se aplica ese mismo procedimiento a una muestra de agua del tercer muestreo que contiene mayor turbidez y color (ver la caracterización del agua en el Cuadro 1) con la intención de determinar si este producto natural tiene alguna actividad coagulante bajo condiciones más favorables de coagulación. Los resultados se aprecian en la Figura 23. A pesar que la turbidez y el color residuales son muy altos, se observa que a un pH de 7,00 se obtienen porcentajes de remoción del 54 % y 49 % para turbidez y color, respectivamente, tal como lo muestra la Figura 24.



**Figura 23: Determinación del pH óptimo para remover color y turbidez en agua de río utilizando Moringa como coagulante y floculante aniónico (color inicial 426 UC, turbidez inicial 56 FTU, pH 7,15) (4-12-08). Cuadro MO-18 Apéndice.**



**Figura 24: Eficiencia de remoción de turbidez y color utilizando moringa como coagulante y floculante aniónico en función del pH de coagulación. Cuadro MO-18 Apéndice.**

#### Determinación de la dosis óptima de coagulante

Se evaluó la dosis óptima de coagulante sin modificar el pH original de la muestra del 3<sup>er</sup> muestreo, aplicando una dosis fija de floculante aniónico de 0,60 mg/l. Los resultados muestran que los porcentajes de remoción no superaron un 46 % para la turbidez y un 48 % para el color para la dosis de 50 mg/l (Figura 25 y 26), en comparación con el blanco cuyos porcentajes de remoción fueron de 23 y 26 %, respectivamente (referirse al Cuadro MO-19 del Apéndice).

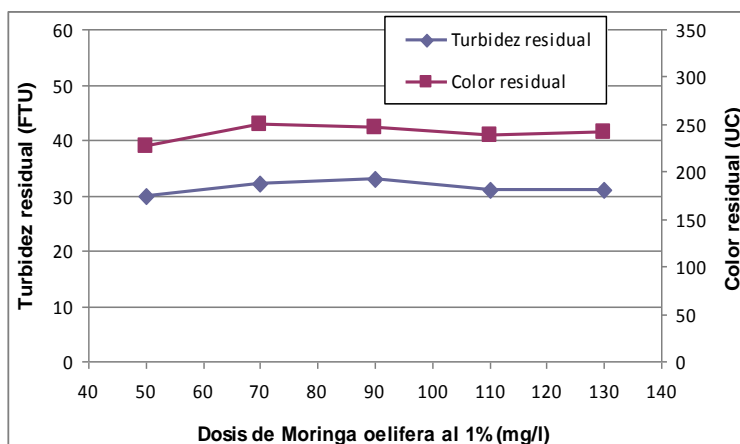


Figura 25: Dosis óptima de coagulante para remover color y turbidez en agua de río (color inicial 438 UC, turbidez inicial 56 FTU, pH 7,18) (4-12-08). Cuadro MO-19 Apéndice.

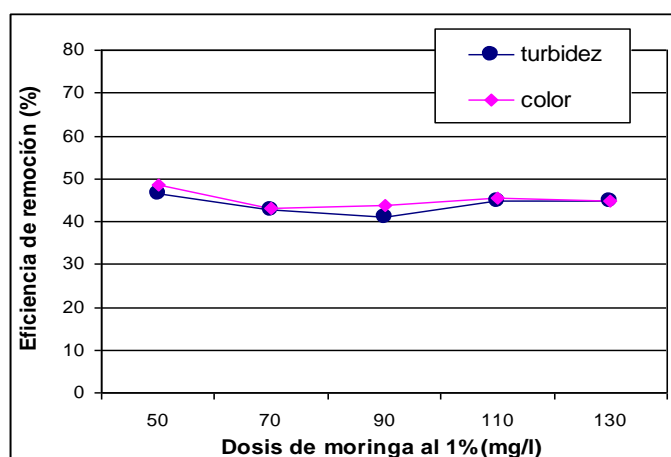


Figura 26: Eficiencia de remoción de turbidez y color utilizando moringa como coagulante y polímero aniónico como floculante en función de la dosis de coagulante. Cuadro MO-19.

### Época seca de 2009

Optimización de la dosis de moringa empleando agua de río del segundo muestreo de la época seca

En esta muestra de agua no se observó actividad coagulante, por tal razón, no se midieron los parámetros finales y se reportó una eficiencia de remoción de cero para turbidez y color (ver Cuadro 44 del Anexo) y ver la línea de cuadros verde en las Figuras 33 y 34.

#### 3.2.1.2 Agua artificial

Se efectúa una prueba de jarras empleando agua modelo semejando los valores de turbidez y color encontrados en la muestra del primer muestreo de época lluviosa de 2008. El agua modelo tiene las siguientes características:

Fecha: 18 de febrero de 2009

Turbidez: 13 FTU.

Color aparente: 116 UC.

Temperatura: 17,7 °C.

pH: 7,43

Alcalinidad: no se midió

Dureza: no se midió

No se aplica polímero aniónico y el pH de todas las jarras es el original (pH = 7,43). La mezcla rápida es a 175 rpm durante 2 minutos, luego se baja la velocidad a 35 rpm durante 20 minutos. Se deja reposar durante 2 horas.

En la Figura 27 se observa el mejor tratamiento fue a una dosis de 300 mg/l del coagulante con eficiencias de remoción de 62 y 77 % (Figura 28) para turbidez y color, respectivamente, dando valores residuales de 5 FTU y 27 UC. El tamaño de los flóculos es inferior a 6 según el índice de floculación de Willcomb (Arboleda 2000) en comparación con los que formó el sulfato de aluminio como se aprecia en la línea punteada.

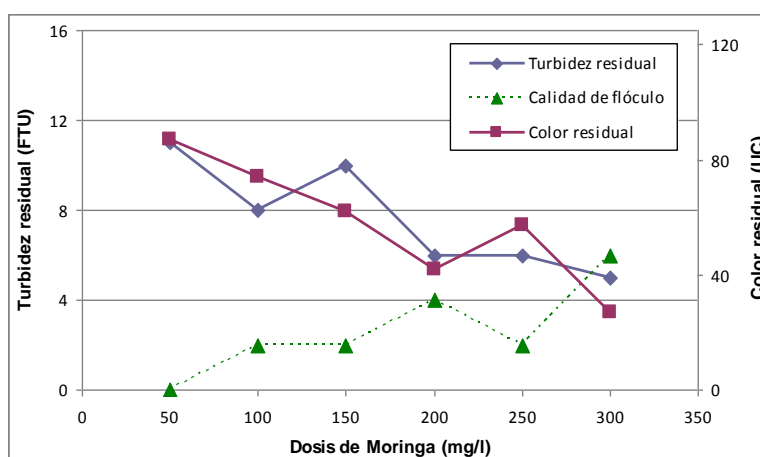


Figura 27: Dosis óptima de moringa (5,0 g/250 mL) para la remoción de color y turbiedad en agua artificial (color inicial 116 UC, turbidez inicial 13 FTU, pH 7,43) a 17,7°C. Cuadro 30 Apéndice.

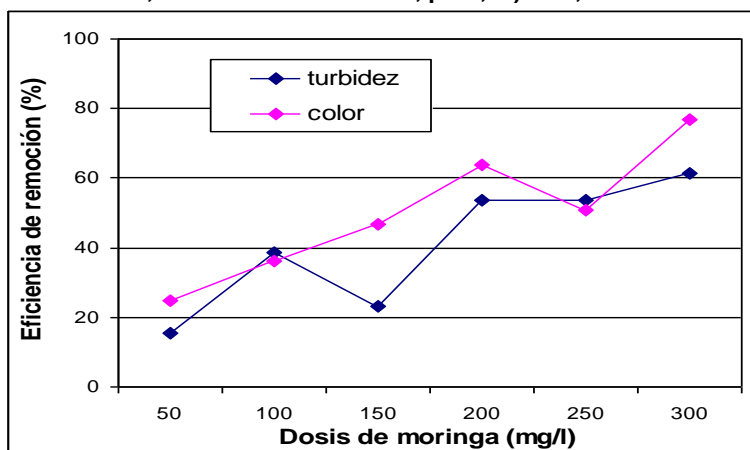


Figura 28: Eficiencia para la remoción de la turbidez y el color utilizando de moringa (5,0 g/250 mL) en agua artificial (color inicial 116 UC, turbidez inicial 13 FTU, pH 7,43) a 17,7°C. Cuadro 30 Apéndice.

Se repitió el procedimiento anterior añadiendo 1,00 ml de floculante catiónico al 0,1 % (dosis de 1 mg/L) a todas las jarras con la intención de evaluar si con un ayudante de coagulación se favorecería la formación de flóculos. De la Figura 29 se observa que a una dosis de 150 mg/l del coagulante, se obtuvo la máxima remoción de turbidez con un valor residual de 11 FTU y que corresponde a una eficiencia de remoción del 21 %. Al aplicar una dosis de 300 mg/l, la mejor remoción de color dio un valor remanente de 87 UC, lo que corresponde a una eficiencia del 16 %.

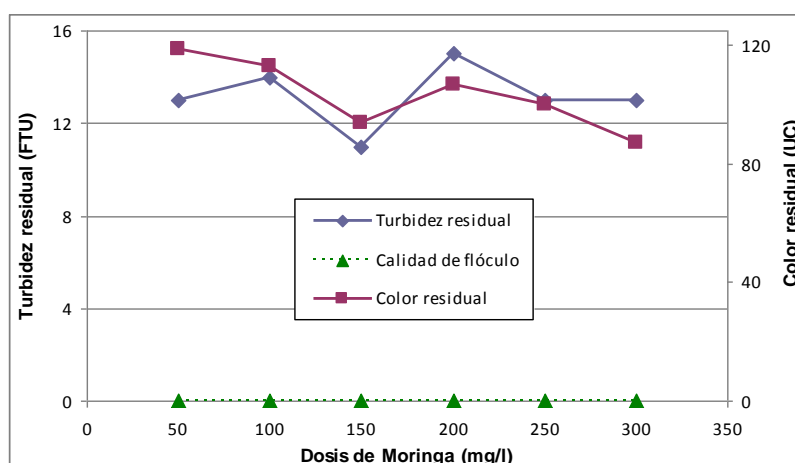


Figura 29: Dosis óptima de moringa (5,0 g/250 mL) para la remoción de color y turbiedad en agua artificial empleando floculante catiónico (color inicial 116 UC, turbidez inicial 13 FTU, pH 7,43) a 17,7°C. Cuadro 31 Apéndice.

Se efectuó una prueba de jarras empleando agua modelo semejando los valores de turbidez y color del primer muestreo de época lluviosa de 2008. Su caracterización es la siguiente:

Fecha: 24 de abril de 2009

Turbidez: 20 FTU.

Color aparente: 148 UC.

Temperatura: no se midió.

pH: 7,89

Alcalinidad: no se midió

Dureza: no se midió

La mezcla rápida fue a 175 rpm durante 2 minutos, luego se bajó la velocidad a 35 rpm durante 20 minutos. Se deja reposar durante 1 hora. El resultado se aprecia en la Figura 30. A una dosis óptima de 600 mg/l se obtienen los mejores porcentajes de remoción tanto para turbidez (65 %) con un valor residual de 7 FTU, como para color (53 %) con un valor residual de 70 UC.

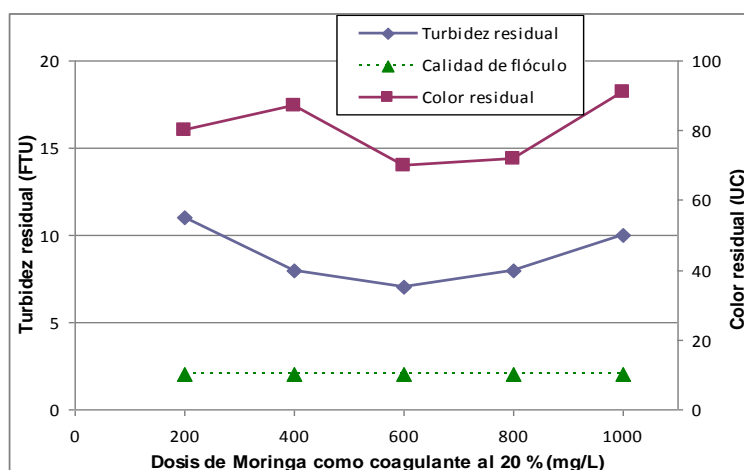


Figura 30: Dosis optima de Moringa como coagulante para la remoción de color y turbiedad en agua artificial (color inicial 148 UC, turbidez inicial 20 FTU, pH 7,89). Cuadro MLBH-12 Apéndice.

## Optimización de la dosis de *Moringa oleifera* empleando agua de río con turbidez y alcalinidad artificial

Para la muestra de agua del segundo muestreo de la época seca 2009, no se observó actividad coagulante, por tal razón, no se midieron los parámetros finales y se reportó una eficiencia de remoción de cero para turbidez y color (ver Cuadro 44 del Anexo).

Al agua de río se adicionó turbidez y alcalinidad artificialmente utilizando los mismos parámetros citados con anterioridad solo que el tiempo de reposo se incrementó a 2 horas. De la Figura 31 se aprecia que a una dosis de 800 mg/l la turbidez se disminuyó hasta 9 FTU y conforme se aumentó la dosis hasta 1800 mg/l, esta no mejoró significativamente. Se observó la misma tendencia para el color solo que el mejor tratamiento (1000 mg/l) dio un color remanente de 49 UC con una eficiencia del 73 %, como se puede apreciar de la Figura 32. La calidad de los flóculos apenas mejoró en una unidad a partir de 1600 mg/l de coagulante aplicado.

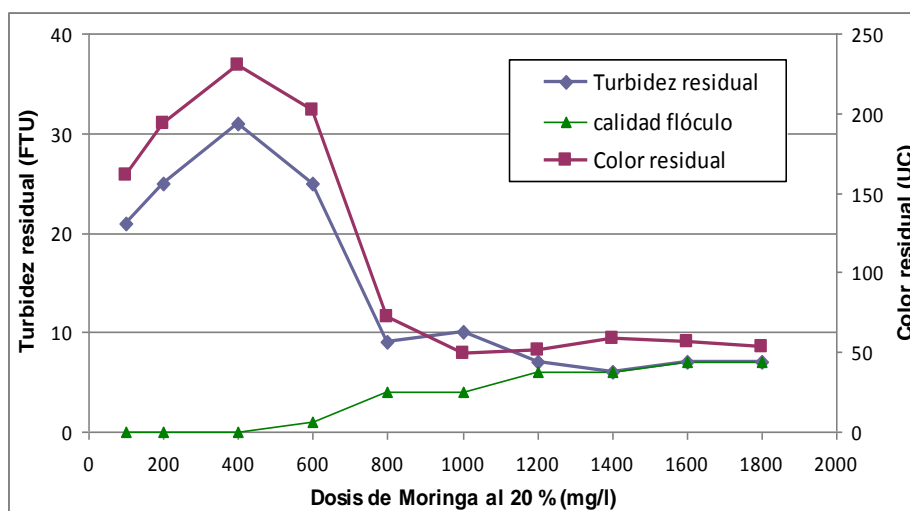


Figura 31: Dosis óptima de moringa para remover color y turbiedad en agua artificial (color inicial 164-184 UC, turbidez inicial 21 FTU, pH 7,40-7,52) a 21,8 °C. Cuadros 47 y 48 Apéndice.

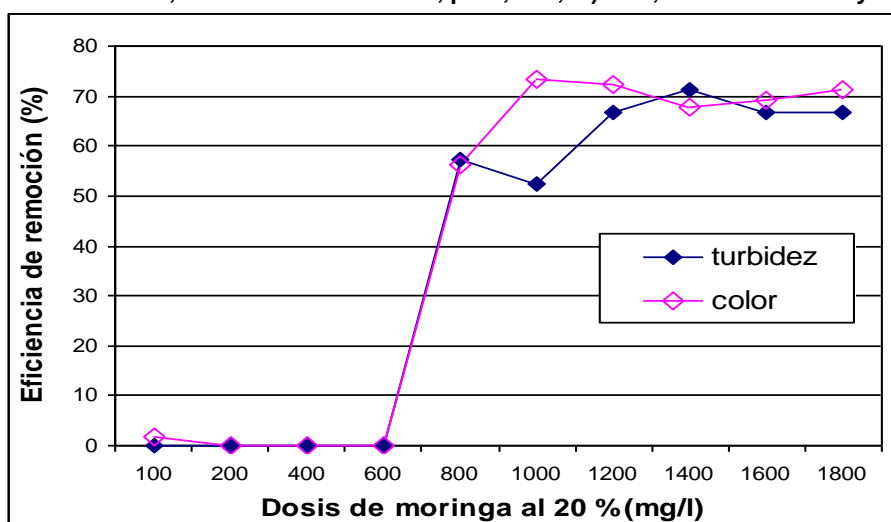


Figura 32: Eficiencia en la remoción de color y turbiedad empleando moringa en agua artificial (color inicial 164-184 UC, turbidez inicial 21 FTU, pH 7,40-7,52) a 21,8 °C. Cuadros 47 y 48 Apéndice.



Posteriormente, se disminuyeron las velocidades de agitación rápida a 100 rpm durante 1 minuto y la agitación lenta a 20 rpm durante 20 minutos

En la muestra del segundo muestreo de la época seca 2009, no se observó actividad coagulante de moringa y por tal razón, no se midieron los parámetros finales y se reportaron eficiencias de cero por ciento para turbidez y color (véase la línea verde con cuadros vacíos en Figuras 33 y 34 y el Cuadro 44 del Anexo).

Al adicionar CaO se apreció una ligera actividad coagulante. Esta actividad fue incrementándose conforme se aumentó la turbidez inicial. En las figuras 33 y 34 se aprecia este comportamiento donde se registran los valores residuales de turbidez y color residuales, respectivamente, en función de la dosis de moringa añadida, mientras que en las figuras 35 y 36 se muestran las eficiencias correspondientes. Para la muestra con una turbidez inicial de 8 FTU sin CaO no se observó actividad coagulante para dosis de 200 hasta 1000 mg/l (línea de cuadros verdes). Al adicionar solamente CaO para la misma turbidez y color iniciales, se obtuvo hasta un 50 % de remoción de turbidez, dando una turbidez final de 4 FTU a una dosis de 1600 mg/l (véase la línea con rombo rojo en Figuras 33 y 35). Para el color, el mejor tratamiento fue del 34 % (Figura 36) a una dosis de 1200 mg/l, sin embargo, el color residual fue de 41 UC (Figura 34). Para una turbidez y color iniciales de 14 FTU y 114 UC, respectivamente, el mejor tratamiento para ambos parámetros fue a una dosis de 1400 mg/l con eficiencias del 64 y 66 % y valores residuales de 5 FTU y 39 UC, respectivamente (véase línea rosada). Para una turbidez y color iniciales de 18 FTU y 150 UC, el mejor tratamiento para ambos parámetros fue a una dosis de 1200 mg/l con eficiencias de 78 y 89 %, respectivamente, y valores residuales de 4 FTU para turbidez y 16 UC para el color (línea azul). Este tratamiento fue el único de todo este estudio para el cual el color remanente fue aceptable para ser posteriormente filtrado.

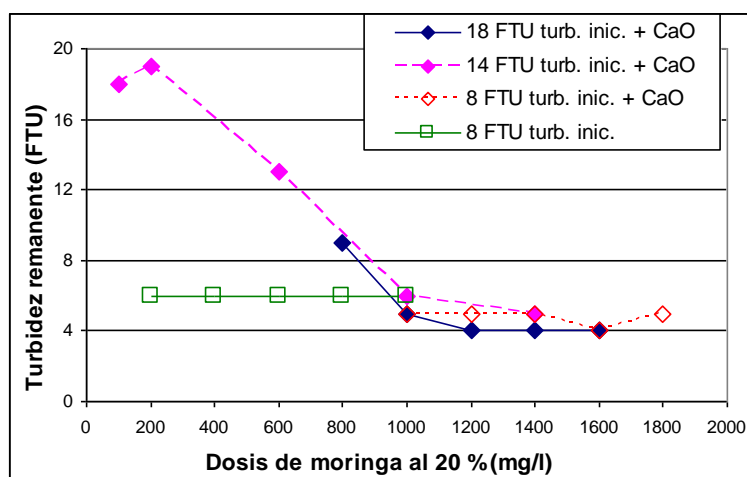


Figura 33: Turbidez residual en función de la dosis de moringa variando la turbidez inicial con y sin alcalinizante. Cuadros 44, 49, 50 y 51 Apéndice.

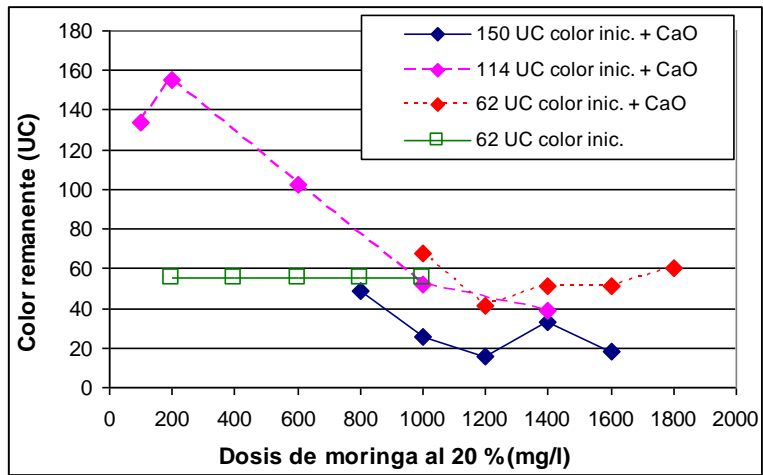


Figura 34: Color residual en función de la dosis de moringa variando la turbidez inicial con y sin alcalinizante. Cuadros 44, 49, 50 y 51 Apéndice.

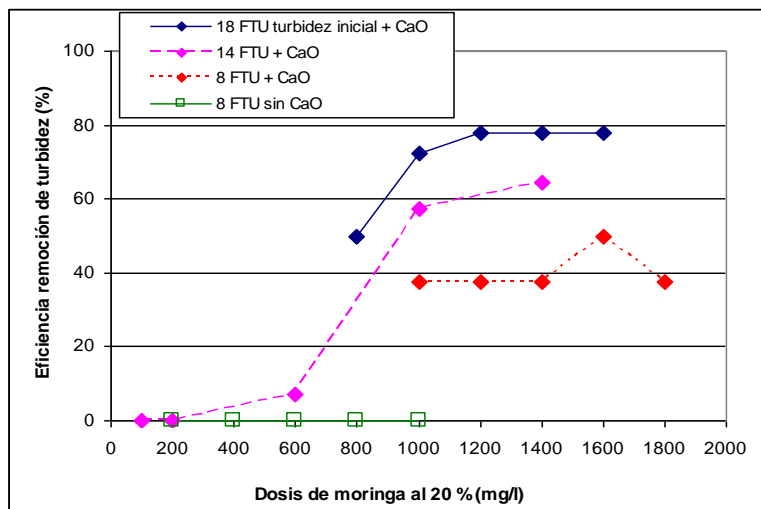


Figura 35: Eficiencia de remoción de turbiedad en agua artificial y de río con y sin alcalinidad artificial. Cuadros 44, 49, 50 y 51 Apéndice.

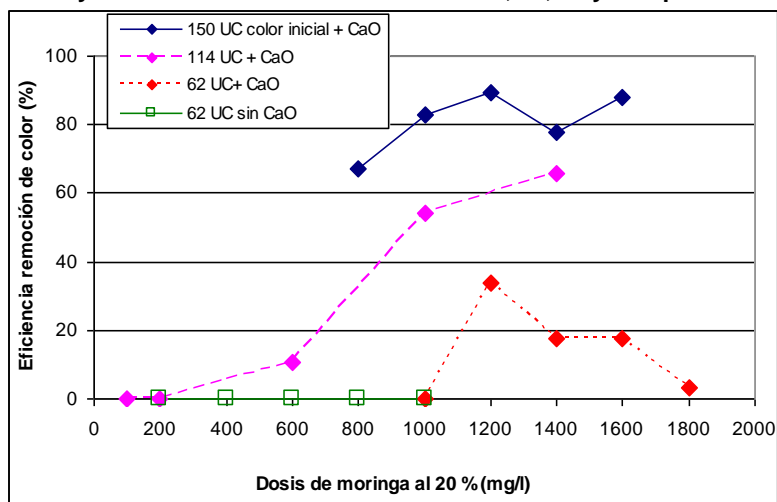


Figura 36: Eficiencia de remoción del color en agua artificial y de río con y sin alcalinidad artificial. Cuadros 44, 49, 50 y 51 Apéndice.

Según los resultados anteriores, ningún tratamiento donde se aplicó la moringa redujo el color a valores aceptables. Por otro lado, para agua modelo, el tratamiento que logró la mejor efectividad en disminuir la turbidez y el color a valores aceptables fue la siguiente:

**Dosis de CaO: 1,5 mg/l**

**Tiempo de agitación rápida: 1 minuto**

**Tiempo de agitación lenta: 20 min**

**Tiempo de reposo: 2 horas.**

**Velocidad de agitación rápida: 100 rpm,**

**Velocidad de agitación lenta: 20 rpm.**

**Dosis óptima de moringa: 1200 mg/l**

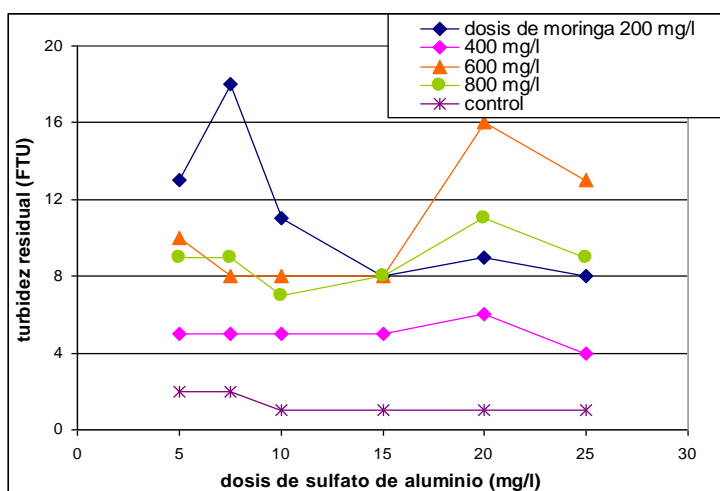
### 3.2.2 Evaluación de la moringa como floculante en agua artificial

Se verificó la efectividad de la moringa como polielectrolito auxiliar del SA que es utilizado como coagulante en la planta de tratamiento de agua potable de Tres Ríos. Para ello, se preparó agua modelo utilizando agua de la cañería a la que se le agregó turbidez, color y alcalinidad artificialmente. La caracterización del agua modelo fue la siguiente:

Turbidez: 19-23 FTU      Color: 152-175 UC      pH: 6,85-6,98

Alcalinidad adicional: 1,5 mg/l de CaO

Se determinó la mejor dosis de sulfato de aluminio a tres diferentes dosis fijas de moringa para cada prueba de jarras. Se encontró que a una dosis de 5,0 mg/l del SA y de 400 mg/l de moringa se redujo la turbidez hasta 5 FTU (73 % remoción), mientras que a una dosis de 25 mg/l de SA y de 400 mg/l del floculante se obtuvo la mejor remoción del color con un valor residual de 27 UC (83 % remoción) (véanse las Figuras 37 y 38). Sin embargo, el tratamiento control, esto es, solo el sulfato de aluminio sin moringa produjo las mejores remociones para ambos parámetros a una dosis de 5 mg/l del coagulante, dando turbidez y color aparente residuales de 2 FTU y 15 UC, respectivamente, con una calidad de flóculo excelente de 10 unidades en la escala de Willcomb (véase Cuadro 60 del Anexo).



**Figura 37: Evaluación de moringa como floculante en función de la dosis de sulfato de aluminio como coagulante para remover turbiedad en agua artificial (turbidez inicial 19-23 FTU, pH 6,85-6,98). Cuadros 56 a 60 Apéndice.**

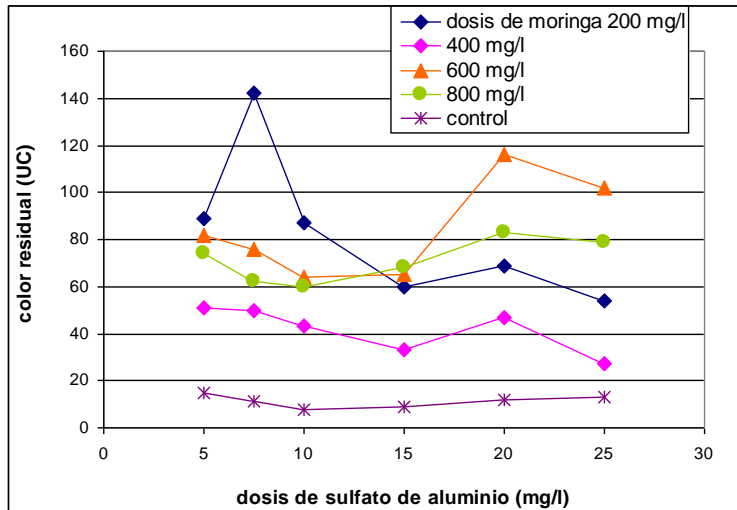


Figura 38: Evaluación de moringa como floculante en función de la dosis de sulfato de aluminio como coagulante para remover color en agua artificial (color inicial 152-175 UC, pH 6,85-6,98). Cuadros 56 a 60 Apéndice.

### 3.3 Evaluación del quitosano como coagulante para el tratamiento de agua artificial y de río

#### 3.3.1 Agua artificial

Se realizó una prueba de jarras utilizando quitosano como coagulante en agua artificial. Los resultados se muestran en la Figura 39.

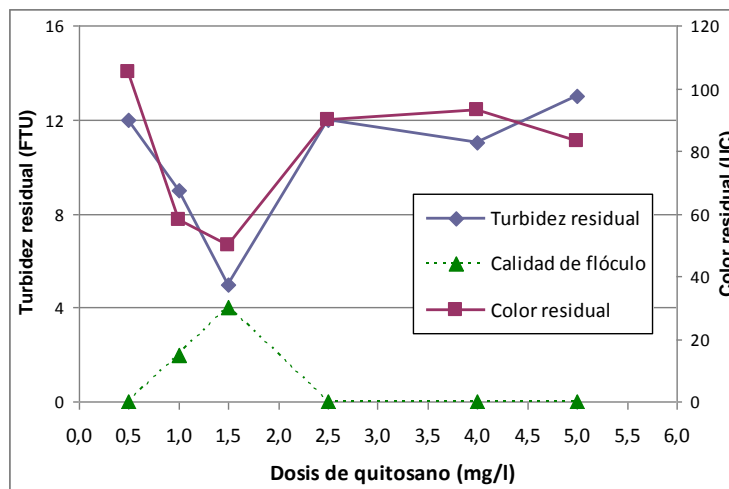
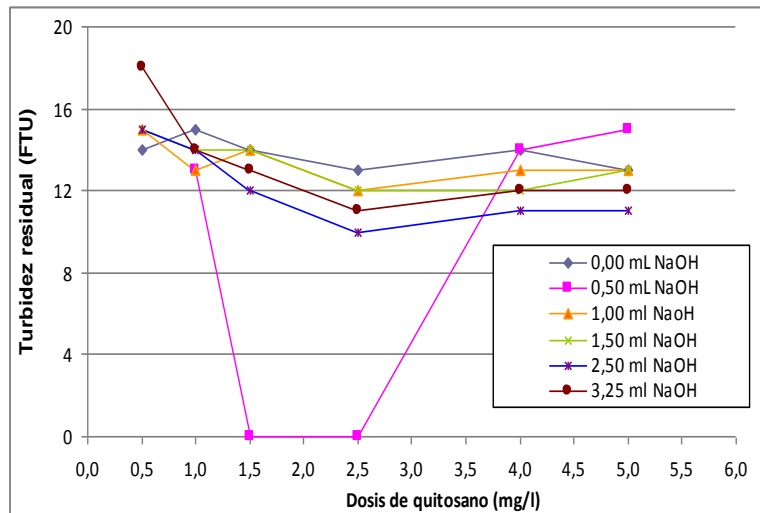


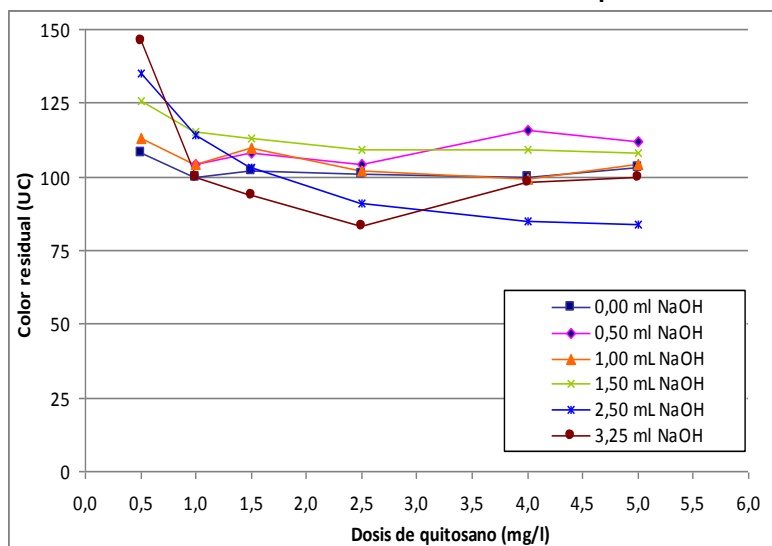
Figura 39: Dosis óptima de quitosano (0,1 g/100 mL) para la remoción de color y turbiedad en agua artificial (color inicial 105 UC, turbiedad inicial 11 FTU, pH 7,68) a 20,8°C. Cuadro 32 Apéndice.

#### 3.3.2 Agua de río

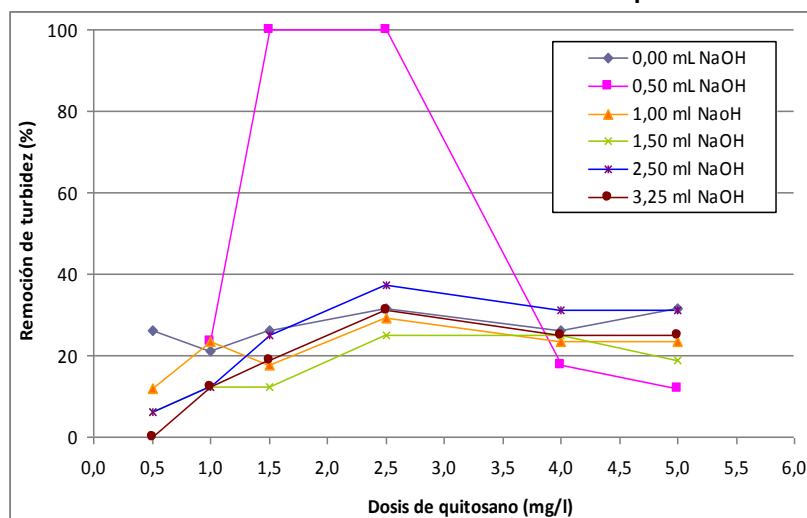
En las siguientes cuatro figuras se resumen las seis pruebas de jarras aplicadas en agua de río. La muestra de agua corresponde al primer muestreo de la época seca de 2009 cuya caracterización se muestra en el Cuadro 1.



**Figura 40:** Turbidez residual en función de la dosis de quitosano y del alcalinizante en agua de río (color inicial 141-103 UC, turbidez inicial 19-16 FTU, pH 7,05-7,23) a 15,8-18,8 °C. Del 5 al 19 de marzo de 2009. Cuadros 34 a 38 Apéndice.



**Figura 41:** Color residual en función de la dosis de quitosano y del alcalinizante en agua de río (color inicial 141-103 UC, turbidez inicial 19-16 FTU, pH 7,05-7,23) a 15,8 a 18,8 °C. Del 5 al 19 de marzo de 2009. Cuadros 34 a 38 Apéndice.



**Figura 42:** Eficiencia en la remoción de la turbidez en función de la dosis de quitosano y del alcalinizante en agua de río (color inicial 141-103 UC, turbidez inicial 19-16 FTU, pH 7,05-7,23) de 15,8 a 18,8 °C. Del 5 al 19 de marzo de 2009. Cuadros 34 a 38 Apéndice.

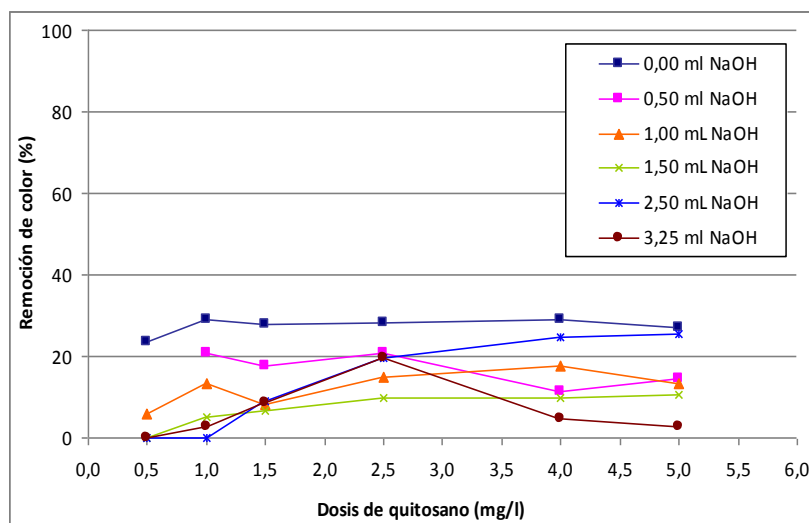


Figura 43: Eficiencia en la remoción del color en función de la dosis de quitosano y del alcalinizante en agua de río (color inicial 141-103 UC, turbidez inicial 19-16 FTU, pH 7,05-7,23) de 15,8 a 18,8 °C. Del 5 al 19 de marzo de 2009. Cuadros 34 a 38 Apéndice.

### 3.4 Evaluación del mozote de caballo *Triumfetta semitriloba* para el tratamiento de agua artificial y de río

#### 3.4.1 Evaluación del mozote como coagulante

Hasta el momento no ha sido posible encontrar literatura donde se utilice el mozote como coagulante para clarificar aguas turbias o coloreadas tanto para consumo humano como residuales. De los ensayos efectuados, de ninguno de ellos se encontró alguna actividad coagulante hasta dosis de 1000 mg/l. Se observó, un aumento en el color remanente a partir de la dosis de 200 mg/l, no así para la turbidez residual que permaneció invariable (referirse al Cuadro 65 del Apéndice).

#### 3.4.2 Evaluación del mozote como floculante

##### 3.4.2.1 Agua artificial

Optimización de la dosis de mozote en agua artificial con CaO adicional

Para evaluar la capacidad floculante del mozote, se aplicó una dosis de mozote de 600 mg/l en todas las jarras variándose la dosis del coagulante. De la Figura 44 se observa que a una dosis de 7,5 mg/l de sulfato de aluminio el color se reduce a valores inferiores a 11 UC con calidad de flóculos superior a 8 unidades. Posteriormente, se aplicó esta dosis óptima del coagulante (7 mg/l) a todas las jarras variando la dosis de mozote. En la Figura 45 se aprecia que con la dosis mínima aplicada de mozote (200 mg/l) se redujo el color a valores aceptables (10 UC) con muy buena calidad de flóculos (8 unidades).

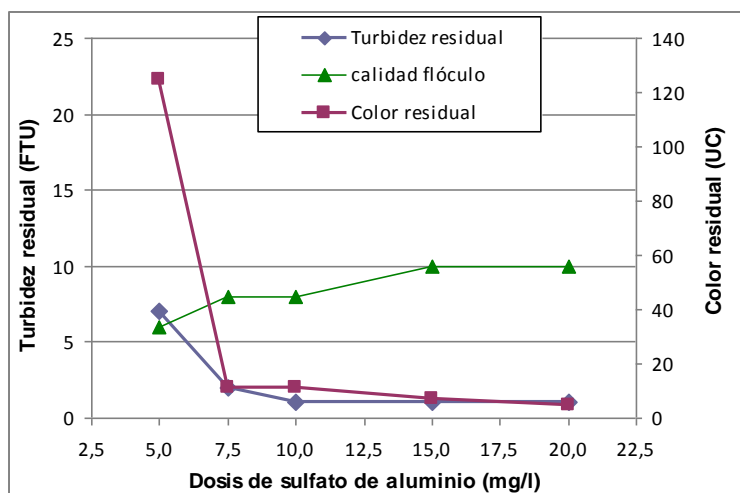


Figura 44: Dosis de sulfato de aluminio como coagulante aplicando mozote como floculante a una dosis fija de 600 mg/l para remover color y turbiedad en agua sintética con 1,5 mg/l de CaO (color inicial 165 UC, turbidez inicial 22 FTU, pH 7,06). Cuadro 66 Apéndice.

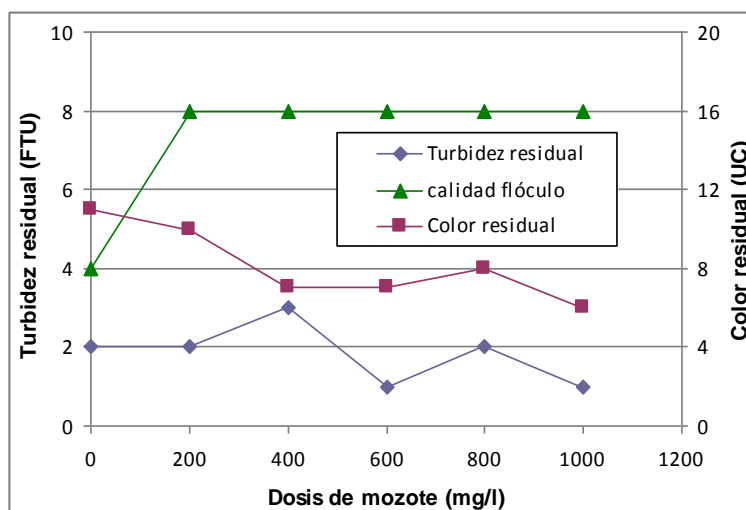


Figura 45: Dosis de mozote como floculante aplicando 7,0 mg/l de sulfato de aluminio para remover color y turbiedad en agua sintética con una dosis de 1,5 mg/l de CaO (color inicial 158 UC, turbidez inicial 20 FTU, pH 7,49). Cuadro 67 Apéndice.

#### Optimización de la dosis de mozote en agua de río con CaO adicional

Aplicando las mismas dosis de mozote, se incrementó la dosis de sulfato de aluminio de 7 mg/l a 12 mg/l, en comparación con la prueba anterior. Lo anterior se basó en que la muestra es agua de río que es muy blanda y de baja alcalinidad y turbiedad (16 FTU). Los resultados se observan en las Figuras 46 y 47.

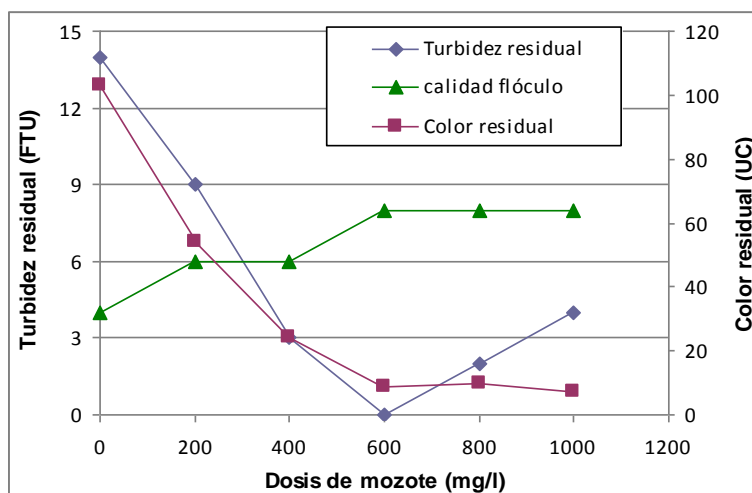


Figura 46: Dosis de mozote como floculante aplicando una única dosis de sulfato de aluminio de 12 mg/l para remover color y turbiedad en agua de río, con una dosis de 1,5 mg/l de CaO (color inicial 133 UC, turbidez inicial 16 FTU, pH 6,83). Cuadro 68 Apéndice.

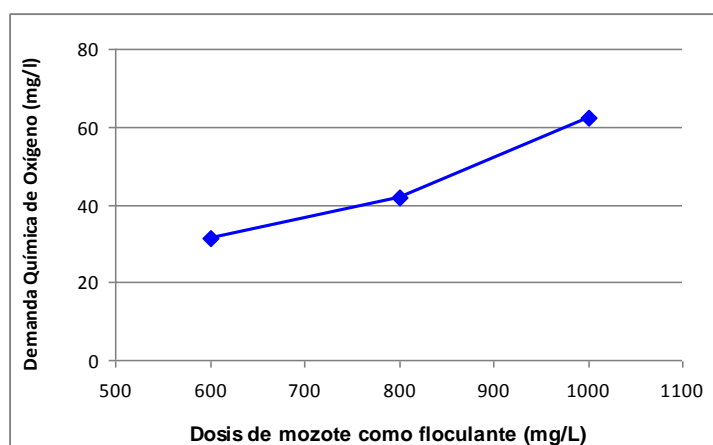


Figura 47: Demanda química de oxígeno soluble en función de la dosis de mozote como floculante para las muestras con color residual inferior a 20 UC según los resultados de la Figura 46. Cuadro 68 Apéndice.

### 3.5 Evaluación de la tuna *Cactus lefaria* para el tratamiento de agua de río y agua artificial

#### 3.5.1 Evaluación de la tuna como coagulante

##### 3.5.1.1 Agua de río con y sin alcalinidad artificial

Bajo esas condiciones la tuna no mostró ninguna actividad coagulante.

##### 3.5.1.2 Agua modelo con alcalinidad artificial

Al aplicar la disolución de tuna, como coagulante único, a una muestra de agua modelo con CaO añadido artificialmente, se observó que a la mínima dosis de 45 mg/l aplicada, se obtuvo la máxima clarificación, tanto para la turbidez como para el color, así como para la calidad de los flóculos (véase la Figura 48). La calidad de los flóculos formados fue proporcional al grado de clarificación obtenido. A esa mínima dosis aplicada, las



remociones fueron del 100 % y 94 % para turbidez y color, respectivamente, como se observa de la figura 49. La demanda química de oxígeno soluble para el mejor de los tratamientos fue de 24,5 mg/l.

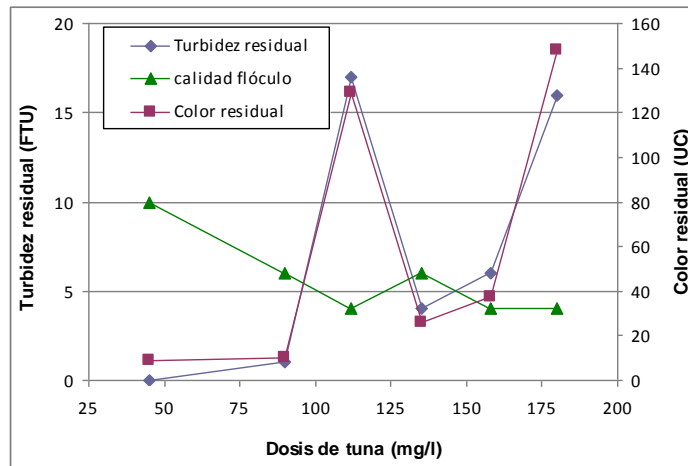


Figura 48: Dosis de tuna como coagulante único para remover color y turbiedad en agua modelo, con una dosis de 1,5 mg/l de CaO (color inicial 162 UC, turbidez inicial 20 FTU, pH 7,56). Cuadro 69 Apéndice.

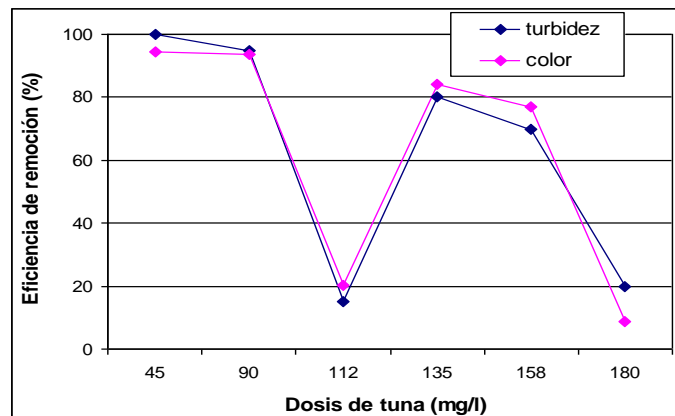


Figura 49: Eficiencia de remoción de turbidez y color en función de la dosis de tuna en agua modelo con alcalinidad artificial. Cuadro 69 Apéndice.

## 3.5.2 Evaluación de la tuna como floculante

### 3.5.2.1 Agua modelo con alcalinidad artificial

Aplicando una dosis óptima de sulfato de aluminio de 12 mg/l en todas las jarras se encontró una dosis óptima de 22,5 mg/l de tuna. Este tratamiento dio un color residual de 13 UC (véase Figura 50) con una eficiencia del 92 % (Figura 51) con un valor de DQO soluble de 31,5 mg/l (Figura 52). Se observa además, de esta figura que al aumentar la dosis de tuna a 67 mg/l, se disminuye el DQO soluble hasta 21 mg/l con valores muy semejantes de turbidez y color residuales.

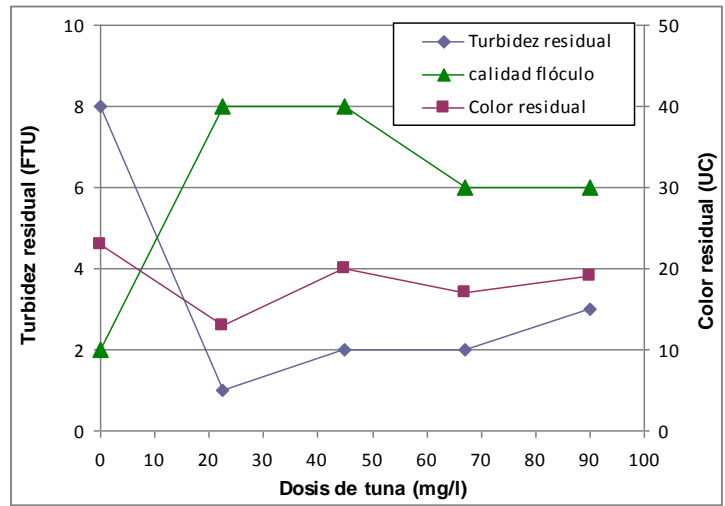


Figura 50: Dosis de tuna como floculante a una dosis única de SA de 12 mg/l para remover color y turbiedad en agua modelo, con una dosis de 1,5 mg/l de CaO (color inicial 162 UC, turbiedad inicial 20 FTU, pH 7,27). Cuadro 72 Apéndice.

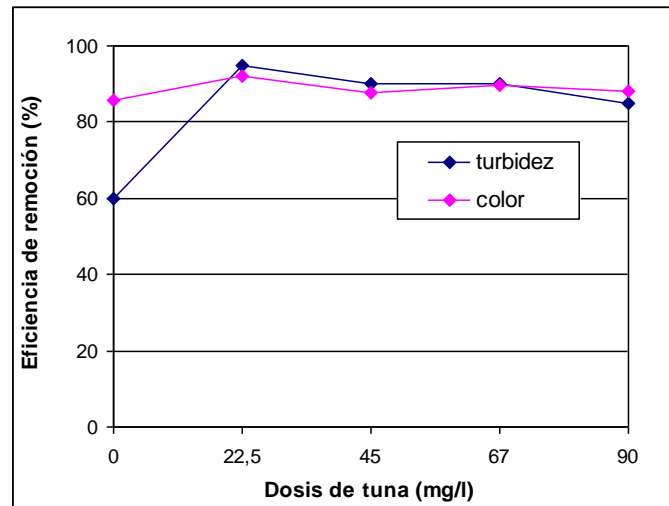


Figura 51: Eficiencia de remoción de turbidez y color en función de la dosis de tuna como floculante, en agua modelo con alcalinidad artificial. Cuadro 72 Apéndice.

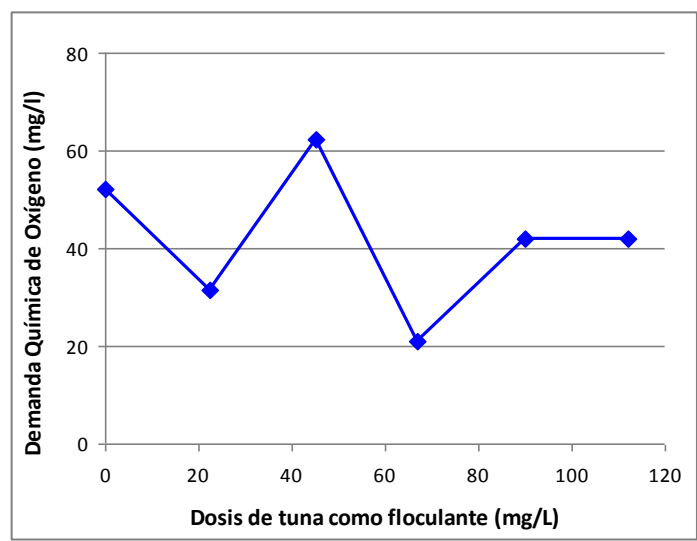


Figura 52: Demanda química de oxígeno en función de la dosis de tuna como floculante, en agua modelo con alcalinidad artificial. Cuadro 72 Apéndice.

### 3.5.2.2 Agua de río con alcalinidad artificial

Los resultados mostrados en este apartado se basaron en agua del segundo muestreo de la época seca de 2009. En el Cuadro 1 (pág. 31) se aprecia la caracterización de la muestra de río de este muestreo. A esta muestra se le añadió 1,5 mg/l de CaO para favorecer la coagulación dado que el agua de este río presenta en general baja alcalinidad y dureza.

En la Figura 53 se observa que a la mínima dosis de tuna aplicada (10 mg/l), se obtuvo un color remanente aceptable de 20 UC con una remoción del 86 % (Figura 54) y una turbidez de 3 FTU con calidad de flóculos de 4 unidades Willcomb. La DQO soluble para este tratamiento fue de 42 mg/l (Figura 55). Se encontró otra dosis óptima del floculante de 45 mg/l con valores de turbidez y color residuales de 2 FTU y 18 UC, respectivamente, pero la DQO remanente aumentó a 74 mg/l.

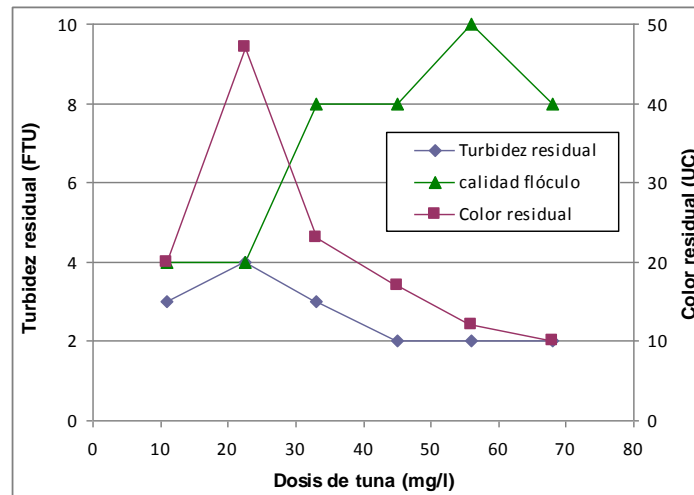


Figura 53: Dosis de tuna como floculante a una dosis única de SA de 12 mg/l para remover color y turbiedad en agua de río, con una dosis de 1,5 mg/l de CaO (color inicial 138 UC, turbidez inicial 17 FTU, pH 7,02). Cuadro 71 Apéndice.

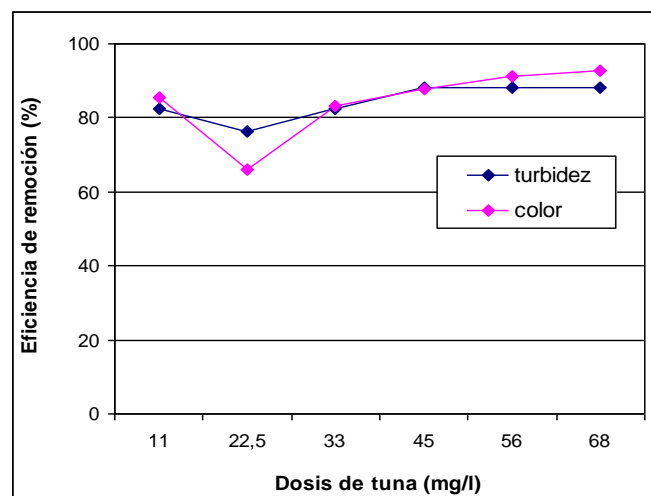


Figura 54: Eficiencia de remoción de turbidez y color en función de la dosis de tuna como floculante en agua de río, con alcalinidad artificial. Cuadro 71 Apéndice.

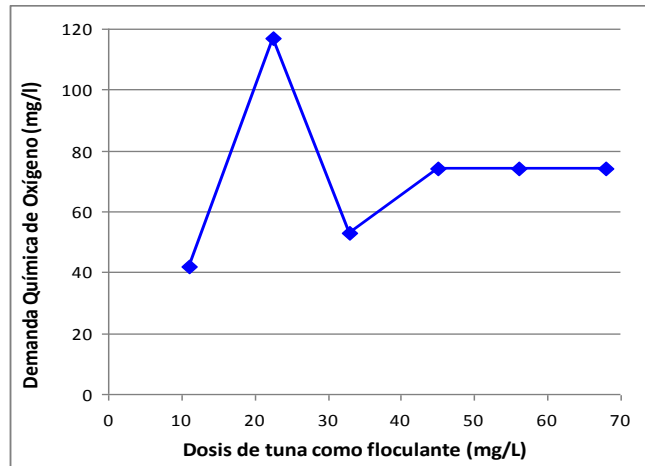


Figura 55: Demanda química de oxígeno en función de la dosis de tuna como floculante en agua de río, con alcalinidad artificial. Cuadro 71 Apéndice.

### 3.6 Evaluación del floculante catiónico KF-930-S como ayudante de coagulación del sulfato de aluminio en agua artificial para su comparación con los floculantes naturales

El floculante catiónico sintético se aplicó a tres dosis distintas, variándose la dosis del sulfato de aluminio. Los resultados se observan en las Figuras 56 y 57. Para los mejores tratamientos obtenidos, se cuantificó la DQO soluble la cual se aprecia en la Figura 58.

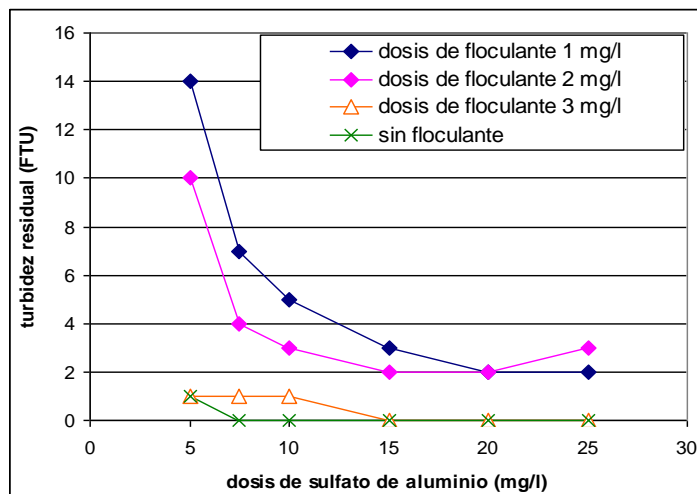


Figura 56: Evaluación del floculante catiónico KF-930-S en función de la dosis de sulfato de aluminio para remover la turbidez en agua artificial, con una dosis de 1,5 mg/l de CaO (color inicial 145-149 UC, turbidez inicial 19-21 FTU, pH 7,50-7,69). Cuadros 61 a 64 Apéndice.

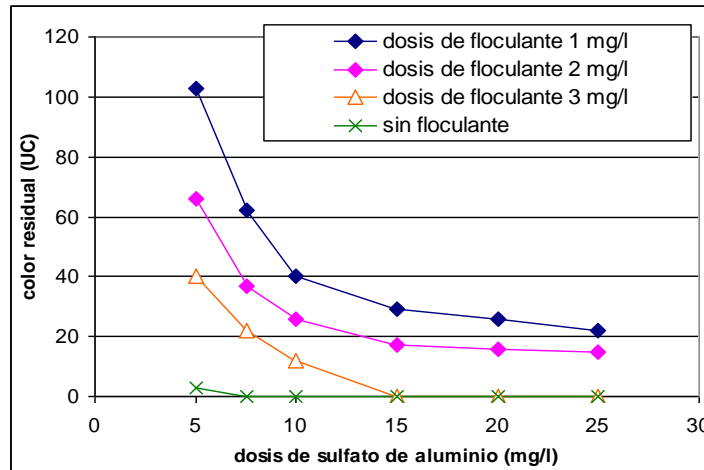


Figura 57: Evaluación del flocculante catiónico KF-930-S en función de la dosis de sulfato de aluminio para remover el color en agua artificial, con una dosis de 1,5 mg/l de CaO (color inicial 145-149 UC, turbidez inicial 19-21 FTU, pH 7,50-7,69). Cuadros 61 a 64 Apéndice.

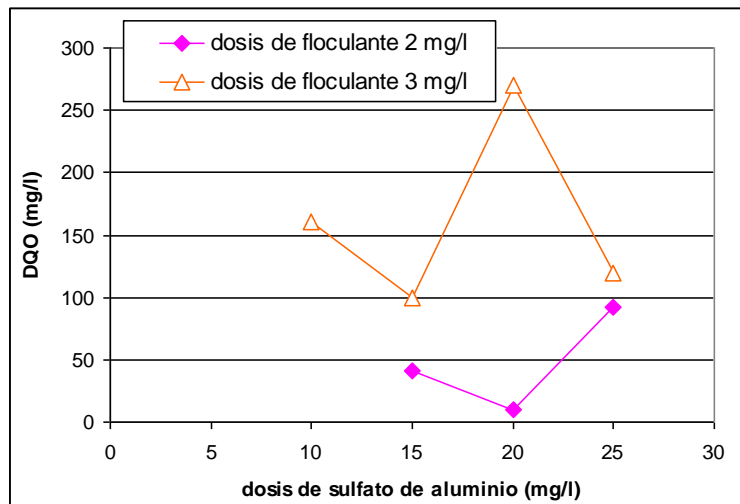


Figura 58: Comparación de la DQO soluble para los mejores tratamientos obtenidos a partir de los resultados de las Figuras 56 y 57. Cuadros 61 a 64 Apéndice.

### 3.7 Comparación del desempeño del sulfato de aluminio con los productos naturales utilizados como coagulantes en agua artificial

A continuación se muestran los parámetros de calidad del agua tratada de los mejores tratamientos obtenidos en este estudio utilizando los diferentes materiales naturales y sintéticos como coagulantes. Se utilizó agua modelo con los siguientes parámetros de calidad iniciales: turbidez = 18-22 FTU; color = 150-165 UC; pH = 7.06-7.56; dosis adicional de CaO = 1,5 mg/l. La excepción es el agua cruda donde se aplicó quitosano cuyos parámetros de calidad son: turbidez = 11 FTU; color aparente = 105 UC; pH = 7,68; no se aplicó CaO. Se observa que el único material que no mostró actividad coagulante fue el mozote.

Cuadro 2 Comparación de los parámetros de calidad del agua artificial tratada con distintos tipos de coagulantes

Parámetro	Coagulante				
	Al <sub>2</sub> (SO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub> + floculante KF-930-S	Moringa	Tuna	Mozote	Quitosano
Dosis coagulante (mg/l)	20	1200	45	100-1000 <sup>(a)</sup>	1,5
Dosis floculante (mg/l)	2,0	0	0	0	0
Turbidez residual (FTU)	2	4	0	19	5
Color residual (UC)	16	16	9	146	50
Remoción de turbidez (%)	90	78	100	0	55
Remoción color (%)	89	89	94	0	52
DQO soluble residual (mg/l)	10,3	n.c.	21	n.c.	n.c.

n.c. = no cuantificado

(a) ámbito de concentraciones aplicado

### **3.8 Comparación del desempeño de los floculantes naturales con el floculante catiónico en agua artificial**

En el siguiente cuadro se muestra un resumen de los parámetros de calidad del agua tratada obtenidos a partir de los mejores tratamientos experimentales, aplicando tres floculantes naturales, utilizando sulfato de aluminio como coagulante. Se utilizó agua modelo con los siguientes parámetros de calidad iniciales: turbidez = 21 FTU; color = 136 UC; pH = 7,58; dosis de CaO = 1,5 mg/l. Para el caso de los floculantes tuna y mozote, se redujo la dosis de sulfato de aluminio a 7,0 mg/l en comparación con la dosis que se había aplicado anteriormente, eso con la intención de evaluar la eficiencia del floculante más que la del coagulante.

Cuadro 3 Comparación de distintos parámetros de calidad del agua artificial tratada con distintos floculantes, aplicando sulfato de aluminio como coagulante

Parámetro	Agua tratada con $Al_2(SO_4)_3$				
	Sin floculante	Con floculante			
		Catiónico KF-930-S	Moringa	Tuna	Mozote
Dosis $Al_2(SO_4)_3$ (mg/l)	7,0	20	25	7,0	7,0
Dosis floculante (mg/l)	0	2,0	400	22,5	600
Turbidez residual (FTU)	4	2	4	1	7
Color residual (UC)	17	16	27	6	22
Remoción de turbidez (%)	81	90	81	95	67
Remoción color (%)	88	89	83	96	84
DQO soluble residual (mg/l)	32	10,3	n.c. (*)	42	88

n.c. = no cuantificado

(\*) La DQO no fue determinada porque el color residual no logró el valor mínimo admisible de 20 UC previo a la filtración.

## 4. Discusión

En el presente estudio, la discusión es presentada según el tipo de material utilizado como coagulante o floculante.

Según los datos del Cuadro 1 (Sección Resultados) se encontró que en general las aguas del Río Humo que fueron caracterizadas para la época lluviosa presentaron baja alcalinidad (4-21 mg/L) y baja dureza (9-14 mg/L) con porcentajes de saturación de oxígeno cercanos al 100 %. Los parámetros anteriores junto con la típica condición de baja turbidez y alto color aparente, provocaron condiciones difíciles para la remoción del color, no así de la turbidez. Para la época seca, las condiciones para remover el color fueron desfavorables con relación a la época lluviosa, por la disminución de la alcalinidad (6-11 mg/l) y de la dureza (< 4 mg/l), con valores de turbidez cercanas a 10 FTU y manteniéndose alto el color aparente (104-142 UC).

### ***4.1 Pruebas preliminares aplicando sulfato de aluminio como coagulante y floculantes sintéticos para el tratamiento de agua artificial y de río***

#### **4.1.1 Empleo del floculante aniónico NOVAFLOC PHA**

##### **4.1.1.1 Agua artificial**

Del la figura 1 (Sección Resultados) se aprecia que a partir de un pH de 6, la remoción del color fue superior al 96 %, que concuerda con la región de pH óptimo para remoción de color por el mecanismo de neutralización de cargas. En la región de pH de 6 a 8 predomina el precipitado de aluminio, y la remoción ocurre por la adsorción de las sustancias húmicas, a través de los grupos carboxílicos de las moléculas orgánicas de alto peso molecular productoras del color, al precipitado polimérico, producto de la hidrólisis del coagulante (Arboleda 2000) (di Bernardo 2005). Los resultados mostrados en las figuras 2 y 3 corresponden a ensayos idénticos utilizando agua modelo con muy altos valores de color y turbidez, no obstante, la reproducibilidad en los resultados no fue idéntica. La remoción de turbidez y color fue mayor para el tercer ensayo (Figura 3) con relación al segundo (Figura 2). Lo anterior se debe al menor tamaño de partícula en la disolución de caolín empleada para el segundo ensayo. El menor tamaño de partícula dificulta la coagulación porque no hay partículas de mayor masa que le den peso al flóculo (Arboleda 2000). Los ámbitos óptimos de pH encontrados para clarificar el color (6,50-6,55) son aceptables considerando el valor límite inferior de 6,5 que exige la normativa nacional para agua potable (MINSA 2005). Además, concuerdan con valores reportados por Arboleda para la planta de tratamiento de San Antonio en Cali, Colombia que son de 6,0 a 7,0 unidades de pH (Arboleda 2000). La remoción óptima de turbidez se obtiene a valores similares de pH que para el color.

La única cita bibliográfica que hasta el presente se refiere a la remoción de color en agua del Río Humo es la que reporta Ruiz donde se aplicó sulfato de aluminio como coagulante (Ruiz, 1991) pero no utilizaron floculante (Ruiz 2009). Por lo anterior, la comparación de dosis óptimas del coagulante SA que se obtuvieron en el presente



estudio con las que reporta Ruiz considera la diferencia en las condiciones de clarificación citada. A su vez, para poder comparar los parámetros óptimos de clarificación que reporta la Planta Potabilizadora de Tres Ríos del ICAA con los reportados en este estudio, deben considerarse las siguientes diferencias: primero, la fuente de agua que proviene del Embalse El Llano hacia la Planta Potabilizadora es una mezcla de los ríos Humo, Villegas y Porras, por lo tanto, variables de calidad del agua como turbiedad, color, pH, alcalinidad y conductividad pueden diferir mucho con las del Río Humo y en consecuencia hacer incomparables los resultados. Segundo, en los ensayos efectuados en este estudio con muestras de río para el año 2008 se aplicó como floculante el polímero aniónico poliacrilamida NOVAFLOC PHA, mientras que en la Planta Potabilizadora, el floculante utilizado es el polímero del cloruro de dialil dimetilamonio KF-930 S que es catiónico.

#### **4.1.1.2 Agua de río**

Determinación de los parámetros óptimos para remover el color

Los dos primeros muestreos de agua de río presentaron turbidez baja (8-9 FTU) y color aparente elevado (85-87 UC). De los resultados se observa que con una misma dosis de coagulante de 10 mg/l fue posible remover tanto color como turbidez (véase Figura 4). Para una muestra de agua del Río Humo con similares valores de turbidez (6,0 FTU) y de color aparente (90 UC) iniciales, Ruiz (Figura 28 de su Tesis) reporta una dosis óptima de SA similar a la de este estudio (10 mg/l) para remover la turbidez hasta 2,5 FTU, no así para el color cuya dosis óptima fue tres veces mayor (30 mg/l) (Ruiz 1991) que la del presente estudio. La anterior comparación considera valores residuales de color de 5 UC y 0 UC, respectivamente. La menor dosis de coagulante reportada en este estudio para producir un color residual de 0 UC se explica por la adición del floculante aniónico que reduce la cantidad de coagulante requerido. La similitud en la mayoría de parámetros de calidad del agua de los dos primeros muestreos explica por qué se obtuvieron dosis óptimas similares de floculante aniónico (0,60 mg/l) y de coagulante (10 mg/l) (Figuras 5 y 6).

El agua del tercer muestreo (Cuadro 1) mostró una turbidez 7 veces superior (65 FTU) que la de los anteriores muestreos (9 FTU), mientras que el color aparente fue cerca de 6 veces mayor (496 UV vs 85 UC). Para ello fue necesario aplicar una dosis de coagulante un 50 % superior (15 mg/l) a la de los muestreos anteriores y una dosis similar del floculante (0,60 mg/l), respectivamente. El pH se mantuvo siempre a un valor de 6,55 previo a la floculación en todos los casos. Estos resultados no concuerdan con la literatura en el sentido que la dosis requerida de coagulante estaría determinada por el contenido de la materia orgánica natural (cuya fracción dominante son las sustancias húmicas) en lugar de la turbidez. En otras palabras, debería existir una relación estequiométrica entre la dosis requerida del SA y la concentración de carbono orgánico total (O'Melia 1999) que se indica como el color del agua. Se aplicó una menor dosis de coagulante de la esperada, debido al efecto que el polímero aniónico tiene en reducir la dosis requerida de coagulante, además, el aumento de la turbidez estimuló la adsorción de las moléculas de color a las partículas de mayor tamaño, lo que se tradujo en una menor dosis del coagulante (Arboleda 2000). No fue posible discutir el efecto de la dureza y alcalinidad de esta muestra de agua en tanto que no se midieron estos parámetros, ya que estos parámetros afectan la efectividad de los coagulantes.

### Determinación del pH óptimo en agua de río empleando la muestra de agua del tercer muestreo con 48 días de almacenamiento

Con base a los resultados obtenidos de las Figuras 10 y 11, se encontró un pH óptimo previo a la floculación de 7,50 para la clarificación del color en agua de río con alto color (107-121 UC) y baja turbidez (14-15 FTU) con 48 días de almacenamiento. Este valor está dentro del intervalo óptimo de 6 a 7,8 para la remoción del 90 % de color verdadero reportado para agua modelo con color aparente alto (130 UC), turbidez baja (5 FTU), alcalinidad de 40 mg CaCO<sub>3</sub>/l, pH inicial de 7,5 y temperatura de 25 °C que reporta di Bernardo (di Bernardo 2005). Dentro de este mismo intervalo de pH, Spinelli reporta un valor óptimo de pH de coagulación de 6,86 para clarificar agua de río con 30 UC de color aparente, 8,13 FTU de turbidez, alcalinidad de 12 mg/l de CaCO<sub>3</sub>, un pH inicial de 6,8 y una temperatura de 23 °C (Spinelli 2001).

### Comparación de la efectividad del sulfato de aluminio para el tratamiento de agua artificial semejando la calidad del agua de río de la época lluviosa de 2008

Si se compara la muestra de agua artificial con la de río del primer muestreo de la época lluviosa de 2008, la dureza y la alcalinidad del agua artificial tuvieron una concentración tres veces superior a la del agua de río. Con relación a la del segundo muestreo, la alcalinidad es comparable a la del río mientras que la dureza es casi 5 veces superior, véase el Cuadro 4 siguiente. Por lo tanto, la comparación de parámetros óptimos de las pruebas de jarras se realizó con la muestra de río del segundo muestreo. Puede apreciarse una similitud en las dosis de sulfato de aluminio óptimas obtenidas para ambos tipos de agua a pesar que la dureza del agua artificial fue significativamente superior a la del río (véanse además las Figuras 6 y 12 de donde se obtuvieron los datos del cuadro 4).

Cuadro 4: Comparación de la calidad del agua cruda y tratada y de la efectividad del  $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$  para clarificar el color en muestras de agua de río y agua modelo, aplicando floculante aniónico a una dosis similar

Parámetros de calidad del agua	Muestra sin tratar		Muestra tratada	
	Agua de río (a)	Agua modelo	Agua de río	Agua modelo
pH	7,27	7,55	6,79	6,73
Turbidez (FTU)	9	12	1	0
Color aparente (UC)	87	105	0	0
Alcalinidad (mg/l)	20,9	13,0	NC	NC
Dureza (mg/l)	8,97	43,5	NC	NC
Temperatura (°C)	23,5	21,1	NC	NC
<b>Parámetros óptimos de clarificación</b>	<b>Agua de río (b)</b>		<b>Agua modelo (c)</b>	
<b>Dosis de <math>\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3</math> (mg/l)</b>	<b>10</b>		<b>8,0</b>	
Dosis de floculante aniónico (mg/l)	0,60		0,60	
pH previo a la floculación	6,55		6,55	

(a) del segundo muestreo (b) datos tomados del la Figura 6 (c) datos tomados de la Figura 12  
NC = no cuantificado

#### 4.1.2 Comparación de la efectividad del floculante catiónico con el floculante aniónico para la clarificación del color en agua artificial

##### 4.1.2.1 Agua artificial

El floculante aniónico empleado como floculante mostró en general mejor calidad en los flóculos formados en comparación con el polímero catiónico. Por otro lado, se requirió una dosis 5 veces mayor del floculante catiónico (3,00 mg/l) para conseguir un color residual comparable y cercano a 1 UC, como se aprecia del Cuadro 5. De esta comparación se debe mencionar que el pH previo a la floculación no fue el mismo y que se desconocen las concentraciones de alcalinidad y dureza para el agua donde se aplicó el floculante catiónico. Se recomienda cuantificar el carbono orgánico total (TOC) de los mejores tratamientos dado que se esperaría un mayor TOC remanente al aumentar la dosis requerida del floculante catiónico, manteniéndose similares las dosis de sulfato de aluminio.

Cuadro 5: Comparación de la calidad del agua artificial cruda y tratada aplicando dos tipos de floculantes, para clarificar el color añadiendo sulfato de aluminio en dosis semejantes.

Parámetros de calidad del agua	Muestra de agua sin tratar para añadirle polímero		Muestra de agua tratada con polímero	
	Aniónico (a)	Catiónico (b)	Aniónico (a)	Catiónico (b)
pH	7,55	7,23	6,73	NC
Turbidez (FTU)	12	14	0	2
Color aparente (UC)	105	105	0	1
Alcalinidad (mg/l)	13,0	NC	NC	NC
Dureza (mg/l)	43,5	NC	NC	NC
Temperatura (°C)	21,1	22-23	NC	NC
Parámetros óptimos de clarificación	Polímero aniónico		Polímero catiónico	
Dosis de $Al_2(SO_4)_3$ (mg/l)	8,0		10	
Dosis de floculante (mg/l)	<b>0,60</b>		<b>3,00</b>	
pH previo a la floculación	6,55		7,23	
Calidad del flóculo	NC		6	

(a) datos tomados del la Figura 6      (b) datos tomados de las Figuras 13 y 14  
 NC = no cuantificado

#### 4.1.2.2 Agua de río

La muestra de agua de la época seca (véase Cuadro 1) mostró valores de alcalinidad (< 6 mg/l), dureza (3,86 mg/l), ión amonio (< 0,5 mg/l) y turbidez (11 FTU) muy bajos, lo cual se reflejó en una muy baja conductividad (valor inferior a 10  $\mu$ S), mientras que el color aparente fue elevado (142 UC). En cuanto a factores que afectan el proceso de coagulación, Arboleda señala que las aguas de más difícil coagulación son las que tienen baja concentración de coloides (turbiedades menores a 20 FTU), en tanto que la superficie de los últimos, donde pueden adsorberse las moléculas del color, disminuye, requiriendo mayores dosis de coagulantes. Por ejemplo, un color de 100 UC, se puede remover en un 90 % en presencia de 27-30 UNT (FTU) de turbiedad con dosis entre 10 y 20 mg/l de  $Al_2(SO_4)_3 \cdot 14 H_2O$ . Sin turbiedad, las dosis son superiores a 20 mg/l dependiendo del pH. A su vez, la baja concentración de iones  $Ca^{2+}$  y  $Mg^{2+}$ , dificultan la coagulación del color, porque disminuye la desestabilización de los coloides que evita la compresión de la doble capa y aumenta las fuerzas repulsivas entre las partículas coloidales, aumentando la intensidad de la barrera de energía (Arboleda 2000) lo que resulta en dosis mayores de coagulante (O'Melia 1999).

La demanda química de oxígeno de las muestras tratadas y filtradas son un reflejo de la materia oxidable (orgánica o inorgánica) con tamaño de partícula inferior a 1,6  $\mu$ m. La tendencia en los valores de DQO observados fue congruente con relación al color

verdadero remanente (ver Figuras 21 y 22), esto es, que mientras mayor fue la intensidad del color remanente, mayor fue el DQO. El valor mínimo de DQO obtenido fue 60 mg/l y correspondió a la mínima dosis aplicada de floculante; este valor de DQO fue relativamente alto considerando que esa contribución de materia oxidable y soluble pudo provenir de materia orgánica incolora que no fue removida por la coagulación. Esto representaría una fuente probable de formación de trihalometanos por efecto de la cloración posterior del agua. Por tanto, se recomienda cuantificar el TOC y absorbancia a 254 nm para futuros ensayos.

## **4.2. Evaluación de la *Moringa oleifera* para el tratamiento de agua de río y agua artificial**

En la mayor parte de la literatura consultada las disoluciones de moringa han sido utilizadas, principalmente, para clarificar la turbidez, la dureza y bacterias fecales ya fuera mediante una simple extracción acuosa (Muyibi y Evison 1995, Muyibi y Evison 1995a, Ndabigengesere et al., Jahn S 1988, Raveendra B y Chaudhuri M 2005) o mediante una extracción acuosa salina (Okuda T et al. 2001, Okuda T et al. 2001a), no obstante, para remover el color en aguas de consumo humano no se ha obtenido hasta el momento ninguna referencia salvo el empleo de extracciones acuosas salinas para clarificar el color de aguas residuales de destilerías (Prasad K 2009).

### **4.2.1 Evaluación de la moringa como coagulante**

#### **4.2.1.1 Agua de río**

La capacidad coagulante de las disoluciones de *Moringa oleifera* para remover el color en las muestras de río tuvieron eficiencias inferiores al 50 %, ya fuera con o sin el floculante aniónico, mientras que los blancos mostraron eficiencias inferiores al 26 %. Los resultados se observan en las Figuras 23 y 25 donde el agua presentó turbidez (56 FTU) y color (426-438 UC) elevados. En esas figuras se aprecia que el color aparente residual para los mejores tratamientos fue superior a las 200 unidades. Para el resto de los ensayos la capacidad coagulante fue similar al blanco, es decir, no mostró ninguna actividad (véanse Cuadros MO-18 y MO-19 del Anexo). La única actividad coagulante encontrada puede explicarse con base a los altos valores de turbidez presentes que ayudaron a la formación de los flóculos. Dado que el floc de color es muy liviano y quebradizo y la presencia de turbiedad puede darle más peso y resistencia y favorece el proceso de sedimentación (Arboleda 2000). También se reporta la insuficiente capacidad que tienen los polielectrolitos (sintéticos o naturales) como únicos coagulantes en el proceso de clarificación del agua (Arboleda 2000). Este autor señala que a no ser que las dosis de polielectrolitos sean muy altas, la cantidad de cadenas poliméricas que puede adherirse a las partículas en un tiempo razonable (desde el punto de vista económico) y con los gradientes de velocidad usuales, no es suficiente y en consecuencia la coagulación se efectúa pobremente o no ocurre. Más aún, en esta investigación se ensayaron dosis tan altas como 1800 mg/l de moringa como único coagulante, pero, los bajos valores de turbidez, alcalinidad y dureza que caracterizaron en general a las muestras del río, fueron las causas de la ausencia de actividad coagulante (Ver Cuadro 51 del Anexo y Figuras 35 y 36 en sección de Resultados). Estos resultados son congruentes con lo que reporta Jahn donde se encontró que las

semillas de moringa fallaron en mejorar la calidad del agua del Nilo Azul con valores de turbidez iniciales de 3-10 FTU (Jahn 1988).

#### **4.2.1.2 Agua artificial**

Con base a los resultados anteriores fue necesario añadir turbidez y/o alcalinidad artificialmente al agua de río o de la cañería.

De la Figura 27 se observa que la remoción del color es satisfactoria considerando que se utilizaron dosis de moringa relativamente bajas (50-300 mg/l) en comparación con las dosis aplicadas posteriormente al agua de río con turbidez y alcalinidad artificial. El mejor tratamiento se obtuvo al aplicar 300 mg/l del coagulante con eficiencias de remoción de 62 y 77 % (Figura 28) para turbidez y color, respectivamente, dando valores residuales de 5 FTU y 27 UC. Sin embargo, no llegó al valor mínimo aceptable (20 UC) previo a la filtración. La calidad de los flóculos fue inferior a 6 según el índice de Willcomb (Arboleda 2000), donde en el mejor de los casos, la velocidad de sedimentación fue muy lenta. Esta lentitud se debe al tamaño pequeño de los flóculos formados y su baja densidad en comparación con los que se formaron a partir del coagulante metálico (Arboleda 2000). Según se aprecia de la Figura 29, la adición del polímero catiónico no ayudó la eficiencia de coagulación, más bien, la entorpeció.

El resultado mostrado en la Figura 30 se basó en una muestra de agua artificial con turbidez de 20 FTU y color de 148 UC. Dado que la turbidez inicial fue relativamente alta, como también lo fueron las dosis aplicadas de moringa a esas muestras, se hubiera esperado una mejor eficiencia en el color removido, sin embargo, la eficiencia fue inferior al 53 %. Con base a estos resultados, se decide adicionar 1,50 mg/l de CaO como alcalinizante en todas las jarras, aumentar el tiempo de decantación al doble (2 horas) y aumentar la dosis del coagulante hasta 1800 mg/l.

De las Figuras 31 y 32 se observa que a dosis inferiores a 800 mg/l, la coagulación resultó insuficiente, pero a dosis superiores la eficiencia de remoción de color fue mucho mejor. Por ejemplo, a una dosis de 1000 mg/l la remoción fue de un 73 % en comparación con un 39 % para esa misma dosis según se muestra en la Figura 30 (véase el Cuadro MBLH-12 del Anexo). A pesar de que se mejoró la efectividad, el color aparente residual no bajó de 42 UC. Posiblemente la velocidad de floculación fue demasiado alta (35 rpm), y aunque se aplicaron dosis mayores de coagulante, el color no disminuyó más, por lo que pudo ocurrir la redispersión de flóculos. Muyibi reporta que la formación de flóculos a partir de polielectrolitos naturales (se supone que como único coagulante) puede verse perturbada si la velocidad de floculación es de 60 rpm, y sobre este valor puede ocurrir redispersión (Muyibi 1995). Se demuestra que tampoco ocurre la reestabilización de los coloides (partículas que componen la turbidez) con el incremento de dosis superiores a 800 mg/l, ya que la turbidez residual permaneció por debajo de 10 FTU a partir de esa dosis (ver Figura 31) lo cual concuerda con lo que reporta Ndabigengesere al aplicar Moringa en agua con turbidez inicial muy alta (105 FTU), donde el mecanismo predominante de coagulación sugerido es de adsorción y de neutralización de cargas (Ndabigengesere et al. 1995).

## Agua de río con alcalinidad y turbidez adicional

Los resultados de prueba de jarras que a continuación se discuten se basaron en muestras de agua fluvial muy blanda ( $<4$  mg/l  $\text{CaCO}_3$ ), muy poco turbia (6 FTU), con muy baja alcalinidad ( $< 6$  mg/l  $\text{CaCO}_3$ ), un color de 55 a 60 UC y una conductividad inferior a  $0,1 \mu\text{S}/\text{cm}$ . Por esta condición, a pesar de las elevadas dosis aplicadas de moringa (hasta 1000 mg/l) y aunque las velocidades de agitación rápida y lenta se redujeran a 100 y 20 rpm, respectivamente, con la intención de favorecer la formación de los flóculos, no se observó ninguna actividad coagulante. Esto puede verse en la línea verde de las Figuras 35 y 36 y en el Cuadro 44 del Anexo. Estos resultados nuevamente concuerdan con lo que reporta Jahn para aguas muy claras (Jahn 1988) y con lo que se menciona en el apartado 4.2.1.1.

Seguidamente, al adicionar alcalinidad y turbidez a esa muestra de agua, se obtuvieron mejores rendimientos como se aprecia de las Figuras 33 y 34 y las líneas color rojo, rosado y azul en las Figuras 35 y 36. Se aprecia cómo la eficiencia aumenta con la alcalinidad y al aumentar la turbidez inicial hasta obtener un valor máximo de 89 % en la remoción del color con un color remanente de 16 UC (Figura 34) aplicando una dosis de 1200 mg/l. Aquí se observa uno de los mayores problemas prácticos en la remoción del color en aguas de baja turbidez, que es la inhabilidad de formar flóculos aceptables. En este caso, la disolución saturada de óxido de calcio que se añade (donde se asume que retiene cierta naturaleza particulada), provee sitios donde se induce la nucleación para el desarrollo de flóculos, y una vez ya presentes, estos flóculos actúan como sitios de adsorción para la materia orgánica natural soluble (NOM), que finalmente facilita la coagulación. Lo anterior también ocurre por el incremento de la turbidez, en concordancia con lo que encontraron Gregor y Eikebrokk (Gregor et al 1997) (Eikebrokk 1999).

El aumento en la turbidez inicial al adicionar disolución de caolín, incrementa consecuentemente el color aparente. Con base en el mejor de los tratamientos efectuados, el color aparente antes y después de añadir la disolución de caolín fue de 57 UC y 150 UC, respectivamente. Además, el agua tratada dio un color residual de 16 UC. De ahí que ese incremento en la capacidad coagulante obtenida supone un resultado muy optimista, en tanto que una parte considerable del color aparente fue de origen coloidal y no molecular y por tanto, su clarificación resultó más factible por ser de un mayor tamaño de partícula (Arboleda 2000). El hecho que siempre hubo color remanente después del tratamiento puede explicarse con base al efecto indicador que poseen los compuestos productores de color y que depende del pH final del agua (Arboleda 2000).

Se encontró que la reproducibilidad de los ensayos no fue buena como puede apreciarse de los Cuadros 49 y 53 del Apéndice, donde el mismo ensayo dio un rendimiento del 71 % para clarificar el color a la misma dosis de 1200 mg/l. Lo anterior puede explicarse considerando que distintas disoluciones de trabajo de moringa no poseían la misma capacidad coagulante por la variabilidad en la calidad de las semillas y en las etapas de su procesamiento para obtener la disolución de trabajo. Por ejemplo, se ha reportado que reportado que más del 80 por ciento del polvo sólido de las semillas permanece en el papel filtro (Ndabigengesere 1995). Adicionalmente, la descomposición microbiana

de las proteínas, que son las responsables de la actividad coagulante, justifica por qué se redujo considerablemente la capacidad clarificadora del color por parte de este material. Compárense los resultados de la Figura 27 donde a una dosis de 300 mg/l se obtuvo una eficiencia de remoción de color del 77 % contra los resultados de la Figura 36.

Una ventaja encontrada fue que a pesar de las grandes dosis de moringa aplicadas los pH residuales se encontraron dentro de lo que la norma permite para ese parámetro (MINSA 2005).

La necesidad de aplicar dosis tan altas de este coagulante natural supone necesariamente cargas muy altas de materia orgánica disuelta en el agua tratada y consecuentemente, representaría una fuente probable de formación de trihalometanos (THMs) por la cloración posterior del agua. Considerando la dosis de moringa que mostró el mejor resultado (1200 mg/l) en clarificar el color, si se extrapola esa cantidad a la que habría que añadir a un metro cúbico de agua a ser tratada, se necesitarían 6 litros de disolución de trabajo o un equivalente de 200 kg de núcleos de semillas. Estas cantidades son inmanejables por su elevada masa y representarían un gasto económico muy elevado.

#### **4.2.2. Evaluación de la moringa como floculante en agua artificial**

Como se observa de la Figura 38, la adición de moringa como floculante entorpeció la remoción del color cuando se compara con el tratamiento que solo utiliza sulfato de aluminio como único coagulante. Según la información suministrada por el personal de la Planta Potabilizadora de Tres Ríos, cuando el color aparente supera las 60 unidades de color, se aplica el floculante como ayudante del sulfato de aluminio (Sanabria 2009, comunicación personal). Considerando el tratamiento donde solo se aplicó el sulfato de aluminio, se aprecia que el color aparente inicial fue de 171 UC (Cuadro 60 del Anexo) sin embargo, la dosis óptima para clarificar color fue de 5,0 mg/l que es una dosis muy baja considerando ese color inicial. Esa excelente eficiencia encontrada respondió tanto por los niveles relativamente altos de dureza y alcalinidad del agua modelo (por el CaO adicional a la alcalinidad ya presente en el agua de cañería) como también por la turbidez; parte del color aparente se debió a partículas de caolín suspendido y no a color proveniente de ácidos húmicos.

La moringa se considera un polielectrolito catiónico, dado que su agente activo son proteínas solubles en agua que son dímeros catiónicos altamente cargados (Ndabigengesere et al. 1995). Por su peso molecular medio (13 kDa)- en comparación con los polielectrolitos aniónicos y neutros que presentan mayores pesos moleculares- su mecanismo de acción como puente intermolecular no es tan eficiente para producir flóculos más densos y de mayor tamaño, de ahí su pobre desempeño para reforzar las uniones entre los flóculos y aumentar el número de núcleos componentes de cada floc (Arboleda 2000). Un error metodológico pudo ser haber regulado el pH antes de añadir el floculante. Esta larga espera pudo provocar que todos los sitios de adsorción de la partícula a ser coagulada hayan sido ocupados por las especies cargadas del aluminio y de esta manera no quedaran sitios para que las cadenas poliméricas del floculante se adhirieran a las partículas coloidales (Arboleda 2000). Por otro lado, se observó que a una dosis de 25 mg/l del coagulante, se obtuvo la mejor clarificación del color aplicando 400 mg/l del floculante, no obstante, el color remanente (27 UC) no superó el límite máximo aceptable de 20 UC. Dosis de floculante mayores a la dosis óptima



incrementaron el color residual, lo que puede explicarse como un exceso de polímero que provocó la reestabilización del sistema coloidal, porque el polímero saturó las superficies coloidales sin dejar espacio para la formación de puentes entre las partículas (Picado 1984).

La dosis de 200 mg/l de floculante fue insuficiente con todas las dosificaciones del coagulante añadido, lo que implica que se hubiera requerido aplicar una dosis de SA superior a 25 mg/l para lograr un color residual inferior a 20 UC.

Se aprecia de las Figuras 37 y 38 que los tratamientos con moringa como floculante mostraron una tendencia similar en los valores de turbidez y color remanentes, esto es, que mínimos valores de turbidez residuales se obtuvieron a dosis de floculante similares a los que se obtuvieron los mínimos valores de color residuales.

### **4.3 Evaluación del quitosano para el tratamiento de agua artificial y de río**

#### **4.3.1 Agua artificial**

En la muestra de agua artificial la mejor clarificación se logró a una dosis de 1,5 mg/l tanto para la turbidez como para el color, como se aprecia de la Figura 39. Esta condición se da a un pH de coagulación de 6,39 (véase Cuadro 32 del Apéndice). La turbidez remanente fue aceptable (5 FTU) con una remoción del 55 %, no así para el color remanente (50 UC) con una remoción del 53 %. El valor de pH del mejor tratamiento coincide con el que reporta Spinelli (6,35) que corresponde a las mejores remociones de color y turbidez para agua de río de baja turbidez (4,61 FTU) de color moderado (20 UC) y de baja alcalinidad (8,36 mg/L de CaCO<sub>3</sub>) (Spinelli 2001). La dosis óptima también coincide con la que reporta dicha autora (1,5 mg/L), que como prueba preliminar, dejó remociones de 51 % para turbidez (2,27 FTU turbidez remanente) y 65 % para el color (5 UC color remanente).

#### **4.3.2 Agua de río**

Según lo que se aprecia en las figuras 40 y 41 a una dosis de 2,5 mg/l de quitosano la turbidez y color residuales adquirieron valores mínimos independientemente de la dosis añadida de NaOH. Sin embargo, dado que la muestra de agua fue la misma para todas las pruebas y a que el color aparente inicial del agua disminuyó de 141 hasta 103 UC durante el lapso de los análisis, los datos anteriores se muestran como eficiencias porcentuales de remoción (figuras 42 y 43). De la Figura 40 se aprecia que a una dosis de 1,5 y 2,5 mg/l de quitosano la remoción de turbidez es total para un volumen de NaOH de 0,5 ml que correspondió a un pH de 4,48 y 4,22, respectivamente. Estos tratamientos sugieren que este quitosano no es un coagulante práctico en tanto que se requiere neutralizar un pH ácido. En los demás ensayos, la remoción de turbidez no superó el 40 por ciento. En lo que se refiere a la remoción del color, la figura 43 muestra eficiencias inferiores al 30 por ciento para todos los tratamientos. Los mejores tratamientos produjeron remociones entre 27 y 29 % con dosis de quitosano de 1,0 hasta

5,0 mg/l como se aprecia de la figura 43. Los valores de pH respectivos fueron desde 4,60 hasta 3,91 respectivamente.

Las propiedades fisicoquímicas del quitosano que se relacionan con la presencia de grupos funcionales amino (propiedades ácido-base, solubilidad, cationicidad) lo hacen ser muy eficiente para enlazarse a cationes metálicos y para interaccionar con solutos aniónicos en disolución ácida. Este mecanismo de atracción electrostática es responsable de la fuerte interacción que existe entre el quitosano y los tintes aniónicos (Guibal 2007) en analogía con las sustancias húmicas aniónicas de este estudio. Por lo anterior, puede explicarse que el bajo grado de desacetilación del quitosano empleado en este estudio (46 %), sea el responsable del casi nulo desempeño para remover el color del agua de río que junto con la adición de NaOH, como controlador del pH, posiblemente disminuyó la escasa dureza original en el agua (3,86 mg/l) reduciendo casi totalmente la capacidad coagulante del biopolímero (SMWW 2005). Por tal razón, se recomienda el empleo de cal (CaO) como alcalinizante en lugar de NaOH. En la literatura se ha encontrado que el quitosano es quitina con al menos un 50 por ciento de desacetilación (Bratskaya et al. 2004), por lo tanto, el biopolímero empleado en este estudio es quitina con un 46 % de desacetilación. En consecuencia, al haber menos grupos amino en la biomolécula hay menos contactos de atracción entre estos grupos funcionales y las moléculas con carga negativa causantes del color, reduciendo de esta forma la capacidad para desestabilizar los coloides. Lo anterior explica, además, el mejor desempeño del quitosano en agua del tubo con turbidez y color artificiales (sección anterior) en la cual, se supone, la dureza y alcalinidad fueron superiores a la de la muestra de agua de río.

#### ***4.4 Evaluación del mozote de caballo *Triumfetta semitriloba* para el tratamiento de agua artificial y de río***

##### **4.4.1 Evaluación del mozote como coagulante**

Hasta el momento no ha sido posible encontrar literatura donde se utilice el mozote como coagulante tanto para clarificar aguas para consumo humano tanto turbias como coloreadas.

##### **4.4.2 Evaluación del mozote como floculante**

###### **4.4.2.1 Agua artificial**

Los resultados obtenidos en las Figuras 44 y 45 muestran que se requirieron menores dosis de mozote para lograr un color aparente residual aceptable en comparación con las dosis aplicadas de moringa. Sin embargo, el blanco del ensayo donde solo se aplicó el coagulante, mostró una eficiencia de clarificación similar a los tratamientos con floculante; la única diferencia con el blanco fue en la menor calidad de los flóculos que estos presentaron (4 unidades) en comparación donde se aplicó mozote (8 a 10). La superior calidad de los flóculos que formó el mozote en comparación con los que formó el sulfato de aluminio solo, demuestra que este producto natural presentó mejor efectividad para unir flóculos de menor tamaño y formar conglomerados de mayor masa y tamaño y así facilitar la sedimentación. La facilidad con que se logra clarificar el color sin necesidad de un floculante se debe a las condiciones favorables de dureza, turbidez y

alcalinidad de la muestra del agua sintética. Los cationes divalentes  $\text{Ca}^{2+}$  y  $\text{Mg}^{2+}$  ayudan a desestabilizar los coloides al comprimir la doble capa y reducir las fuerzas de repulsión eléctricas existentes entre las partículas coloidales, disminuyendo la barrera de energía, por lo cual las partículas pueden acercarse entre ellas lo suficiente para ser desestabilizadas por efecto de la fuerza atractiva de van Der Waals (Arboleda 2000, Picado 1984).

Se demuestra que no ocurre la reestabilización de los coloides para dosis de mozote superiores a 200 mg/l, en tanto que el color y la turbidez se mantienen en valores inferiores a 10 UC y 2 FTU, respectivamente, en concordancia a lo reportado por Ndabigengesere al utilizar moringa en el tratamiento de agua para consumo humano (Ndabigengesere et al. 1995).

#### Agua de río con CaO añadido artificialmente

Al ensayar el mozote en agua de río con una dosis mayor de sulfato de aluminio (12 mg/l), se observó una diferencia significativa entre el blanco (sin floculante o 0 mg/l) y los tratamientos (Figura 46). Para dosis del floculante superiores a los 400 mg/l, las remociones fueron superiores al 80 %, tanto para turbidez como para color. A partir de 600 mg/l del floculante, la remoción fue superior al 90 por ciento para ambos parámetros, mejorando también la calidad del flóculo. Se observó la duplicación del DQO soluble al aumentar la dosis de floculante de 600 mg/l hasta 1000 mg/l, por lo que dosis superiores a 600 mg/l no son recomendables por el aporte de materia orgánica disuelta al agua.

### ***4.5 Evaluación de la tuna *Cactus lefaria* para el tratamiento de agua de río y agua artificial***

#### **4.5.1 Evaluación de la tuna como coagulante**

##### **4.5.1.1 Agua de río con y sin alcalinidad artificial**

Se cree que la ausencia de actividad coagulante de la tuna se debió a que el agua del río fue de baja dureza, alcalinidad y turbidez. Se considera que esto sucedió debido a la relativamente baja densidad de carga que poseen las moléculas de este material, en comparación con las altas densidades de carga de los coagulantes inorgánicos.

##### **4.5.1.2 Agua artificial con alcalinidad adicional**

Se parte del hecho que el agua artificial presentó una mayor concentración de iones divalentes que junto con los iones  $\text{Ca}^{2+}$  añadidos artificialmente, favorecieron la desestabilización de los coloides causantes del color. Lo anterior favoreció la acción coagulante de las moléculas de las proteínas, que tienen carga positiva, y que están presentes en la disolución de la tuna. Se observó además, que a mayores dosis del

coagulante se restableció la estabilidad de los coloides formadores de la turbidez y el color, tal como se aprecia de la Figura 48. A bajas dosis se lograron eficiencias de casi un cien por ciento, tanto para la turbidez, como para el color (Figura 49). En comparación con lo que reporta la literatura donde se aplicaron disoluciones de tuna como coagulante único, en agua del tubo con turbidez semejante de 20 FTU con caolín, alcalinidad artificial de 0,53 mg/l de CaCO<sub>3</sub> y otras sales añadidas tales como KCl, MgCl y NaHCO<sub>3</sub>. Se reportaron dosis óptimas de tuna en el rango de 10 a 20 mg/l (Martínez *et al.* 2003) que fueron dosis inferiores a las encontradas en este estudio de 45 mg/l. Sin embargo, este autor únicamente reporta clarificación de turbidez que, por su mayor tamaño de partícula, necesita menores dosis de coagulante. Se recomienda aplicar la tuna en aguas con turbidez mayor, dado que ese mismo autor encontró que la eficiencia de la tuna para remover la turbidez se incrementó conforme la turbidez inicial era mayor.

## **4.5.2 Evaluación de la tuna como floculante**

### **4.5.2.1 Agua modelo con alcalinidad artificial**

De los resultados mostrados en las Figuras 50, 51 y 52, se muestra que a una dosis de floculante de 67 mg/l se obtuvo la máxima remoción de materia oxidable, dando una DQO de 21 mg/l. Esa dosis de tuna no concuerda con la dosis que provocó la mejor remoción de turbidez y color (22,5 mg/l). Por lo anterior, es prioridad escoger el tratamiento que logre la máxima reducción de materia oxidable en lugar de la máxima reducción de color o turbidez. Por otro lado, los tratamientos con floculante mejoran significativamente al tratamiento donde solo se aplicó sulfato de aluminio, como lo demuestran los parámetros de DQO, turbidez y color residuales.

### **4.5.2.2 Agua de río con alcalinidad artificial**

Los datos mostrados en las Figuras 53, 54 y 55, indican mejores remociones de color y turbidez que se obtienen al aumentar la dosis del floculante, sin embargo, no logran reducir la materia oxidable soluble remanente, sino que la incrementan como tendencia general.

## **4.6 Evaluación del floculante catiónico KF-930-S como ayudante de coagulación del sulfato de aluminio en agua artificial para su comparación con los floculantes naturales**

De los resultados mostrados en las Figuras 56, 57 y 58 se encuentra que el parámetro que mejor representa la eficiencia de la clarificación del color en el agua es la demanda química de oxígeno cuantificada para los mejores tratamientos. Se observa que, la dosis de floculante de 1 mg/l resultó insuficiente para todas las dosis de coagulante aplicadas. Al aplicar una dosis de 3 mg/l del floculante, el color aparente residual tuvo valores aceptables a partir de dosis del coagulante de 10 mg/l, sin embargo, los valores de DQO del agua tratada fueron muy altos (superiores a 100 mg/l). El mejor tratamiento

encontrado fue al aplicar 2 mg/l del floculante y una dosis de 20 mg/l del coagulante que proporcionó una DQO de 10,3 mg/l. Basándose en los valores de DQO, la dosificación del floculante catiónico es un paso importante en el proceso de potabilización, en tanto que un exceso de este provoca un aumento significativo de la materia oxidable. Para lograr reducir al máximo la cantidad de materia oxidable soluble en el agua tratada, se debe aplicar una mayor dosis de sulfato de aluminio, de esta manera se reduce la dosis de floculante.

#### ***4.7 Comparación del desempeño del sulfato de aluminio con los productos naturales utilizados como coagulantes en agua artificial***

Del Cuadro 2 se aprecian los parámetros de calidad para los mejores tratamientos al aplicar distintos tipos de coagulantes. Considerando las características del agua cruda, los datos son comparables para todos los materiales excepto para el quitosano. El coagulante que logró la mejor remoción del color y de la turbidez fue la tuna seguido del tratamiento convencional con sulfato de aluminio y el polímero catiónico. No obstante, la DQO del agua filtrada al aplicar la tuna fue el doble (21 mg/l) en comparación con la obtenida por el tratamiento convencional (10,3 mg/l). Lo anterior demuestra que la extracción acuosa de tuna contiene compuestos solubles en agua que no poseen propiedades coagulantes que incrementan la demanda química de oxígeno del agua tratada, a pesar de mostrar valores muy bajos de turbidez (0 FTU) y color aparente (9 UC) residuales comparados con el tratamiento con SA. Por lo anterior, ninguno de los productos naturales ensayados como coagulantes superó la eficiencia para clarificar el color y de disminuir la materia oxidable del agua tratada comparada con la que presentó el sulfato de aluminio con el floculante catiónico sintético. Se observa que la dosis óptima de moringa supera casi 27 veces la de la tuna y 60 veces la del SA como consecuencia de la descomposición microbiana de las semillas.

#### ***4.8 Comparación del desempeño de los floculantes naturales con el floculante catiónico KF-930-S***

Del Cuadro 3 se aprecia la calidad del agua tratada para los mejores tratamientos al aplicar tres distintos floculantes naturales y el catiónico sintético. En todos los casos se adicionó una dosis de 1,5 mg/l de alcalinizante CaO para que los datos fueran comparables. De estos resultados se aprecia que el producto natural que logró la mejor remoción de turbidez y color fue la tuna. La dosis aplicada de tuna (22,5 mg/l) fue casi veinte veces menor a la de moringa (400 mg/l) y casi treinta veces inferior a la de mozote (600 mg/l). La última comparación se refleja en la DQO soluble del agua tratada, donde el tratamiento con la tuna tuvo una DQO 50 % inferior (42 mg/l) a la del mozote (88 mg/l). Se encontró, no obstante, que los tratamientos donde se aplicó sulfato de aluminio solo o con el floculante sintético catiónico, mostraron los menores valores de DQO en el agua tratada, 32 mg/l y 10,3 mg/l, respectivamente. En similitud con los resultados obtenidos en el apartado, la extracción acuosa de tuna contiene compuestos solubles en agua que no poseen propiedades floculantes incrementando la DQO del agua tratada, a pesar de mostrar valores muy bajos de turbidez (1 FTU) y color aparente (6 UC) residuales. Por tanto, ninguno de los floculante naturales ensayados superó la eficiencia para clarificar el color y de disminuir la materia oxidable del agua tratada

comparada con la que presentó el sulfato de aluminio con el floculante catiónico sintético. También se demuestra que el tipo de coagulación ensayada no está dirigida a remover la materia orgánica disuelta, sino, para remover la turbidez y el color. Por lo anterior, se recomienda aplicar la coagulación controlada (*enhanced coagulation*) para evaluar si se mejora la reducción de la materia orgánica disuelta.

#### **4.9 Viabilidad técnica y económica de la utilización de floculantes/coagulantes naturales para el tratamiento de aguas para consumo humano.**

El material natural, como materia prima sufrió importante descomposición, por ejemplo, el mozote y la tuna se podían almacenar por una semana en refrigeración, las semillas de moringa se conservaban no más de un mes en desecador, esto genera una importante limitación de disponibilidad del material.

Durante la realización de las diferentes pruebas de laboratorio se determinó que las disoluciones de los productos naturales disminuían la actividad coagulante/floculante, durante el tiempo, esto se presentó principalmente con la moringa. La estabilidad de las disoluciones preparadas son un importante aspecto a considerar cuando se trata de escalamiento de procesos, en donde se preparan importantes volúmenes de disoluciones que se utilizan a lo largo de un proceso continuo.

Todos los materiales naturales presentaron un incremento de la DQO en comparación con los materiales sintéticos utilizados convencionalmente, por lo cual los hace técnicamente no viables, principalmente por el tipo de sistema de desinfección que se utiliza en nuestro país, el cual se realiza por medio de la cloración del agua, existiendo la posibilidad de generar subproductos nocivos para la salud de las personas.

La viabilidad económica no se realizó puesto que carece de sentido la valoración de la misma si los materiales no son técnicamente utilizables, bajo las tecnologías actuales de tratamiento en nuestro país.

## 5. Conclusiones y Recomendaciones

En el tratamiento de agua de río el producto natural que presentó la mejor remoción de color, al ser evaluado como coagulante único, fue el quitosano con un 30% de eficiencia, comparado con el tratamiento convencional con sulfato de aluminio y floculante catiónico que reportó un 89 % de eficiencia con una DQO del agua tratada de 60 mg/l.

En el tratamiento de agua artificial (agua del tubo con caolín, ácidos húmicos y CaO) el producto natural que presentó la mejor remoción de color, al ser evaluado como coagulante único, fue la tuna con una eficiencia del 94% dejando un valor de DQO del agua tratada de 21 mg/l, en comparación con el tratamiento convencional con sulfato de aluminio y floculante catiónico que obtuvo un 89% de remoción y una DQO final de 10,3 mg/l. La moringa mostró una actividad coagulante del 89% cuando el agua presentó una turbidez superior a 20 FTU.

El producto natural que mostró la mejor remoción de color, al ser evaluado como floculante en agua artificial, fue la tuna con un 96% de eficiencia mostrando una DQO del agua tratada de 42 mg/L, en comparación con el tratamiento convencional con el polímero catiónico KF-930-S que mostró una eficiencia del 89% y una DQO final de 10,3 mg/L.

Los productos naturales moringa, mozote, tuna y quitosano no son sustituibles por los productos comerciales sulfato de aluminio o el floculante catiónico KF-930-S en su desempeño como coagulantes o floculantes en agua del Río Humo o agua artificial.

La remoción de color requirió siempre dosis de los coagulantes naturales mayores que las encontradas para remover la turbidez a los límites máximos permisibles, siempre que el color mostrara valores altos en comparación con los de turbidez.

Debido a la descomposición microbiológica de las semillas de moringa, se recomienda utilizar las semillas con no más de un mes de adquiridas. El adecuado empleo de las semillas de *Moringa oleifera* en el tratamiento de agua potable en Costa Rica tendría la desventaja de no tener un suministro permanente y rápido de las semillas, lo que consecuentemente lo hace una alternativa no viable. Por lo anterior, se recomienda evaluar el cultivo de plantas de moringa en el territorio nacional para su posterior evaluación en el tratamiento del agua potable.

Evaluar la posibilidad de complementar las dosis del coagulante y floculante convencionales con dosis de productos naturales, con la intención de disminuir el empleo de los primeros.

Se recomienda realizar extracciones de los productos naturales con la intención de obtener los agentes activos coagulantes y de esta manera evaluar su capacidad de clarificar aguas para consumo humano, disminuyendo de esta manera la carga de materia orgánica disuelta, que no tiene propiedades coagulantes, en el agua tratada.

Se recomienda cuantificar la cantidad de materia orgánica disuelta en el agua tratada para la cual se aconseja la determinación del carbono orgánico total y la absorción UV a

254 nm para obtener el SUVA (absorbancia ultravioleta específica) como un indicador operacional de la naturaleza del NOM y de la efectividad de la coagulación en la remoción de NOM, DOC y precursores de los sub-productos de desinfección.

El segundo objetivo específico de esta investigación no fue llevada a cabo dado que todos los productos naturales evaluados mostraron una mayor DQO del agua tratada con relación a la DQO obtenida por el tratamiento convencional. Lo anterior supone que el agua tratada con cualquiera de los productos naturales tendría necesariamente un contenido superior de materia orgánica soluble comparado con al tratamiento convencional, y por esa razón, se decidió no aplicar el tratamiento con productos naturales a nivel piloto para evitar el riesgo de formación de productos secundarios de desinfección en el agua de consumo humano.

El tercer objetivo específico se encuentra muy ligado al segundo objetivo, el cual no se ejecutó por las razones expuestas en Documento 2.



## 6. Referencias

1. Arboleda J (2000) Teoría y práctica de la purificación del agua. Tomo 1. McGraw Hill, Bogotá, pp 46
2. Bratskaya B, Schwartz S y Chervonetsky D (2004) Comparative study of humic acids flocculation with chitosan hydrochloride and chitosan glutamate, *Wat. Res.* 38, 2955-2961
3. CEPIS Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente (1975) Polímeros naturales y su aplicación como ayudantes de floculación, Lima, Perú
4. Di Bernardo L y Di Bernardo D (2005) Metodos e Técnicas de tratamento de água. Vol 1. 2 Edição, Rima Editora, São Carlos, SP. Brasil, pp 202-215
5. Domany Z, Galambos I, Vatai G, Bekassy-Molnar E (2002) Humic substances removal from drinking water by membrane filtration, *Desalination* 145, 333-337
6. Droppo I, Exall k y Stafford K (2008) Effects of chemical amendments on aquatic flocs structure, settling and strength. *Wat. Res.* 42: 169-179
7. Eikebrokk B (1999) Coagulation-direct filtration of soft, low alkalinity humic waters, *Wat. Sci. Tech.* 40: 9, 55-62
8. Engineering and Design - Precipitation/Coagulation/Flocculation (2001) <http://140.194.76.129/publications/eng-manuals/em1110-1-4012/toc.htm>
9. Gregor J, Nokes C y Fenton E (1997) Optimising natural organic matter removal from low turbidity waters by controlled pH adjustment of aluminium coagulation, *Wat. Res.* 31: 12, 2949-2958
10. Guibal E y Roussy J (2007) Coagulation and flocculation of the dye-containing solutions using a biopolymer (Chitosan), *Reactive and functional Polymers*, 67: 33-42
11. Guibal E, van Vooren M, Dempsey B y Roussy J (2006) A Review of the Use of Chitosan for the Removal of Particulate and dissolved Contaminants, *Separation Science and Technology*, 41: 2487-2514
12. Gutiérrez F (2009, martes 28 de abril) ICE recupera capacidad de embalse Río Macho. *La Nación*.
13. Jahn S (1988) Using *Moringa* Seeds as Coagulants in Developing Countries, *J. Am. Wat. Wks Ass.* (6), 43-45
14. Martínez D, Chávez M, Díaz A, Chacín E y Fernández N (2003) Eficiencia del *cactus lefaria* para su uso como coagulante en la clarificación de aguas, *Rev. Téc. Ing. Univ. Zulia*, 26, 1

15. MINSA (2005) Compendio de Reglamentos para la calidad del Agua Potable, Volumen II, pp. 1-11
16. Montero G (2008) Comunicación personal, Planta de Tratamiento de Agua, Tres Ríos, Instituto Costarricense de Acueducto y Alcantarillado
17. Montero G (2009) Comunicación personal, Planta de Tratamiento de Agua, Tres Ríos, Instituto Costarricense de Acueducto y Alcantarillado
18. Mora Molina J, (2007) Instituto Tecnológico de Costa Rica, comunicación personal.
19. Muyibi S y Evison L (1995) Optimizing physical parameters affecting coagulation of turbid water with *Moringa Oleifera* seeds, Wat. Res. 29, 12, 2689-2695
20. Muyibi S y Evison L (1995a) *Moringa oleifera* seeds for softening hardwater, Wat. Res. 29, 4 1099-1105
21. Ndabigengesere A, Narasiah K y Talbot B (1995) Active agents and mechanism of coagulation of turbid waters using *Moringa oleifera*, Wat. Res. 29, 2, 703-710
22. O'Melia C, Becker W and Au K (1999) Removal of humic substances by coagulation, Wat Sci Tech 40 (9) 47-54
23. Okuda T, Baes A, Nishijima W y Okada M (2001) Coagulation mechanism of salt solution-extracted active component in *Moringa oleifera* seeds, Wat. Res. 35, 3, 830-834
24. Okuda T, Baes A, Nishijima W y Okada M (2001a) Isolation and characterization of coagulant extracted from *Moringa oleifera* seeds by salt solution, Wat. Res. 35, 2, 405-410
25. Peña M (2008) Planta de Río Macho, Instituto Costarricense de Electricidad, comunicación personal
26. Picado L (1984) Aplicación de polímeros naturales al tratamiento de potabilización del agua, Informe del Proyecto Final de Graduación, Universidad de Costa Rica, Costa Rica
27. Prasad K (2009) Color removal from distillery spent wash through coagulation using *Moringa oleifera* seeds: Use of optimum response surface methodology, J. of Hazardous Materials, 165, 804-811
28. Raveendra B y Chaudhuri M (2005) Homewater treatment by direct filtration with natural coagulant, Journal of Water and Health 3, 1, 27-30
29. Ruiz R (1991) Identificación y remoción de color orgánico en las aguas de consumo humano. Tesis, Escuela de Química Universidad de Costa Rica

30. Ruiz R (2009) Comunicación personal
31. Sanabria C (2009) Comunicación personal, Planta Potabilizadora, Tres Ríos, ICAA
32. Sapporo City Institute of Public Health. 2003. Jar Test Procedure
33. Spinneli V (2001) Quitosana, polielectrolito natural para o tratamento de água potable, Tesis de Maestría, Universidad de Santa Catarina, Brasil
34. (SMWW) (2005) Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater 21 ed. USA: APHA, AWWA WEP, American Public Health Association 5-64 hasta 5-68
35. Van Breemen, A. N. (2001) Water Treatment 1 Conventional and Advance Treatment methods, International Institute for Infrastructural, Hydraulic and Environmental Engineering, Holanda
36. Vargas M y Romero L (2007) Desarrollo de coagulantes y floculantes para el tratamiento de aguas en países en desarrollo, Informe a la Vicerrectoría de Investigación, Instituto Tecnológico de Costa Rica,