

**ALMIDÓN EXTRAÍDO DE LA YUCA (*MANIHOT ESCULENTA CRANTZ*) COMO
COAGULANTE ALTERNATIVO PARA TRATAMIENTO DEL AGUA DE LA
QUEBRADA YAMUESQUER MUNICIPIO DE POTOSI**

**GABRIELA CABRERA LARA
JAVIER EDUARDO RAMIREZ MOSQUERA**

**UNIVERSIDAD DE NARIÑO
FACULTAD DE INGENIERIA
PROGRAMA DE INGENIERIA CIVIL
SAN JUAN DE PASTO
2014**

**ALMIDÓN EXTRAÍDO DE LA YUCA (*MANIHOT ESCULENTA CRANTZ*) COMO
COAGULANTE ALTERNATIVO PARA TRATAMIENTO DEL AGUA DE LA
QUEBRADA YAMUESQUER MUNICIPIO DE POTOSI**

**GABRIELA CABRERA LARA
JAVIER EDUARDO RAMIREZ MOSQUERA**

**Trabajo de grado presentado como requisito para optar al título de
Ingeniero Civil**

**Director
JAIME EFREN INSUASTY ENRIQUEZ
Ingeniero Civil**

**UNIVERSIDAD DE NARIÑO
FACULTAD DE INGENIERIA
PROGRAMA DE INGENIERIA CIVIL
SAN JUAN DE PASTO
2014**

NOTA DE RESPONSABILIDAD

Las ideas aportadas en el trabajo de grado son responsabilidad exclusiva de los autores.

Artículo 1° acuerdo # 324 del 11 de Octubre de 1966 del Honorable Consejo Directivo de la Universidad de Nariño.

“La Universidad de Nariño no se hace responsable de las opiniones o resultados obtenidos en el presente trabajo y para su publicación priman las normas sobre el derecho de autor”

Artículo 13, Acuerdo N. 005 de 2010 emanado del Honorable Consejo Académico.

Nota de aceptación

Presidente del jurado

Jurado

Jurado

AGRADECIMIENTOS

A nuestras familias, por el apoyo incondicional que nos brindaron a lo largo de nuestra carrera.

A nuestro director de tesis Jaime Efrén Insuasty Enríquez, por la asesoría y acompañamiento durante la realización de este trabajo.

Al auxiliar de laboratorio de Hidráulica y Sanitaria de la Universidad de Nariño Roberto García Criollo, por su colaboración en el desarrollo de este trabajo.

Al encargado de la planta de tratamiento de agua potable del municipio de Potosí, Wilson Mora, por su colaboración en las visitas realizadas a las instalaciones de la planta.

Y a todos los que de alguna manera aportaron en la realización de este trabajo.

MUCHAS GRACIAS POR EL APOYO PARA EL CUMPLIMIENTO DE ESTA GRAN META.

DEDICATORIAS

A Dios que ha guiado mi camino y me ha permitido llegar a este momento tan especial, a ti mamá, mujer luchadora, por estar siempre a mi lado, a ti papá, que jamás olvidare, a ti Alejo, por ser el motor de mi vida y de mis sueños, a mis hermanos por apoyarme siempre, para todos ellos este logro.

Gabriela Cabrera Lara

A Dios por darme la bendición para lograr mis metas, por darme una familia emprendedora con deseos de superación, a mis padres Ignacio Eduardo Ramírez q.e.p.d y Ninfa Nelly Mosquera Lucero, a mis hermanas Genny y Rocio Ramírez Mosquera, quienes con su amor, comprensión y compañía son un pilar fundamental de mi vida brindándome su apoyo incondicional y el aliento para superarme. Quiero agradecer además, a mis profesores y compañeros que influyeron en mi formación académica, y a mis amigos por su constante apoyo durante la realización del trabajo de grado.

Javier Eduardo Ramírez Mosquera

RESUMEN

En esta investigación, se evalúa el uso de almidón extraído de la yuca (*Manihot Esculenta Crantz*) como coagulante natural alternativo para el tratamiento del agua de la quebrada Yamuesquer que abastece al municipio de Potosí-Nariño. El almidón es sometido a un proceso de gelatinización en frío mediante el uso de hidróxido de sodio (NaOH), también conocido como soda cáustica.

Mediante ensayos de simulación del proceso coagulación-floculación (Prueba de Jarras), se determina el potencial de coagulación del almidón de yuca, además, se evalúan los porcentajes de remoción de turbiedad y color por la acción del almidón de yuca como coagulante natural y del sulfato de aluminio como coagulante tradicional. El análisis se rige según la norma NTC 3903.

Inicialmente, se realiza un análisis del comportamiento de cada coagulante en condiciones iguales de concentración y dosificación, y se continúan los ensayos hasta definir una dosis de cada coagulante con la cual se obtenga un agua que cumpla con los requerimientos establecidos en el Decreto 1575 de 2007, con los resultados obtenidos se realiza una comparación de la eficiencia alcanzada con cada coagulante.

ABSTRACT

The current research project presents an innovative proposal for the treatment of water to human consumption as a solution to the problem that presents “la quebrada Yamuesquer” which supplies the town of Potosí, Nariño. This proposal studies the use of the starch extracted from cassava as a natural coagulant for the treatment of such water. The starch is submitted to a cold gelatinization process using sodium hydroxide (NaOH) also known as caustic soda.

Conventional water treatment plants generally use aluminum or iron salts as coagulants to destabilize the colloidal particles present in untreated water, but very few water treatment plants use natural coagulants in their processes and unit operations. In most of the cases, the lack of use of natural coagulants is due to the lack of knowledge about the advantages and qualities of these natural products to destabilize the colloidal particles in the water and reduce high levels of color.

For achieving this purpose, it is necessary to develop simulation tests (jar test) to determine the efficiency of the coagulation and flocculation processes in terms of the removal of turbidity and color. The efficiency of the aluminum sulfate is compared to the efficiency of the starch extracted from cassava (*Manihot esculenta Crantz*) as an alternative natural coagulant. The analysis is ruled by the norm NTC 3903. The results obtained are compared in order to qualify the feasibility of this proposal.

CONTENIDO

	Pág.
INTRODUCCIÓN.....	16
1. MARCO REFERENCIAL.....	22
1.1 ESTADO DEL ARTE.....	22
1.2 MARCO TEÓRICO	23
1.2.1 Tratamiento de aguas.	23
1.2.2 Sustancias contaminantes presentes en el agua:	24
1.2.3 Coagulación.....	25
1.2.4 Factores que influyen en la coagulación:	29
1.2.5 Clases de coagulantes.....	29
1.2.6 Desventajas del uso de coagulantes químicos.....	30
1.2.7 Los coagulantes naturales.	30
1.2.8 Floculación.....	32
1.2.9 Gradiente de velocidad.	32
1.2.10 La yuca (<i>Manihot Esculenta Crantz</i>).....	33
1.2.11 El almidón.	35
1.2.12. El almidón de yuca.....	37
2. METODOLOGÍA	38
2.1 TIPO DE INVESTIGACIÓN.....	38
2.2 HIPÓTESIS Y VARIABLES.....	38
2.2.1 Hipótesis.	38
2.2.2 Variables:.....	38
2.3 EXTRACCIÓN DEL ALMIDÓN DE YUCA.....	39
2.4 CARACTERIZACIÓN DEL ALMIDÓN DE YUCA	40
2.4.1 Identificación del almidón (<i>Prueba de Lugol</i>).....	41
2.5 PREPARACIÓN DE LOS COAGULANTES	42
2.5.1 Preparación de la suspensión de almidón.....	42

2.5.2	Preparación de la solución de sulfato de aluminio.....	44
2.6	ENSAYO DE PRUEBA DE JARRAS (JAR-TEST)	45
2.6.1	Funcionamiento – procedimiento:	45
3.	DISCUSIÓN DE RESULTADOS	48
3.1	COMPORTAMIENTO DE LOS COAGULANTES	48
3.1.1	Evaluación del sulfato de aluminio en el rango optimo (35-45 mg/l).....	49
3.1.2	Porcentajes de remoción del sulfato de aluminio	51
3.1.3	Evaluación del comportamiento del almidón de yuca en el rango de 5 a 35 mg/l.	52
3.1.4	Evaluación del comportamiento del almidón de yuca en el rango de 2 a 12 mg/l.	54
3.1.5	Porcentajes de remoción del almidón de yuca.	56
3.2	COMPARACIÓN DE LA EFICIENCIA ALCANZADA CON CADA COAGULANTE	56
3.3	VARIACIÓN DEL PH.	57
4.	CONCLUSIONES	59
5.	RECOMENDACIONES	60
	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	61
	ANEXOS	63

LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. Gelatinización del almidón de yuca	44
Tabla 2. Resultados con sulfato de aluminio	57
Tabla 3. Resultados con almidón de yuca	57

LISTA DE CUADROS

	Pág.
Cuadro 1. Análisis de parámetros quebrada Yamuesquer año 2014, realizado en Laboratorios UDENAR.....	19
Cuadro 2. Estado del arte.....	22
Cuadro 3. Porcentaje de almidón, proteínas, fibras y ceniza de algunas fuentes de almidón.....	31
Cuadro 4. Caracterización del Almidón de yuca realizada en laboratorios UDENAR.	40
Cuadro 5. Índice de floculación de willcomb	46
Cuadro 6. Descripción del sobrenadante.....	46
Cuadro 7. Valores máximos admisibles de los parámetros de calidad del agua.....	47

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Esquema actual de la planta de tratamiento.	18
Figura 2. Fuerzas de atracción y repulsión	27
Figura 3. Yuca (Manihot Esculenta Crantz).....	34
Figura 4. Corte transversal de la raíz de yuca.....	35
Figura 5. Estructura molécula de amilosa	36
Figura 6. Estructura molécula de amilopectina.....	36
Figura 7. Diagrama del proceso general de extracción de almidon de yuca (nativo y agrio)	39
Figura 8. Calentamiento de solución de almidon.....	41
Figura 9. Adición de reactivo de Lugol a la solución de almidon.	42
Figura 10. Reacción positiva a la prueba de Lugol.....	42
Figura 11. Coagulantes.....	45
Figura 12. Comportamiento de los coagulantes en función de la turbiedad.	49
Figura 13. Comportamiento de los coagulantes en función del color.	49
Figura 14. Comportamiento en el rango óptimo de sulfato de aluminio en función de turbiedad.	50
Figura 15. Comportamiento en el rango óptimo de sulfato de aluminio en función del color.....	51
Figura 16. Porcentajes de remoción del sulfato de aluminio.	52
Figura 17. Comportamiento del almidón de yuca en función de la turbiedad (5 a 35 mg/l).....	53
Figura 18. Comportamiento del almidón de yuca en función del color (5 a 35 mg/l).....	53
Figura 19. Comportamiento del almidón de yuca en función de la turbiedad (2 a 12 mg/l).....	54

Figura 20. Comportamiento del almidón de yuca en función del color (2 a 12 mg/l).....	54
Figura 21. Comportamiento del almidón de yuca en función de la turbiedad (0.5 a 3.5 mg/l).....	55
Figura 22. Comportamiento del almidón de yuca en función del color (0.5 a 3.5 mg/l).....	55
Figura 23. Porcentajes de remocion del almidon de yuca .	56
Figura 24. Variacion del pH con sulfato de aluminio	58
Figura 25. Variacion del pH con almidon de yuca	58

LISTA DE ANEXOS

	Pág.
ANEXO A: CARACTERIZACIÓN FÍSICOQUÍMICA Y MICROBIOLÓGICA DEL AGUA DE LA QUEBRADA YAMUESQUER	64
ANEXO B: ABACO QUE RELACIONA GRADIENTE DE VELOCIDAD CON LAS REVOLUCIONES POR MINUTO DE UN EQUIPO DE PRUEBA DE JARRAS CON RECIPIENTES DE 2 LITROS. JARRAS DE SECCIÓN CIRCULAR.	68
ANEXO C. RESULTADOS ENSAYOS CON SULFATO DE ALUMINIO.	69
ANEXO D. RESULTADOS ENSAYOS CON ALMIDÓN DE YUCA.	72
ANEXO E. GLOSARIO	77
ANEXO F. REGISTRO FOTOGRÁFICO	79

INTRODUCCIÓN

“El agua denominada “potable”, debe ser aceptable desde el punto de vista estético, es decir, debe estar exenta de turbidez, color y sabor perceptibles, y debe tener una temperatura razonable. Las aguas naturales raramente son de calidad satisfactoria para el consumo humano o el uso industrial y casi siempre deben ser tratadas”.¹

Los tratamientos para la purificación de agua superficial son de suma importancia para la sociedad, ya que de estos depende la calidad del agua para consumo humano, doméstico y usos de diferente índole. Si los tratamientos se aplican de manera correcta, cada comunidad podría satisfacer un requerimiento esencial para la vida.

El tratamiento de potabilización convencional, comprende básicamente la clarificación del agua tras la captación mediante las etapas de coagulación-floculación, sedimentación, filtración y desinfección²; de los cuales la coagulación es considerada el proceso central y el más importante en el tratamiento convencional para producir agua potable, e incluye la utilización de productos químicos. “La coagulación se define como la adición de químicos y la provisión de mezcla para que las partículas y algunos contaminantes disueltos se agreguen en partículas más grandes que puedan retirarse mediante procesos de remoción de sólidos”.³

Los agentes convencionales utilizados en la coagulación-floculación son sales metálicas tales como el sulfato de aluminio $Al_2(SO_4)_3$, el cloruro férrico ($FeCl_3$) y el sulfato ferroso ($FeSO_4$), siendo el coagulante más utilizado el sulfato de aluminio. “Este compuesto al disociarse en agua, sufre una serie de reacciones con los iones alcalinos presentes en el agua, formando iones complejos, polímeros e hidróxido de aluminio insoluble, que pueden ser adsorbidos por las partículas coloidales suspendidas en el agua produciendo la desestabilización de las cargas y favoreciendo la sedimentación de las mismas”.⁴

¹ GUZMÁN, Luis; VILLABONA, Ángel; TEJADA, Candelaria & GARCÍA, Rafael. Reducción de la turbidez del agua usando coagulantes naturales: una revisión, rev.udcaactual.divulg.cient. vol.16 no.1 Bogotá: s.n., 2013.

² GARCÍA FAYOS, Beatriz. Metodología de extracción in situ de coagulantes natural para la clarificación de agua superficial. Aplicación en países en vías de desarrollo. Tesis de master, Pasto: UDENAR, 2007. p. 11.

³ CARRILLO GUZMÁN, Luis Enrique & PÉREZ GARCÍA, Rafael. Uso de coagulantes naturales para la remoción de color y turbidez en tratamiento de agua potable. Bogotá: s.n., 2012. p. 3.

⁴ SOLÍS SILVAN, Rudy, LAINES CANEPA, José Ramón & HERNÁNDEZ BARAJAS, José Roberto. Mezclas con potencial coagulante para clarificar aguas superficiales. Bogotá: s.n., 2012. p. 230.

La efectividad de estos químicos como coagulantes es bien reconocida. Sin embargo, hay desventajas asociadas con el uso de estos coagulantes, tales como su ineficiencia en agua a baja temperatura, altos costos de adquisición, producción de grandes volúmenes de lodo y el hecho de que afectan significativamente el pH del agua tratada.

Desde el punto de vista ambiental, se ha reportado que en análisis realizados a muestras de aguas potabilizadas se han encontrado trazas de sulfato de aluminio, lo que indica que el control en cuanto a la adición de esta sustancia no es apropiado, representando así un riesgo potencial para la salud humana⁵, debido a que existe una fuerte evidencia que asocia a los coagulantes a base de aluminio con el desarrollo de la enfermedad de Alzheimer en los seres humanos, por la presencia de aluminio residual en el agua tratada.

“El Fondo de Naciones Unidas para la Infancia indicó en un comunicado que la falta de agua potable, de un correcto saneamiento y de medidas de higiene adecuadas causa la muerte cada día de 1 400 niños menores de cinco años, principalmente por enfermedades diarreicas”.⁶

La solución a la problemática de la falta de acceso al agua potable, debe encaminarse al desarrollo de técnicas innovadoras, eficaces, sostenibles, económicas, fiables y fáciles de manejar, que sean socialmente aceptadas por la comunidad, y que permitan dotar de agua de calidad a la población mejorando así su situación sanitaria y condiciones de vida⁷. En los últimos años se ha tenido gran interés en el desarrollo del uso de coagulantes naturales, los cuales pueden ser producidos o extraídos a partir de microorganismos, tejidos de plantas o animales. Estos coagulantes son biodegradables y seguros para la salud humana.

El uso de coagulantes naturales para el tratamiento de aguas turbias con el fin de remover color y turbidez data de varios milenios y hasta ahora, los científicos medioambientales han podido identificar varios tipos de plantas para este propósito. “El empleo de materiales naturales puede minimizar o evitar la importación de los coagulantes químicos, reduciendo de manera significativa los costos de tratamiento si se dispone de ellos a nivel local”.⁸

Dentro de este contexto se estudia la viabilidad del uso de almidón extraído de la yuca como coagulante natural alternativo en el tratamiento de potabilización del agua de la quebrada Yamuesquer del municipio de Potosí (Nariño). Para determinar la dosis óptima de los agentes empleados en el proceso de

⁵ *Ibíd.*

⁶ CINARA. Instituto de investigación y desarrollo en abastecimiento de agua, saneamiento ambiental y conservación del recurso hídrico. Bogotá: Boletín de Noticias Agua & Saneamiento, Edición No. 112, octubre de 2013.

⁷ GARCÍA FAYOS, Op. Cit., p.4.

⁸ GUZMÁN, VILLABONA, TEJADA & GARCÍA, Op. Cit., p.4.

coagulación-floculación se utiliza un procedimiento de laboratorio conocido como la prueba de jarras.

ALCANCE Y DEFINICIÓN

Se proyecta obtener un agua que cumpla con los parámetros de calidad exigidos en normas, con tecnología limpia, el agua a analizar será tomada de la quebrada Yamuesquer municipio de Potosí-Nariño.

Para determinar la dosis de coagulante se usara un método estadístico, tomando una muestra piloto analizada en el ensayo de jarras, este procedimiento se repite variando las dosis del coagulante, tal que con los resultados obtenidos se determinen parámetros estadísticos que permitan definir la muestra con la dosis optima de coagulante a emplear para los propósitos de este trabajo.

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Descripción del problema:

Actualmente la planta de tratamiento de agua potable del Municipio de Potosí cuenta con un Sistema Múltiple por Etapas FIME del que hacen parte una cajilla de entrada, un canal de entrada, dos unidades de filtración gruesa ascendente , y dos unidades de filtración lentos descendentes (fig. 1). En la cajilla de entrada se encuentra una válvula de compuerta la cual permite el paso del agua hacia el canal de entrada de aproximadamente 14 m de longitud, ancho 0.6m y alto promedio 0.80m, este canal transporta el agua hacia los filtros gruesos ascendentes cuyas dimensiones internas son 4.4x4.4m y altura de 2.60m por unidad. El agua es recolectada en una cámara general que conduce el agua hacia los filtros lentos de flujo descendente que presentan unas dimensiones internas aproximadas de 9.45x9.40 y una altura de 2.65m. Posteriormente el agua es transportada por la línea de conducción de diámetro 4 pulgadas hacia el tanque de almacenamiento.

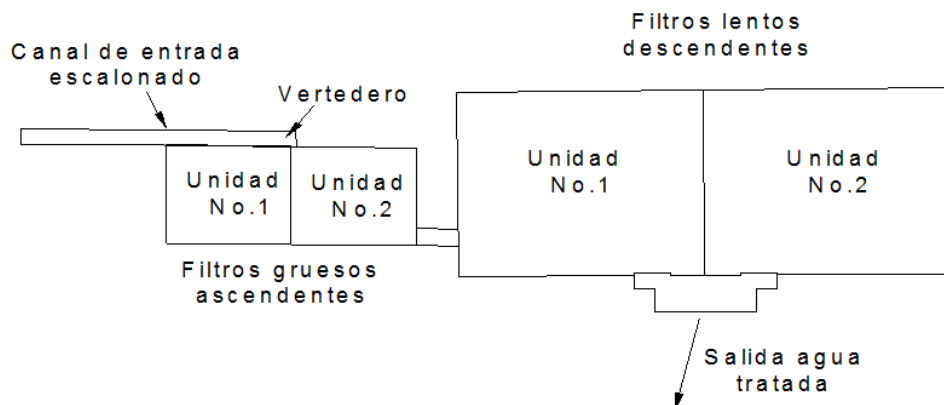


Figura 1. Esquema actual de la planta de tratamiento.

El sistema no contempla la adición de ningún tipo de coagulante y la remoción de la contaminación se efectúa por medio de la filtración. Este tipo de planta de tratamiento tipo FIME no es adecuada para tratar el agua con las características que posee. Además, su funcionamiento no es el mejor, pues en el agua que llega a los usuarios se identifica un color amarillento.

La presencia de color en el agua aunque no siempre sea nocivo para el consumo humano a simple vista, hace que esta sea rechazada o implique sospechas de presencia de agentes contaminantes en ella.

Análisis realizados en muestras tomadas en fechas al azar en puntos considerados de interés para evaluar las condiciones en las que el agua entra y se distribuye a la población, arrojaron los resultados consignados en el Cuadro No. 1.

Lo expuesto en el Cuadro No. 1, demuestra que el agua proveniente de la quebrada Yamuesquer presenta una grave problemática de color, pues presenta rangos de color desde 36.237 a 148.212 UPC, clasificándola así como una fuente muy deficiente.

Cuadro 1. Análisis de parámetros quebrada Yamuesquer año 2014, realizado en Laboratorios UDENAR.

Punto de Muestra	Fecha	Parámetro	Valor obtenido	Valor Max. Admisible
Entrada a la Planta	02/10/2014	Color	148.212	15
		Turbidez	3.6	2
Salida de la Planta	02/10/2014	Color	133.526	15
		Turbidez	1.85	2
Plaza Central	02/10/2014	Color	126,184	15
		Turbidez	3.7	2
Entrada a la Planta	09/10/2014	Color	120.677	15
		Turbidez	2.39	2
Salida de la Planta	09/10/2014	Color	113.334	15
		Turbidez	3.27	2
Plaza Central	09/10/2014	Color	36.237	15
		Turbidez	1.4	2

FORMULACIÓN DEL PROBLEMA

¿Cuál es la eficiencia del almidón extraído de la yuca (*Manihot Esculenta Crantz*) como coagulante alternativo para el tratamiento del agua de la quebrada Yamuesquer municipio de Potosí-Nariño?

JUSTIFICACIÓN

El agua potable es por excelencia el recurso de vital importancia que se necesita para sobrevivir, por tal razón, es imprescindible contar con plantas de potabilización de agua para el consumo humano, así como el constante estudio e investigación para optimizar los procesos que se requieren en una planta para obtener un producto de calidad, sin exceder en costos y velando por el bienestar de la población. Si bien es cierto que Colombia es un país en vía de desarrollo y los estudios tecnológicos no han logrado un gran avance para el mejoramiento del sistema de potabilización, el uso de plantas convencionales ha sido hasta el momento una buena opción a la hora de tratar las aguas superficiales para el servicio de la comunidad, teniendo como inconveniente en uno de los procesos de tratamiento, **la coagulación–floculación**, el uso de sulfato de aluminio para dicho proceso, este agente químico presenta dos principales problemas en su uso, el primero y más relevante es el hecho que estudios en los últimos años han demostrado la presencia de este agente de forma residual en el producto final causando serios problemas de salud, y el segundo y no menos importante, su costo de adquisición, lo que impide que poblaciones de bajos recursos económicos puedan disfrutar de plantas de tratamiento. Ensayos realizados en la ciudad de Sao Carlos S.P. con varios tipos de agua recolectada en una de las aducciones que alimentan la planta de tratamiento, entre ellas, un tipo de agua con las características similares a la del agua del presente estudio, donde se utilizó almidón proveniente de diversas fuentes (Araruta, Cará, Maíz, Papa y Yuca) como auxiliar de floculación, concluye:

“En algunos ensayos se comprobó que la utilización de almidón permitió la reducción de color del sobrenadante, en comparación con la remoción de color obtenida cuando éste no era usado como auxiliar”.⁹

Teniendo en cuenta las características microbiológicas y fisicoquímicas del agua de la quebrada Yamuesquer (Anexo A) que abastece la planta de tratamiento, la alcaldía municipal de potosí tiene proyectado una adecuación que contempla el siguiente tratamiento recomendado: Remoción del material flotante mediante cribado con rejillas, desarenación, coagulación, sedimentación, filtración rápida seguida de desinfección permanente. Se plantea entonces, la posibilidad del uso de almidón extraído de la yuca (*Manihot Esculenta Crantz*) como coagulante en el

⁹ CAMPOS, José Roberto & DI BERNARDO, Luis. Uso de polímeros naturales en el tratamiento de agua para abastecimiento. Bogotá: s.n., 1991. p. 56.

proceso de coagulación–floculación como una alternativa tanto económica como de tecnología limpia en el mejoramiento de la planta de tratamiento que tiene proyectado la administración municipal.

OBJETIVOS

Objetivo general:

Evaluar el potencial de coagulación del almidón extraído de la yuca (*Manihot Esculenta Crantz*), para la remoción de color y turbiedad en el tratamiento de agua de la quebrada Yamuesquer municipio de Potosí-Nariño.

Objetivos específicos:

- Determinar la dosis óptima del almidón extraído de la yuca (*Manihot Esculenta Crantz*) en el proceso de coagulación-Floculación mediante el ensayo de jarras.
- Determinar los niveles de remoción de color y turbidez por la acción de un almidón extraído de la yuca como coagulante natural.
- Comparar la eficiencia de remoción de partículas suspendidas utilizando almidón extraído de la yuca como coagulante natural con la eficiencia alcanzada con solamente sulfato de aluminio.

1. MARCO REFERENCIAL

1.1 ESTADO DEL ARTE

En el cuadro 2, se cita el estado de la temática actualmente y sus avances.

Cuadro 2. Estado del arte

AÑO	LUGAR	AUTOR	TITULO
2012	Tabasco MEXICO	Rudy SOLÍS SILVAN, José Ramón LAINES CANEPA* y José Roberto HERNÁNDEZ BARAJAS	Mezclas con potencial coagulante para clarificar aguas superficiales
2007	COLOMBIA	J.P. RODRIGUEZ M.,I.P.LUGO U.,A. V. ROJASC.,C. MALAVER C.	Evaluación del proceso de la coagulación para el diseño de una planta potabilizadora
2012	Cartagena COLOMBIA	Luis enrique GUZMÁN CARRILLO Rafael GARCÍA PÉREZ	Uso de coagulantes naturales para la remoción de color y turbidez en tratamiento de agua potable
1991	Valle del Cauca	José ROBERTO Luiz DI BERNARDO	Uso de polímeros naturales en el tratamiento de agua para abastecimiento. Cinara
1974	Lima	Cliff J, KIRCHMER Jorge A, ARBOLEDA VALENCIA María Luisa, CASTRO	Polímeros naturales y su aplicación como ayudantes de floculación. CEPIS

1.2 MARCO TEÓRICO

1.2.1 Tratamiento de aguas. Las comunidades colombianas se enfrentan hoy al reto de mejorar sus sistemas de potabilización de agua acorde con el Decreto 475 de 1998, en el cual se expiden normas técnicas de calidad del agua potable, el Decreto 1575 de 2007, en el cual se establece un sistema para la protección y control de la calidad del agua para consumo humano, así mismo, la resolución 2115 de 2007, por medio de la cual se señalan características, instrumentos básicos y frecuencias del sistema de control y vigilancia para la calidad del agua para consumo humano. Esta evolución en materia de legislación redefinió los valores admisibles a unos valores más restrictivos, en los cuales se debe mantener el agua para ser de alta calidad y para que no represente ningún daño para el ser humano.

“En la actualidad, el creciente interés por el tema ambiental y de salud pública, los estándares internacionales de calidad y medio ambiente ha motivado el surgimiento de nuevas normas que implican una evaluación de los procesos existentes de potabilización y una mayor exigencia ambiental a los nuevos proyectos”.¹⁰

La calidad del agua cruda varía grandemente de una fuente a otra; por lo tanto, el tipo de tratamiento requerido para producir agua potable también varía. Dependiendo de la calidad del agua cruda, el grado de complejidad del tratamiento es diferente.

Los tratamientos para potabilizar el agua, se pueden clasificar de acuerdo con:

- Los componentes o impurezas a eliminar.
- Parámetros de calidad
- Grados de tratamientos de agua

A continuación se hace un resumen de los tratamientos convencionales a los que se somete el agua para su potabilización:

- Cribado: remoción de desechos de gran tamaño que pueden obstruir los equipos.
- Pre-tratamiento químico: remoción de algas y elementos que causan sabor, color y olor.
- Pre-sedimentación: remoción de materiales fácilmente sedimentables.
- Aforo: medición del agua cruda a ser sometida a tratamiento.

¹⁰ RESTREPO OSORNO, Hernán Alonso. Evaluación del proceso de coagulación – floculación de una planta de tratamiento de agua potable. Bogotá: s.n., 2009.

- Aireación: remoción de olor y gases disueltos; adición de oxígeno para mejorar sabor.
- Coagulación/floculación: agregación de partículas en suspensión para promover su separación.
- Sedimentación: remoción de sólidos sedimentados.
- Ablandamiento: remoción de dureza debida
- Filtración: remoción de sólidos finos, floc en suspensión y la mayoría de los microorganismos.
- Adsorción: remoción de sustancias orgánicas y color.
- Estabilización: prevención de incrustaciones y corrosión.
- Fluoración: adición de flúor para prevenir caries.
- Desinfección: eliminación de patógenos.

“De los tratamientos mencionados anteriormente, la coagulación/floculación es el más importante y es un paso crítico en el proceso de tratamiento del agua, no sólo porque remueve las partículas responsables de la turbiedad en agua cruda producida por las partículas suspendidas y por el material coloidal, sino porque también remueve los microorganismos que a menudo se adhieren a las partículas”.¹¹

1.2.2 Sustancias contaminantes presentes en el agua:

Sólidos suspendidos: (mayores a 10⁻⁶ m) estos pueden ser de origen mineral (arena, arcillas etc.) u orgánicos (productos de la descomposición de plantas y animales, por ejemplo ácidos húmicos o fúlvicos). Además, microorganismos como bacterias plancton, algas y virus. Los sólidos suspendidos son responsables de la turbidez y el color del agua.¹²

Sustancias disueltas: (menores de 10⁻⁹ m) estas son usualmente sustancias inorgánicas como cationes y aniones y sustancias orgánicas como ácidos, alcoholes, aldehídos, etc. También puede haber gases presentes (oxígeno, dióxido de carbono, sulfuro de hidrógeno, etc.).¹³

Teoría de coloides: los coloides son suspensiones de partículas en un medio molecular. Para que estas suspensiones sean consideradas coloides, las partículas han de tener dimensiones en el intervalo 10³ µm - 10⁶ µm.¹⁴

¹¹ CARRILLO GUZMÁN, Luis Enrique & PÉREZ GARCÍA, Op. Cit., Pp. 7 – 8.

¹² VARGAS CAMARENO, M & ROMERO ESQUIVEL, L.G. Aprovechamiento de algunos materiales en el desarrollo de coagulantes y floculantes para el tratamiento de aguas en Costa Rica. P. 38.

¹³ *Ibíd.*

¹⁴ BAUTISTA MARTINEZ, Nancy Edith, DOMINGUEZ PEREYRA, Lorena & RODRIGUEZ SANCHEZ Lucia Zuleima. Glosario de términos comúnmente usados en procesos industriales de separación. Bogotá: s.n., 2012. p. 8

Existen varios términos para distinguir los tipos de sistemas coloidales. Para el tratamiento de agua, los más importantes son hidrofílico e hidrofóbico.

El calificativo hidrofóbico (fobia al agua) es impropio ya que si una sustancia repele completamente un medio potencial de dispersión no podría siquiera ser mojada y tampoco habría dispersión. Lo cierto es que las sustancias hidrofóbicas muestran una atracción considerablemente menor por el agua que las hidrofílicas. Los coloides hidrofóbicos son importantes en el tratamiento de agua e incluyen sustancias como arcillas y óxidos metálicos. Así mismo, son termodinámicamente inestables con respecto a la formación de grandes cristales no coloidales.

Los coloides hidrofílicos comprenden soluciones verdaderas ya sea de moléculas grandes o de agregados de moléculas pequeñas (llamados micelas), cuyas dimensiones están dentro de los límites coloidales. Abarcan varios polímeros sintéticos y naturales y numerosas sustancias de significación biológica como proteínas, ácidos nucleicos, almidones y otras macromoléculas. “Las diferencias de opinión entre los investigadores sobre la naturaleza del color orgánico en el agua-solución verdadera o coloide - pueden resolverse si se considera que el color orgánico es un coloide hidrofílico que consiste de moléculas grandes en solución. Las soluciones de coloides hidrofílicos y las moléculas más pequeñas difieren únicamente en que el gran tamaño de las moléculas o micelas conlleva propiedades y técnicas de estudio diferentes”.¹⁵

1.2.3 Coagulación. La coagulación puede entenderse como la desestabilización eléctrica de algunas partículas mediante la adición de sustancias químicas que son los coagulantes. Esta operación se efectúa en unidades y tanques de mezcla rápida, en los cuales el agua se somete a agitación muy intensa para formar una solución homogénea de los coagulantes con el agua en el menor tiempo posible. Este proceso se usa para:

- Remoción de turbiedad orgánica o inorgánica que no se puede sedimentar rápidamente.
- Remoción de color verdadero y aparente.
- Eliminación de bacteria, virus y organismos patógenos susceptibles de ser separados por coagulación.
- Destrucción de algas y plancton en general.
- Eliminación de sustancias productoras de sabor y olor, en algunos casos de precipitados químicos suspendidos en otros.

El uso de cualquier otro proceso para la remoción de partículas muy finas, como la sedimentación simple, resulta muy poco económico y en ocasiones imposible, debido al alto tiempo requerido.

¹⁵ SALAZAR, Roberto. Plantas de Potabilización. Pasto, Nariño: s.n. 2012. Pp. 39 - 40

Para la evaluación de este proceso es necesario tener en cuenta las características físicas y químicas del agua, la dosis del coagulante, la concentración del coagulante, el punto de aplicación del coagulante, la intensidad y el tiempo de mezcla y el tipo de dispositivo de mezcla.¹⁶

Teoría de la coagulación: la turbiedad, no es más que la capacidad de un líquido de diseminar un haz luminoso; puede deberse a partículas en suspensión, tales como arcilla, minerales, sedimento, materia orgánica e inorgánica finamente dividida provenientes de la erosión del suelo, a algas o a crecimientos bacterianos.

El color a su vez está constituido por sustancias químicas, la mayoría de las veces provenientes de la degradación de la materia orgánica, tales como hojas y plantas acuáticas con las cuales entra en contacto, ácidos fúlvicos, himatomelánicos, y húmicos conocidos en su conjunto como sustancias húmicas. “Estas están compuestas por moléculas aromáticas de alto peso molecular que muestran características polianiónicas en soluciones neutras o alcalinas. El conocimiento de la naturaleza y las características de estos contaminantes es básico para poder entender los procesos de remoción”.¹⁷

Las partículas que forman la turbiedad y el color de las aguas naturales, poseen cargas eléctricas que normalmente son negativas, pero como también existen cargas eléctricas positivas, se puede afirmar que el agua y las soluciones son eléctricamente neutras. Las cargas eléctricas de las partículas generan fuerzas de repulsión entre ellas, por lo cual se mantienen suspendidas y separadas en el agua. Es por esto que dichas partículas no se sedimentan.

El conjunto formado por estas partículas constituye un sistema coloidal, formado por una doble capa de iones, el cual es sometido a un potencial en la superficie inferior del doble lecho, denominado *potencial Z*. “Este potencial tiene un valor crítico, por encima del cual los coloides son estables, y por debajo de él, la repulsión en las partículas se reduce a un grado tal que chocando con cierta velocidad pueden unirse y flocular”.¹⁸

Mecanismos de coagulación: la remoción de impurezas del agua en plantas que emplean la coagulación química en general es realizada utilizando sales de hierro y aluminio como coagulante primario y eventualmente polímeros. Cuatro mecanismos son citados responsables de la coagulación: coagulación por compresión de la doble capa, neutralización de cargas, barrido y puente químico. La definición del mecanismo predominante depende de factores como el pH de coagulación, dosis de coagulante y las características químicas del agua a tratar. En la elección del coagulante debe ser considerado su costo, la eficiencia en la

¹⁶ RESTREPO OSORNO, Op. Cit., p. 7.

¹⁷ CARRILLO GUZMÁN, Op. Cit., p. 10.

¹⁸ RESTREPO OSORNO, Op. Cit., p. 7-8.

desestabilización de las partículas presentes en el agua a tratar, su capacidad de atenuar fluctuaciones en la calidad del agua sin afectar la eficiencia de la coagulación, el volumen de lodo producido y su influencia sobre la duración de las carreras de filtración, siendo deseable que el coagulante reduzca la pérdida de carga en las unidades de filtración.¹⁹

Coagulación por compresión de la doble capa: cuando se aproximan dos partículas semejantes, sus capas difusas interactúan y generan una fuerza de repulsión, cuyo potencial de repulsión está en función de la distancia que los separa y cae rápidamente con el incremento de iones de carga opuesta al de las partículas, esto se consigue sólo con los iones del coagulante. (fig. 2).

Existe por otro lado, un potencial de atracción o fuerzas de atracción E_a , entre las partículas llamadas fuerzas de Van der Waals, que dependen de los átomos que constituyen las partículas y de la densidad de estos últimos. Contrariamente a las Fuerzas de repulsión, las fuerzas de Van der Waals no son afectados por las características de la solución. (fig. 2)

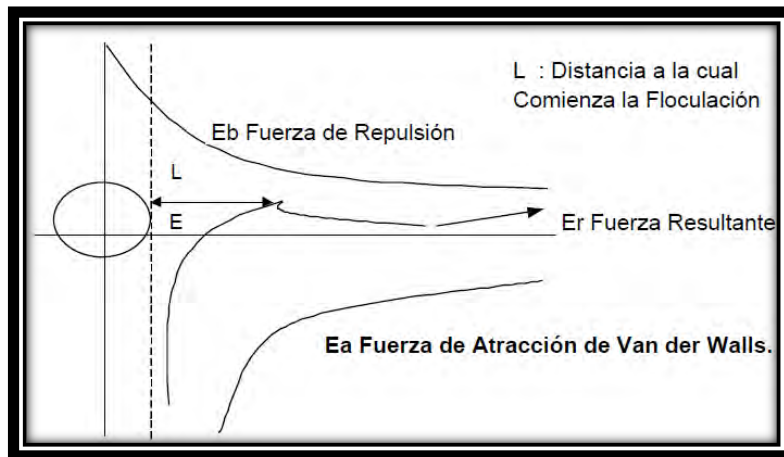


Figura 2. Fuerzas de atracción y repulsión²⁰

Si la distancia que separa a las partículas es superior a "L", entonces las partículas, no se atraen. E es la energía que los mantiene separados.²¹

¹⁹ SALAZAR, Op. Cit., p. 54.

²⁰ ANDÍA CÁRDENAS, Yolanda. Tratamiento de agua: Coagulación y floculación. 2000. Pp. 11 -12.

²¹ Ibíd.

Coagulación por captura de un precipitado de hidróxido metálico (Barrido): cuando se excede el producto de solubilidad de los hidróxidos metálicos como el caso del $\text{Al}(\text{OH})_3(\text{H}_2\text{O})_3$ en las soluciones de sales metálicas como el $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 18\text{H}_2\text{O}$, se procede una precipitación rápida de los hidróxidos gelatinosos que ocasionan una aglomeración de partículas por barrido, atrapando los coloides. El mecanismo de barrido es caracterizado por altas dosis de coagulante, suficiente para la formación de precipitado de hidróxidos de aluminio y hierro, cuando son utilizados estos elementos como coagulantes, siendo adecuados para plantas con unidades de decantación y floto-filtración ya que este mecanismo posibilita la formación de flocs mayores facilitando al sedimentación o la flotación. La coagulación por barrido no excluye, sin embargo, de que simultáneamente se produzca también, en parte o en una etapa inicial coagulación por puente químico, e incluso coagulación por adsorción-neutralización. La coagulación corriente, pues, se realiza por medio de diferentes mecanismos que se sobreponen y complementan.

Coagulación por neutralización de cargas: la neutralización de cargas de coloides liofobicos puede hacerse por:

- Cambio de la concentración de los iones que determina el potencial del coloide.
- Por la adsorción de iones que posean una carga opuesta a las de los iones determinantes del potencial y que sean capaces de remplazar a estos en la capa de Stern.

El mecanismo de neutralización de cargas es adecuado en las tecnologías de tratamiento que emplean filtración directa, una vez que en este caso no son formados floculos grandes, mas si partículas desestabilizadas para ser retenidas en el filtro. En este mecanismo la dosis de coagulante es generalmente menor a la necesaria cuando es empleado el mecanismo de barrido.

Coagulación por adsorción y puente interparticular: tal como fue mencionado, los coagulantes al entrar en contacto con el agua sufren en primer lugar una reacción de hidrolización e inmediatamente una polimerización que consiste en la formación de largas cadenas tridimensionales con extremos activos, las cuales pueden ser adsorbidas en los sitios vacantes de absorción de los coloides existentes en la suspensión, dejando los extremos extendidos en el agua, los cuales pueden adherirse a otros coloides formando puentes, y por lo tanto ocurre la desestabilización. El mecanismo del puente interparticular es observado principalmente cuando se realiza la aplicación de polímeros como auxiliares de coagulación.²²

²² SALAZAR, Op. Cit., p. 56.

El fenómeno de la desestabilización se efectúa mediante una serie de reacciones químicas bastante complejas, de las cuales algunas no se han podido entender lo suficiente. Dentro de esas reacciones se encuentran las que se efectúan con las diversas formas de alcalinidad, por lo cual su contenido disminuye. Además, algunas de estas reacciones producen CO₂, cuyo efecto consiste fundamentalmente en el incremento de la acidez del agua y por consiguiente la disminución del pH.²³

1.2.4 Factores que influyen en la coagulación:

- **Estado de valencia:** entre mayor sea la valencia del ion, más efectivo resulta como coagulante.
- **Capacidad de cambio:** es una medida de la tendencia a remplazar cationes de baja valencia por otros de mayor valencia, provocando la desestabilización y aglomeración de partículas en forma muy rápida.
- **Tamaño de las partículas:** las partículas deben poseer el diámetro inferior a una micra. Las partículas con diámetro entre una y cinco micras, sirven como núcleos de floc, en cambio de diámetro superior a cinco micras, son demasiado grandes para ser incorporadas en el floc.
- **Temperatura:** la temperatura cambia el tiempo de formación del floc, entre más fría el agua, la reacción es más lenta y el tiempo de formación del floc es mayor.
- **Concentración de iones H⁺ o pH:** para cada coagulante hay por lo menos una zona de pH óptima, en la cual una buena floculación ocurre en el tiempo más corto y con la misma dosis de coagulante.
- **Relación cantidad-tiempo:** la cantidad de coagulante es inversamente proporcional al tiempo de formación del floc.
- **Alcalinidad:** la alcalinidad guarda la relación con el pH y por lo tanto el contenido de alcalinidad del agua es uno de los factores por considerar en la coagulación.²⁴

1.2.5 Clases de coagulantes. Los coagulantes que se utilizan en la práctica para agua potable son los siguientes:

Sales de aluminio: forman un floc ligeramente pesado. Las más conocidas son: El Sulfato de Aluminio, Al₂(SO₄)₃ × 14H₂O, que en la práctica se le denomina como Alumbre; el Sulfato de Aluminio Amoniacal y el Aluminato Sódico. El primero es el que se usa con mayor frecuencia dado su bajo costo y manejo relativamente sencillo.

²³ RESTREPO OSORNO, Op. Cit., p. 7.

²⁴ CASTRILLON BEDOYA, Daniela & GIRALDO, María de los Ángeles. Determinación de las dosis óptimas de sulfato de aluminio granulado tipo B en función de la turbiedad y el color para la potabilización del agua en la planta de tratamiento en villa santana. 2012. p. 16.

Sales de hierro: se utiliza el Cloruro Férrico, FeCl_3 , y los Sulfatos de Hierro Férrico y Ferroso, $\text{Fe}(\text{SO}_4)_3$ y FeSO_4 . Forman un floc más pesado y de mayor velocidad de asentamiento que las sales de aluminio.

Polímeros o polielectrolitos: son compuestos complejos de alto peso molecular que se utilizan no propiamente como coagulantes sino como ayudantes de coagulación. La dosificación de estas sustancias se lleva a cabo en concentraciones muy bajas, lo cual es una gran ventaja y compensa el costo del polímero. Están siendo ampliamente empleados en el tratamiento de aguas potables ya que se produce una menor cantidad de lodos, adicionalmente el lodo producido es más fácilmente tratable.²⁵

1.2.6 Desventajas del uso de coagulantes químicos. El sulfato aluminio (alumbre), un coagulante común universalmente usado en el tratamiento del agua y de aguas residuales, puede lograr 90–99% de remoción microbiana bajo condiciones óptimas. Sin embargo, el uso del alumbre presenta algunas desventajas, como son: produce grandes volúmenes de lodo, reacciona con la alcalinidad natural presente en el agua, llevando a la reducción del pH, y muestra baja eficacia de coagulación en aguas frías. Además, el uso del alumbre ha levantado numerosas inquietudes que incluyen impacto eco toxicológico cuando es introducido en el ambiente como post-tratamiento de lodos, impactos en la salud humana como resultado del consumo del agua final, y alto costo de importación de estos químicos para las comunidades en vías de desarrollo. Además, la aplicación óptima del alumbre requiere de habilidad técnica y entrenamiento.²⁶

1.2.7 Los coagulantes naturales. Son sustancias solubles en agua, procedentes de materiales de origen vegetal o animal que actúan de modo similar a los coagulantes sintéticos, aglomerando las partículas en suspensión que contiene el agua cruda, facilitando su sedimentación y reduciendo la turbidez inicial de ésta. Algunos de estos coagulantes poseen además propiedades antimicrobianas, por lo que reducen o eliminan el contenido de microorganismos patógenos susceptibles de producir enfermedades.²⁷

Existe una gran variedad de coagulantes naturales alternativos empleados como coagulante primario en la clarificación de aguas.

²⁵ RESTREPO OSORNO, Op. Cit., p.10.

²⁶ CARRILLO GUZMÁN & PÉREZ GARCÍA, Op. Cit., p.15.

²⁷ GARCÍA FAYOS, Beatriz. Metodología de extracción in situ de coagulantes natural para la clarificación de agua superficial. Aplicación en países en vías de desarrollo. Tesis de master, 2007. P. 11.

Uno de estos coagulantes naturales es el almidón, el cual se encuentra en abundancia en el reino vegetal (Cuadro No. 3) y constituye la mayor reserva de carbohidratos de las plantas, el cual puede ser extraído de su fuente con relativa facilidad. Entre las principales fuentes de almidón en el país, se tienen: maíz, yuca, papa, arroz, trigo, sagú, sorgo, araruta, los cuales deben ser sometidos previamente a un proceso inicial para lograr su gelatinización.²⁸

Cuadro 3. Porcentaje de almidón, proteínas, fibras y ceniza de algunas fuentes de almidón

COMPONENTE	COMPOSICION (%)			
	Maíz	Trigo	Yuca	Papa
Almidón	55.5	64.0	21.5	20.0
Proteínas	8.2	12.5	1.1	2.1
Fibras	2.4	2.5	1.1	1.1
Ceniza	1.5	1.7	0.5	0.9

Tipos de coagulantes naturales:

- **Polielectrolitos catiónicos:** hay varios polímeros naturales que tienen propiedades inherentemente catiónicas o pueden modificarse para producir un poli electrolito catiónico. Normalmente, poseen grupos amonio cuaternario que tienen carga positiva independiente del pH, y se denominan polímeros de electrolito fuertes. Los polímeros de electrólito débiles que adquieren propiedades catiónicas en medios ácidos también están disponibles. Algunos productos naturales o sus derivados, como el quitosan, también son empleados en el tratamiento del agua.
- **Polímeros aniónicos:** los polímeros aniónicos normalmente usados contienen grupos ácidos del ácido carboxílico débil, tanto que la CD depende del pH. Muchos polisacáridos sulfatados están disponibles como biopolímeros naturales o sus derivados, algunos ejemplos son heparina, sulfato dextran, sulfato manano y sulfato de condroitina, pero las aplicaciones son principalmente médicas .Una propuesta para el uso en la industria del agua es

²⁸ RODRIGUEZ M J. P, LUGO U I. P, ROJAS C A. V & MALAVER C C. Evaluación del proceso de la coagulación para el diseño de una planta potabilizadora. 2007. p. 3.

el sulfonato de lignina polímero natural modificado, hecho por sulfonación de la lignina del papel kraft de bajo MW . Los taninos también han recibido atención.

- **Polímeros no-iónicos:** incluyen almidones, galactomananos, derivados de la celulosa, polisacáridos microbianos, gelatinas y gomas. Son utilizados como floculantes para ayudar en la separación sólido líquido, y varían en su estructura, peso molecular, biodegradabilidad y facilidad de disolución. Su principal ventaja es su fácil biodegradación. Los taninos también han recibido atención. De interés histórico es la purificación del agua potable con las semillas molidas del árbol horseradish tree, mientras que recientemente se ha reportado la extracción mejorada de algas de los estanques con las semillas molidas de la red sorella.²⁹

1.2.8 Floculación. La floculación consiste en la aglomeración, mediante la agitación moderada del agua, de las partículas que se desestabilizaron durante la coagulación, formando otras de mayor tamaño y peso específico-flóculos.

Los objetivos básicos de la floculación son reunir microflóculos para formar partículas con peso específico superior al del agua y compactar el flóculo disminuyendo su grado de hidratación para producir baja concentración volumétrica, lo cual produce una alta eficiencia en los procesos posteriores como sedimentación y filtración.³⁰

Factores que influyen en la floculación:

- **Concentración y naturaleza de las partículas:** la velocidad de formación del floc es proporcional a la concentración de partículas en el agua y del tamaño inicial de estas.
- **Tiempo de detención:** la velocidad de aglomeración de las partículas es proporcional al tiempo de detención. Debe estar lo más cerca posible al óptimo determinado por medio de ensayos de jarras, esto se puede lograr dividiendo la unidad de floculación en cámaras. Se puede decir que una eficiencia dada, se obtiene en tiempos cada vez menores a medida que se aumenta el número de cámaras de floculación en serie. Por razones de orden práctico el número de cámaras no puede ser muy grande, estableciéndose un mínimo de tres (3) unidades.³¹

1.2.9 Gradiente de velocidad. Es la velocidad de agitación de las aspas en mezcla rápida y mezcla lenta, se expresa en S^{-1} o también en revoluciones por

²⁹ CARRILLO GUZMÁN & PÉREZ GARCÍA, Op. Cit., p.17.

³⁰ RESTREPO OSORNO, Op. Cit., p.10.

³¹ Ibíd.

minuto (rpm). Este es un factor proporcional a la velocidad de aglomeración de las partículas. Existe un límite máximo de gradiente que no puede ser sobrepasado, para evitar el rompimiento del floc, ya nombrado anteriormente. El gradiente a través de las cámaras debe ser decreciente y no se deben tener cámaras intermedias con gradientes elevados.³²

Mezcla rápida para coagulación de barrido: en este mecanismo de coagulación, las interacciones se producen entre los coloides del agua y la voluminosa formación de precipitado de hidróxido de hierro o aluminio.

En la práctica del tratamiento de agua en condiciones de coagulación de barrido, el agua es sobresaturada en 3 ó 4 órdenes de magnitud y el hidróxido se precipita con mucha rapidez. En estas circunstancias son considerablemente más importantes las condiciones químicas para lograr una buena precipitación y subsecuente floculación de las partículas que las interacciones de transporte entre el coloide y los productos hidrolíticos durante la desestabilización. Por consiguiente, en este caso son importantes los aspectos químicos en la etapa de desestabilización y los de transporte en la etapa de floculación. Amirtharajah y Mills señalaron que cuando predomina la coagulación de barrido, las condiciones de mezcla rápida no afectan los resultados obtenidos.³³

Mezcla rápida con polímeros: los mecanismos de coagulación predominantes con los polímeros orgánicos son los de neutralización de la carga y puente interarticular.

Se puede suponer que en este caso no son necesarios altos valores de gradientes de velocidad, puesto que no se producen las reacciones de adsorción en los coloides y precipitación como hidróxido, que ocurren simultáneamente durante la etapa de mezcla con coagulantes inorgánicos.

Estudios efectuados recomiendan gradientes de velocidad de 400 a 800 s⁻¹ tiempos de retención de 60 a 30 segundos, respectivamente. Con polímeros de peso molecular bajo, se ha identificado un rango de gradiente de velocidad de 300 a 650 s⁻¹ para optimizar el proceso.³⁴

1.2.10. La yuca (*Manihot Esculenta Crantz*). La yuca (*Manihot Esculenta Crantz*) es una especie de raíces amiláceas que se cultiva en los trópicos y subtrópicos (fig. 3). A pesar de que es uno de los cultivos alimenticios más importantes de los países tropicales, fuera de ellos es muy poco conocida. Es originaria de América

³² BOLAÑOS ALVEAR, Dayan Vanesa. Protocolo para el funcionamiento, control y operación del nuevo equipo de prueba de jarras del laboratorio de hidráulica y saneamiento. 2014. p. 29.

³³ DE VARGAS Lidia, Mezcla Rapida. Bogotá: s.n., s.f. Pp. 227-228.

³⁴ Ibíd.

tropical. Antes de 1600, los exploradores portugueses la llevaron a África y Asia. La yuca se siembra hoy en 92 países donde alimenta a más de 500 millones de personas.³⁵



Figura 3. Yuca (**Manihot Esculenta Crantz**)

La planta de yuca crece en una variada gama de condiciones tropicales: en los trópicos húmedos y cálidos de tierras bajas, en los trópicos de altitud media y en los subtrópicos con inviernos fríos y lluvias de verano. Aunque la yuca prospera en suelos fértiles, su ventaja comparativa con otros cultivos más rentables es su capacidad para crecer en suelos ácidos, de escasa fertilidad, con precipitaciones esporádicas o largos períodos de sequía. Sin embargo, no tolera encharcamientos ni condiciones salinas del suelo. Es un cultivo de amplia adaptación ya que se siembra desde el nivel del mar hasta los 1800 msnm, a temperaturas comprendidas entre 20 y 30 °C con una óptima de 24 °C, una humedad relativa entre 50% y 90% con una óptima de 72% y una precipitación anual entre 600 y 3000 mm con una óptima de 1500 mm.³⁶

La yuca no se debe considerar simplemente como un cultivo para consumo humano, puesto que una parte apreciable de la producción es procesada y se mercadea convertida en almidón y en otros productos.³⁷

Análisis de la raíz de la yuca: la raíz de la yuca se compone de tres tejidos: el periderma (casquilla), el parénquima cortical (corteza) y el parénquima interior (fig. 4).

³⁵ ALARCÓN M, Freddy & DUFOUR, Dominique. Almidón agro de yuca en Colombia. Tomo 1: Producción y recomendaciones, 1998. p. 10.

³⁶ MONTOYA HENAO, Susana. Industrialización de la Yuca: Obtención de almidón nativo y sus aplicaciones. p. 7.

³⁷ ALARCÓN M Freddy & DUFOUR, Op. Cit., p.11.

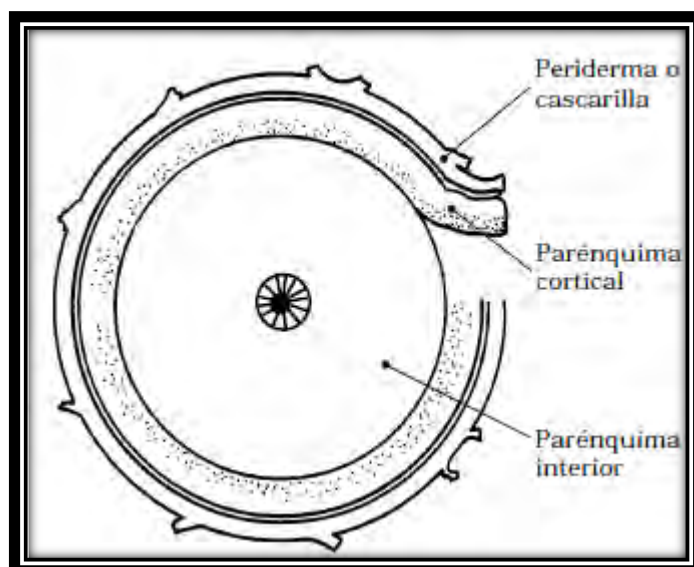


Figura 4. Corte transversal de la raíz de yuca³⁸

- El 80% del peso fresco de la raíz, aproximadamente, corresponde al *parénquima* o pulpa, que es el tejido en que la planta almacena el almidón.
- El contenido de materia seca de la raíz de yuca fluctúa entre el 30% y el 40%.
- La materia seca del parénquima está constituida, en su mayor parte (90% a 95%), por la fracción no nitrogenada, es decir, por carbohidratos (almidón y azúcares).
- El resto de esta materia seca corresponde a fibra (1% a 2%), grasas (0.5% a 1.0%), cenizas o minerales (1.5% a 2.5%) y proteína (2.0%).
- El *almidón* representa, además, la mayor parte de los carbohidratos (96%) y es, por tanto, el principal componente de la materia seca de la raíz.

Las variedades cultivadas para uso industrial deben tener un alto contenido de almidón.³⁹

1.2.11 El almidón. El almidón puede hallarse en la naturaleza como pequeños gránulos depositados en semillas, tubérculos y raíces de distintas plantas⁴⁰. Es un polímero natural cuyos gránulos consisten en estructuras macromoleculares ordenadas en capas y cuyas características en cuanto a composición, cantidad y forma varían de acuerdo con el tipo de fuente de la que provenga.

Los gránulos de almidón están compuestos por capas externas de amilopectina y capas internas de amilosa, cuya proporción es variable dependiendo de la fuente

³⁸ Ibíd.

³⁹ Ibíd.

⁴⁰ MONTOYA HENAO, Op. Cit., p.12.

del almidón. Su composición química es la de un polisacárido formado únicamente por unidades glucosídicas, es decir, es una macromolécula formada por gran cantidad de moléculas de glucosa que se repiten.

En el caso del almidón de yuca, su tamaño puede variar de 5 μm a 35 μm , su forma es entre redonda y achatada y su contenido de amilosa es alrededor del 17%.⁴¹

Las figuras 5 y 6, ilustran la estructura de la amilosa y la amilopectina.

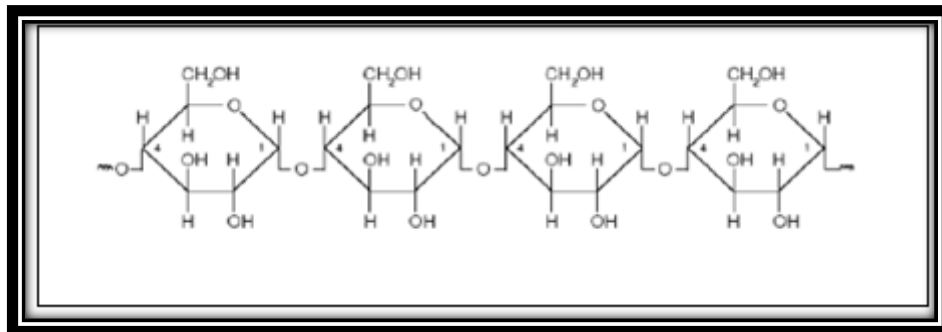


Figura 5. Estructura molécula de amilosa⁴²

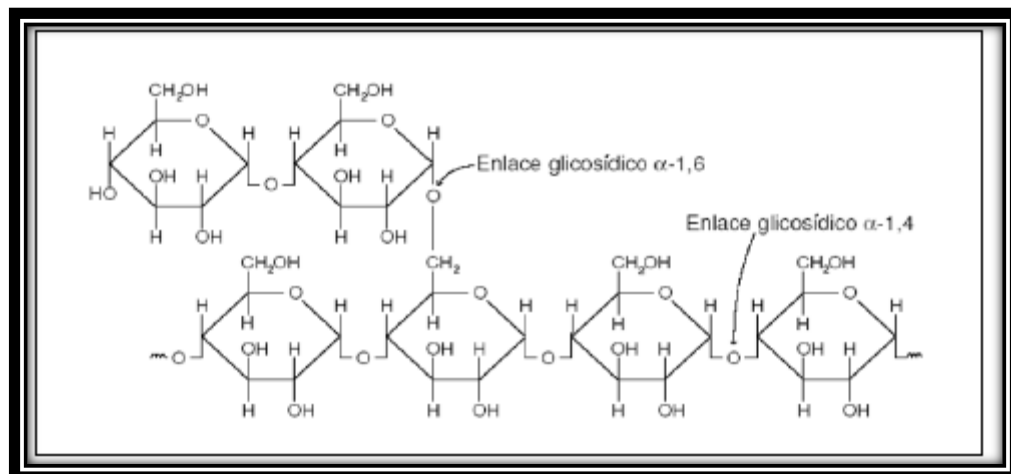


Figura 6. Estructura molécula de amilopectina⁴³

⁴¹ MENESES Juliana, CORRALES Catalina María & VALENCIA Marco. Síntesis y caracterización de un polímero biodegradable a partir del almidón de yuca, Revista EIA, ISSN 1794-1237 Número 8, p. 57-67. Diciembre 2007, Escuela de Ingeniería de Antioquia, Medellín (Colombia). p. 59.

⁴² Ibíd.

⁴³ Ibíd., p. 60.

Algunas propiedades del almidón:

- ✓ Hinchamiento, Gelatinización y Retrogradación.

La ruptura de la estructura del grano de almidón, en presencia de agua caliente, se desarrolla en tres fases distintas. Durante la primera fase, ocurre apenas un hinchamiento limitado y la viscosidad de la suspensión no aumenta de manera sensible. El grano, conserva aún su apariencia y después del secado, no es posible notar gran alteración.

Cuando se sobrepasa una temperatura próxima a 65 °C (la temperatura exacta depende de la temperatura del almidón), se inicia la segunda fase de hinchamiento. En esta fase, el grano aumenta su volumen muchas veces en relación con el volumen original y al mismo tiempo ocurre la solubilización de una pequeña parte de su contenido.

Durante la tercera fase, que ocurre a temperaturas aún más elevadas, evolucionan en forma más acentuada los fenómenos observados durante la segunda fase. El calentamiento prolongado provoca, en esta tercera fase, la reducción de la viscosidad de la solución.

El hinchamiento puede ser inducido a temperatura ambiente por muchos agentes, entre los que se destacan los productos que tienen comportamiento básico. Las soluciones de almidón que permanecen almacenadas a temperatura ambiente o a temperaturas más bajas, sufren el fenómeno de retrogradación. Una parte del almidón se agrega progresivamente y finalmente forma un precipitado microcristalino insoluble. En forma general, la amilosa, presenta tendencia más acentuada a la retrogradación que la amilopectina.⁴⁴

1.2.12. El almidón de yuca. El almidón de yuca puede clasificarse como agrio y nativo (dulce). El almidón agrio sufre un proceso de fermentación que le otorga propiedades deseables para los alimentos; el almidón nativo o dulce no es sometido a un proceso de fermentación, y es el que se usa generalmente en la industria.

El almidón de yuca le resta sedimentación al agua y con él se obtiene una mejor respuesta en el proceso de clarificación de la misma. Para la fabricación del compuesto solo se necesita retirarle la cáscara al tubérculo, molerlo y luego, tritarlo. Después se retira el producto a una base húmeda y se deja secar hasta obtener el almidón.⁴⁵

⁴⁴ CAMPOS José Roberto & DI BERNARDO, Op. Cit., p.39.

⁴⁵ Disponible en internet: <http://www.eltiempo.com/archivo/documento/MAM-280640>

2. METODOLOGÍA

2.1 TIPO DE INVESTIGACIÓN

Se califica este proyecto como investigación cuasi experimental de tipo cuantitativo y cualitativo, donde se obtendrán parámetros físico-químicos, microbiológicos y dosificaciones de coagulante por medio de observación directa y pruebas de laboratorio.

2.2 HIPÓTESIS Y VARIABLES

2.2.1 Hipótesis. El almidón extraído de la yuca tiene una buena eficiencia como coagulante alternativo para el tratamiento de agua superficial.

2.2.2 Variables:

Variables independientes: tipo de coagulante, Dosificación de coagulante.

Variables dependientes: calidad físico-química y microbiológica del agua.

Desarrollo del trabajo. Para el desarrollo de esta investigación, se recolectaron muestras en días en con condiciones climáticas críticas; de esta manera el coagulante a analizar trabajaría en un alto grado de exigencia.

2.3 EXTRACCIÓN DEL ALMIDÓN DE YUCA

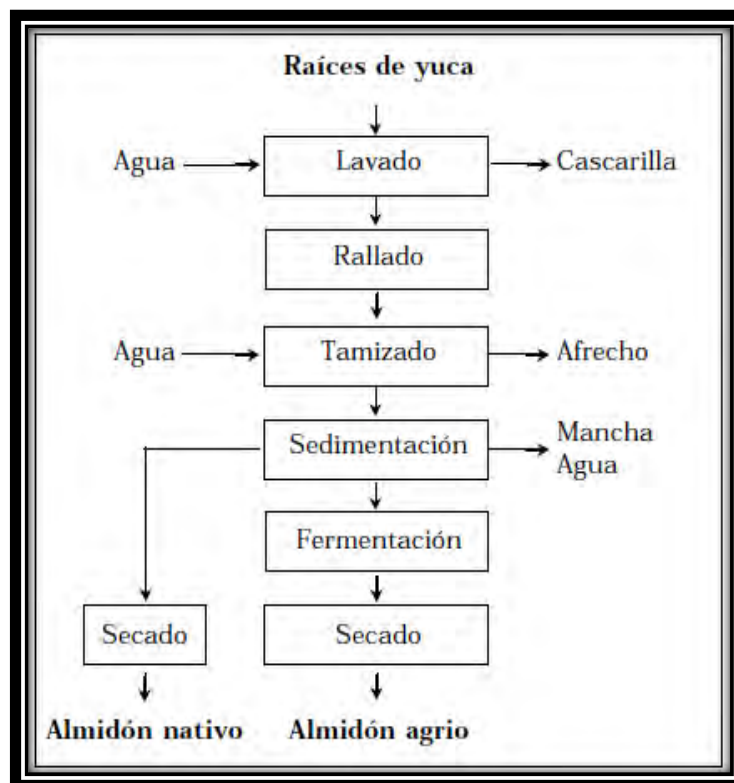


Figura 7. Diagrama del proceso general de extracción de almidón de yuca (nativo y agrio) ⁴⁶

Este procedimiento se lleva a cabo en las instalaciones de la planta piloto de la facultad de ingeniería agroindustrial de la Universidad de Nariño, el cual comprende una serie de procesos los cuales se describen a continuación:

Lavado y pelado de las raíces: el propósito del lavado es eliminar la tierra y las impurezas adheridas a la cascarilla de las raíces de yuca, junto con esa misma cascarilla (corteza externa o periderma). Las raíces se pelan manualmente con cuchillo.

Rallado o desintegración: en esta etapa se liberan los gránulos de almidón contenidos en las células de las raíces de la yuca. La yuca es picada en trozos pequeños y desintegrados en una licuadora de tipo industrial donde se adiciona agua, de este proceso se obtiene una masa homogénea.

⁴⁶ ALARCÓN M, & DUFOUR, Op. Cit., p.9.

Colado o extracción: en este paso se separa la pulpa o material fibroso de la lechada de almidón usando un colador convencional, a continuación se hace un segundo colado un tamiz tamaño 60, (o mayor si se requiere), de esta manera se retiene pequeñas fibras que hayan podido filtrarse en el primer colado.

Sedimentación o deshidratación: la lechada de yuca que sale del proceso de colado contiene almidón en suspensión, esta lechada se almacena en un recipiente donde se lleva a cabo la sedimentación del almidón por un periodo de 3 a 6 horas; al final de esta etapa queda una capa de almidón compactado en el fondo y el agua sobrenadante se desecha.

Secado: el secado es la operación de deshidratación del almidón húmedo mediante exposición al calor, esto se logra poniendo el almidón en un horno a una temperatura de 45° C. por 24 horas.

2.4 CARACTERIZACIÓN DEL ALMIDÓN DE YUCA

Para realizar la caracterización del coagulante se determinaron las siguientes propiedades:

- Estado físico: se apreció a simple vista.
- Propiedades organolépticas: se determinó su color.
- pH (solubilizado en agua destilada): para esta medición se utilizó pH metro digital.
- Densidad a granel: se tomó una masa determinada del almidón en polvo y se depositó en un recipiente de masa conocida y volumen aforado, luego este conjunto se pesó. Después se hicieron los cálculos necesarios para obtener el respectivo valor de la densidad.

En el cuadro 4 se consignan los valores de cada propiedad.

Cuadro 4. Caracterización del Almidón de yuca realizada en laboratorios UDENAR.

CARACTERIZACION DEL ALMIDON DE YUCA		
Propiedad	Valor	Método
Estado físico	Solido	Visual
Color	Blanco	Visual
Densidad (g/ml)	0.74	**
pH	8.6	Potenciometrico

2.4.1 Identificación del almidón (*Prueba de Lugol*). Esta es una prueba que se utiliza para la identificación de polisacáridos. El almidón en contacto con unas gotas de reactivo de Lugol (disolución de yodo (I) y yoduro potásico (KI)) toma un color azul-violeta, esto indica una reacción positiva a la prueba (fig. 10). La coloración producida por el Lugol se debe a que el yodo se introduce entre las espiras de cada molécula de almidón, no es por tanto una reacción química, si no que se forma un compuesto de inclusión que modifica las propiedades físicas de esta molécula, apareciendo el color azul característico.

En un beaker de 50ml se colocaron 0.05 g de la muestra del almidón a analizar y 10 ml de agua destilada, se sometieron a calentamiento a temperatura de 60 °C, durante 20 minutos (**fig. 8**), esto para que el almidón se disolviera y no precipitara en el fondo del tubo, posteriormente se retiró la muestra del calentamiento y se dejó enfriar a temperatura ambiente, ya que la inclusión del Lugol a la molécula, solo tiene lugar en frío. Finalmente, se agregaron dos gotas del reactivo Lugol (fig. 9).⁴⁷



Figura 8. Calentamiento de solución de almidón.

⁴⁷ MARÍN HERBERT Elidet. Extracción, caracterización y modificación de almidón de plátano (*musa sapientum*) variedad roatán, producto de desecho post-cosecha de la zona de vega de alatorre veracruz”, Tesis, 2013. Pp. 25 – 26.



Figura 9. Adición de reactivo de Lugol a la solución de almidón.

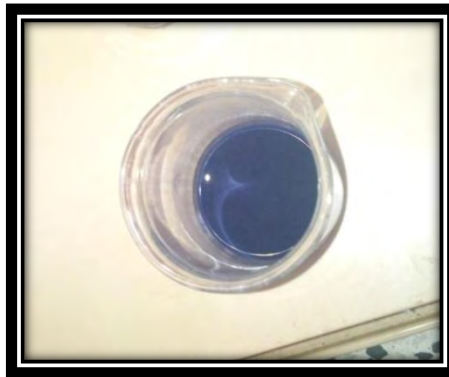


Figura 10. Reacción positiva a la prueba de Lugol.

2.5 PREPARACIÓN DE LOS COAGULANTES

2.5.1 Preparación de la suspensión de almidón. El almidón a ser utilizado en investigaciones, en ensayos de laboratorio y en plantas de tratamiento de agua, debe ser sometido previamente a un proceso inicial para lograr su gelatinización.

En primeros ensayos realizados en la EESC-USP fue utilizada la técnica de gelatinización en caliente y recientemente, inclusive en plantas de tratamiento ha sido empleada la técnica de gelatinización con hidróxido de sodio.

Las moléculas de almidón, bien sea las de amilopectina o las de amilosa, se encuentran encerradas en una envoltura que deben romperse para permitir su liberación al medio líquido.

La ruptura de la membrana envolvente puede ser lograda a través de calentamiento o a través de la adición de soda cáustica en una suspensión concentrada del almidón a ser tratado.

Ambas alternativas son de fácil ejecución en plantas de tratamiento de agua, pero la gelatinización en frío con soda cáustica ha sido la escogida en la casi totalidad de los casos, por el hecho de no exigir sistema especial de calentamiento.

La gelatinización en frío, se efectúa llevando a cabo los siguientes pasos:

- Pesar 1000 mg de almidón en un vidrio de reloj.
- En un beaker de 50 ml adicionar cerca de 10 o 20 ml de agua destilada fría e inducir la disolución de almidón.
- Adicionar lentamente 200 mg de soda caustica (NaOH) previamente diluida en 2-4 ml de agua destilada.
- Efectuar la mezcla mediante agitación con una varilla de vidrio hasta obtener una perfecta homogenización.
- Tras sucesivos lavados del beaker, con agua destilada, pasar la suspensión preparada a un recipiente (balón volumétrico), que permite completar con precisión un volumen de 1000 ml.
- Dejar esta solución en reposo por cerca de 1 hora para completar la disolución.

Esta solución puede ser guardada por dos días y se recomienda agitar antes de aplicar cada dosis.⁴⁸

Del proceso de gelatinización descrito anteriormente se obtiene una concentración del 0.1%, y en base a este proceso se realiza la preparación de la suspensión de almidón de yuca calculando las cantidades de reactivos necesarias para obtener dicha suspensión con una concentración del 2% (Tabla No. 1). Para el correcto desarrollo de esta investigación la suspensión de sulfato de aluminio se debe preparar con esta misma concentración.

⁴⁸ CAMPOS & DI BERNARDO, Op. Cit., p.41.

Tabla 1. Gelatinización del almidón de yuca

GELATINIZACION						
Concentración %	Concentración ppm	Cantidad almidón (mg)	Agua para disolver almidón (ml)	Cantidad soda caustica (mg)	Agua para disolver soda (ml)	Volumen a completar (L)
0.1	1000	1000	20	200	2	1
2	20000	20000	400	4000	40	1

2.5.2 Preparación de la solución de sulfato de aluminio. El sulfato a ser utilizado en ensayos de laboratorio y en plantas de tratamiento de agua convencionalmente es el tipo B; se prepara una solución madre a una concentración del 2% (20000 ppm) la cual se logra llevando a cabo los siguientes pasos:

- Pesar 20000 mg de $Al_2(SO_4)_3$ en un vidrio de reloj
- Llevar a un recipiente (balón volumétrico) y completar con precisión un volumen de 1000 ml con agua destilada y agitar hasta obtener una solución homogénea.

Esta solución puede ser guardada por un mes máximo y se recomienda agitar antes de aplicar cada dosis.⁴⁹

Soluciones muy diluidas de sulfato de aluminio pueden hidrolizarse antes de su aplicación formando productos que no son tan efectivos en la coagulación.⁵⁰

⁴⁹ BOLAÑOS ALVEAR, Op. Cit., p.4.

⁵⁰ SALAZAR, Op. Cit., p.62.



Figura 11. Coagulantes

2.6 ENSAYO DE PRUEBA DE JARRAS (JAR-TEST)

2.6.1 Funcionamiento – procedimiento:

- Determinar los parámetros iniciales de la muestra de agua a analizar, estos son turbiedad, color aparente, pH, temperatura y alcalinidad.
- Colocar los 6 vasos en el equipo con 2 litros exactos de muestra de agua a analizar, aforados con una probeta graduada.
- Se utilizan 6 jeringas con diferentes dosificaciones de la solución de coagulante preparado con anticipación en el laboratorio.
- Dar inicio al proceso y al mismo tiempo se añade las diferentes dosis de coagulante en todos los vasos, el proceso se efectúa de la siguiente manera:

Mezcla rápida: Velocidad: 300 rpm, tiempo: 1 min.

Mezcla lenta: Velocidad: 40 rpm, tiempo: 20 min. (Anexo B)

Se debe hacer una observación visual y tomar apunte del tiempo que tarda en formarse el floc y el número del índice de Willcomb según el Cuadro No 5.

Cuadro 5. Índice de floculación de willcomb

Numero del índice	Descripción	Observación
0	No visible	Floc coloidal. Ningún signo de aglutinación
2	Visible	Floc muy pequeño, casi imperceptible para un observador entrenado
4	Disperso	Floc bien formado pero uniformemente distribuido, sedimenta muy lentamente o no sedimenta
6	Claro	Floc de tamaño relativamente grande , precipita con lentitud
8	Bueno	Floc bueno, que se deposita fácil pero no completamente
10	Excelente	Floc muy bueno, se deposita totalmente, dejando el agua cristalina

Al finalizar los tiempos de mezclado y la muestra esté completamente homogenizada, se procede a levantar rápidamente las aspas sumergidas en la muestra, para dar inicio a la fase de sedimentación, durante un tiempo de 20 minutos.

Al término del periodo de sedimentación se observa la calidad del sobrenadante según el Cuadro No 6 y se extrae aproximadamente 100 ml de cada jarra teniendo en cuenta que se debe purgar cada beaker de precipitado con la misma muestra de sobrenadante; en este procedimiento se debe tener cuidado de no re suspender las partículas del sedimento de la muestra.

Cuadro 6. Descripción del sobrenadante

Numero	Observación
2	Poco claro con flóculos en la solución, No separación
3	Medio claro
4	Muy claro y pocos flóculos en la solución (claros)
5	Muy claro, ligeramente más flóculos en la solución
1	Transparente, sedimenta rápido al inicio; estable

Finalmente se realiza a cada muestra de sobrenadante, los ensayos de los parámetros fisicoquímicos que se hicieron al inicio de la prueba y a la dosis optima

se realiza un proceso de filtrado para obtener el color real; se comparan los valores iniciales de los parámetros con resultados finales obtenidos y los valores máximos aceptados por la norma colombiana de calidad de agua potable según el decreto 1575/2007 (Cuadro No 7). El cálculo del porcentaje de remoción de color y turbiedad son dos parámetros definitivos para este análisis.

Cuadro 7. Valores máximos admisibles de los parámetros de calidad del agua.

Parámetro	Valor máximo admisible
Alcalinidad total (mg)	200
Color (UPC)	15
pH	6,5 - 9
Turbiedad (NTU)	2

Seleccionar la menor dosis de coagulante que removió el mayor valor de turbiedad y color. En el caso de que los parámetros de calidad de agua no se ajusten a los valores máximos admisibles, se repite el proceso, variando las dosis de coagulante según los resultados aproximados anteriormente hasta obtener los resultados esperados.

3. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

3.1 COMPORTAMIENTO DE LOS COAGULANTES

A continuación, una vez procesados los resultados obtenidos de los ensayos de Jar-Test realizados con sulfato de aluminio y con almidón de yuca, utilizando las mismas dosificaciones; se evalúan los parámetros de turbiedad y color, con el propósito de analizar el comportamiento de los coagulantes en función de dichos parámetros. A partir de la tendencia que manifiesten los coagulantes al confrontar las diferentes dosificaciones con los parámetros de estudio, se determina un rango óptimo de dosificación, en el cual interactuar más a fondo para obtener la eficiencia, el porcentaje de remoción y una dosis óptima de cada coagulante.

Al analizar el comportamiento del sulfato de aluminio, se puede observar que tanto en turbiedad (fig. 12) como en color (fig. 13), el sulfato de aluminio presenta una buena eficiencia en el rango de dosificación comprendido entre 35 a 45 mg/L, después de este, se evidencia que los niveles de turbiedad y color residual se mantienen estables con dosis mayores, lo que demuestra que el uso de dosis altas de sulfato de aluminio sería ineficiente para el tratamiento del agua de la quebrada Yamuesquer.

Por el contrario, al revisar el comportamiento del almidón de yuca, se observa que en función de la turbiedad (fig. 12) la eficiencia alcanzada no es muy significativa para poder valorar un rango óptimo de dosificación, y en función del color (fig. 13), el almidón manifiesta un efecto negativo, ya que después de su aplicación los valores de color residual, son mayores al valor inicial; por lo tanto, se analiza el comportamiento del almidón de yuca evaluando ensayos de Jar - Test con dosificaciones menores a 20 mg/l.

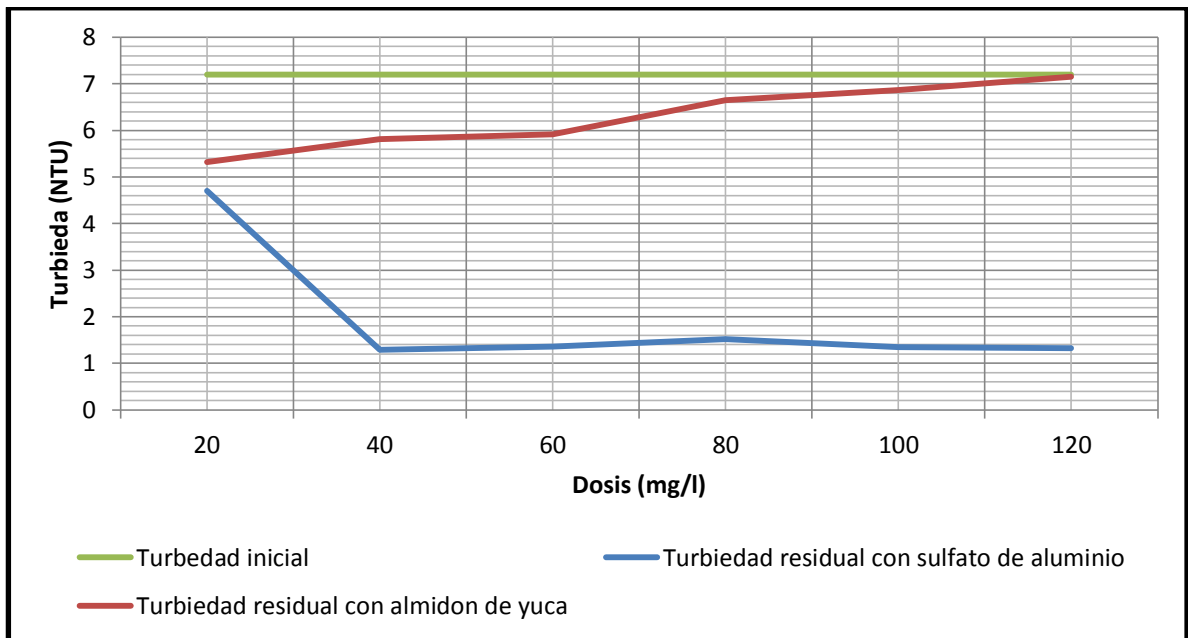


Figura 12. Comportamiento de los coagulantes en función de la turbiedad.

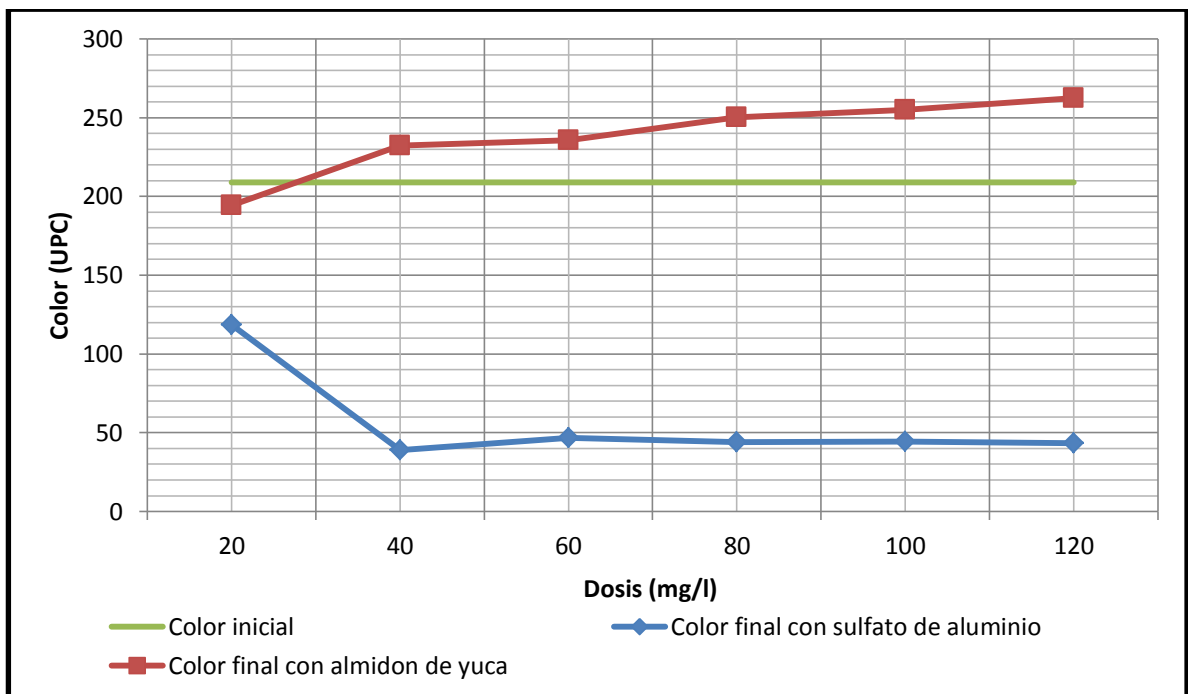


Figura 13. Comportamiento de los coagulantes en función del color.

3.1.1 Evaluación del sulfato de aluminio en el rango optimo (35-45 mg/l). Dentro del rango seleccionado como óptimo para evaluar la eficiencia del sulfato

de aluminio, se observa que después de su aplicación los valores de turbiedad final obtenidos (fig. 14), están por debajo del valor admisible por la norma colombiana de calidad de agua potable según el decreto 1575/2007.

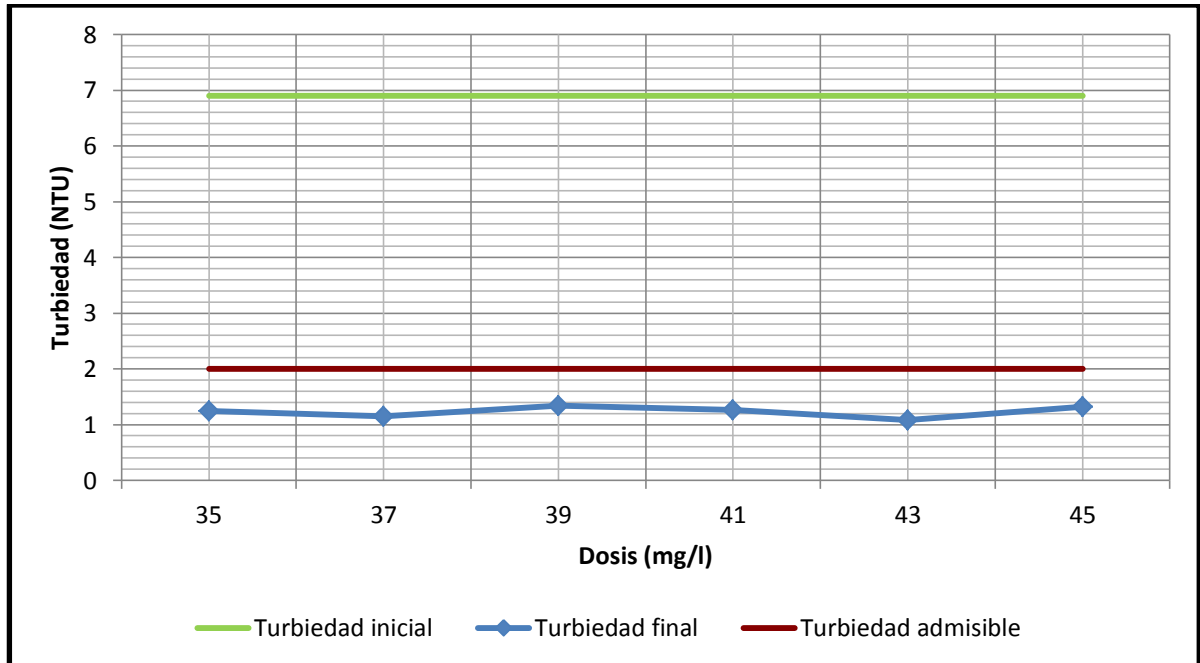


Figura 14. Comportamiento en el rango optimo de sulfato de aluminio en función de turbiedad.

En cuanto a la eficiencia en función del color (fig. 15), aunque los resultados finales no alcanzan a cumplir con el valor máximo admisible por la norma, el nivel de remoción alcanzado es aceptable y el color residual puede ser reducido aún mas con un proceso de filtrado.

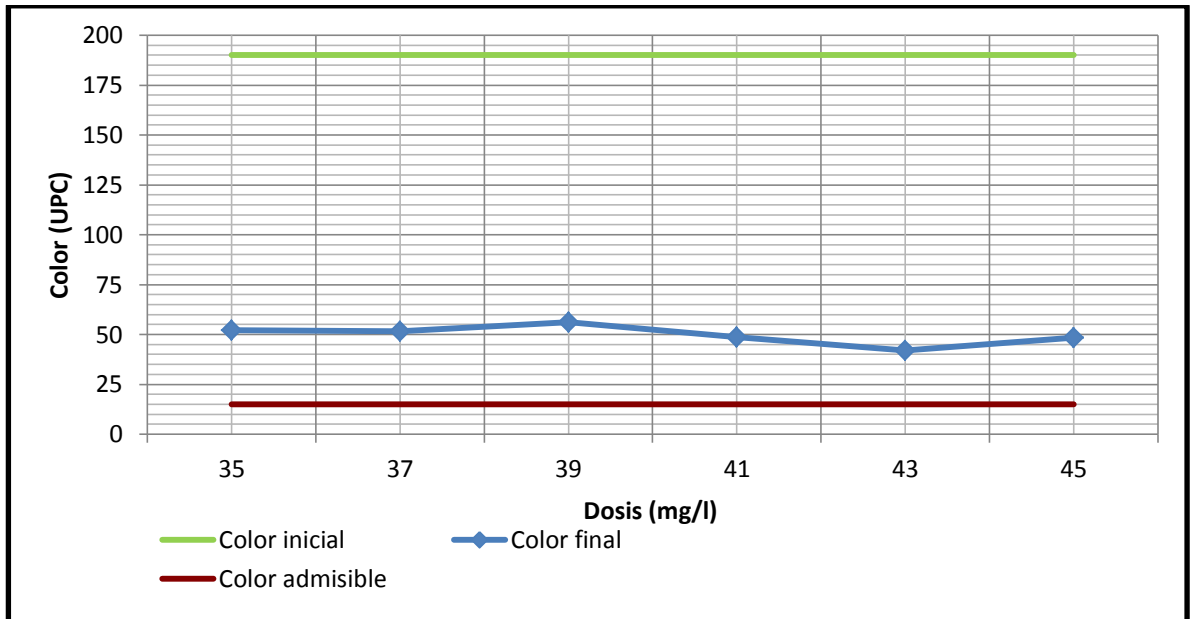


Figura 15. Comportamiento en el rango óptimo de sulfato de aluminio en función del color.

3.1.2 Porcentajes de remoción del sulfato de aluminio. Para seleccionar la dosis óptima de sulfato de aluminio se evalúan los porcentajes de remoción de turbiedad y color (fig. 16) alcanzados con cada dosis dentro del rango óptimo, obteniendo un valor de remoción de 84.34% para turbiedad y 77.84% para color, con una dosis de 43 mg/l, calificándose como la dosis óptima (Anexo C).

Investigaciones realizadas por stumm, determinaron que las concentraciones bajas de coloides requieren altas dosis de coagulantes para iniciar la coagulación, debido a que no hay suficientes partículas en suspensión para producir el contacto necesario para la formación de floc, se requiere entonces una gran cantidad de coagulante para que los hidróxidos metálicos que aparecen al reaccionar aquel con la alcalinidad y el agua, al descender arrastren las partículas que se encuentran a su paso (floc de barrido). Las mayores concentraciones de coloides requieren menores dosis de coagulante ya que las mismas partículas coloidales proveen núcleos para la precipitación, mientras que en el caso anterior el hidróxido lo provee.⁵¹

⁵¹ Ibíd.

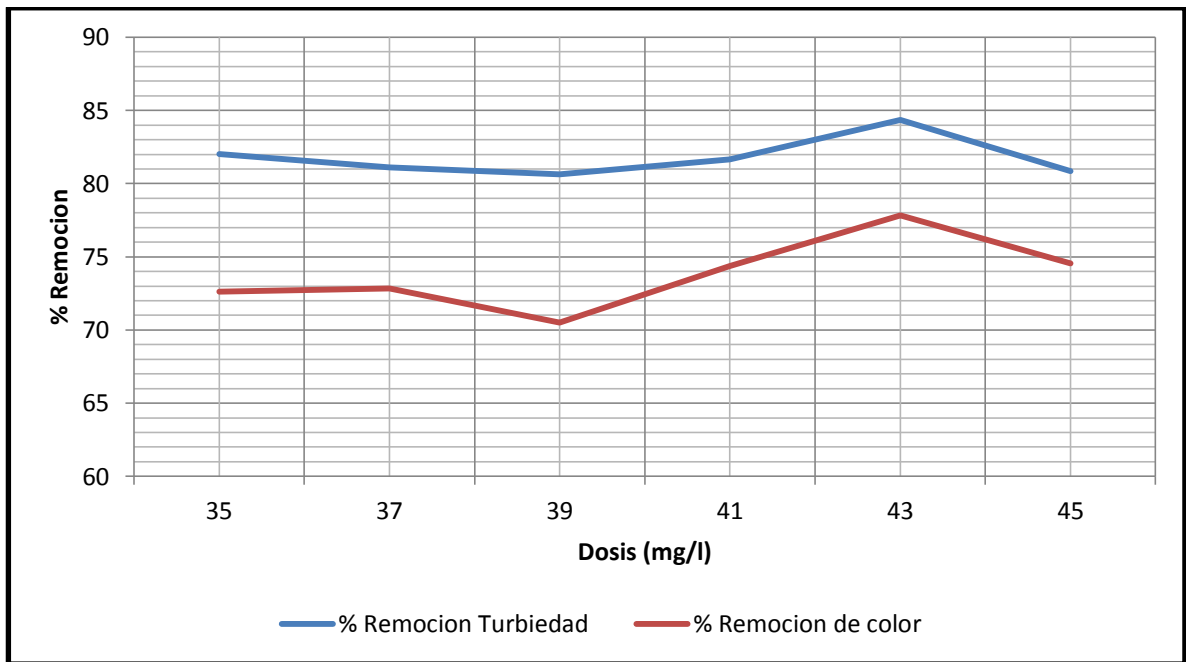


Figura 16. Porcentajes de remoción del sulfato de aluminio.

3.1.3 Evaluación del comportamiento del almidón de yuca en el rango de 5 a 35 mg/l. Dentro de este rango de dosificaciones, se observa que con dosis menores a 15 mg/l, la eficiencia del almidón de yuca en función de la turbiedad aumenta significativamente (fig. 17), y en función del color se evidencia que el almidón logra remover color de la muestra (fig. 18).

Por lo tanto, se continúa evaluando el comportamiento del almidón de yuca con dosis menores a 15 mg/l, con el fin de encontrar la dosis que arroje mejores resultados para el tratamiento de la quebrada Yamuesquer.

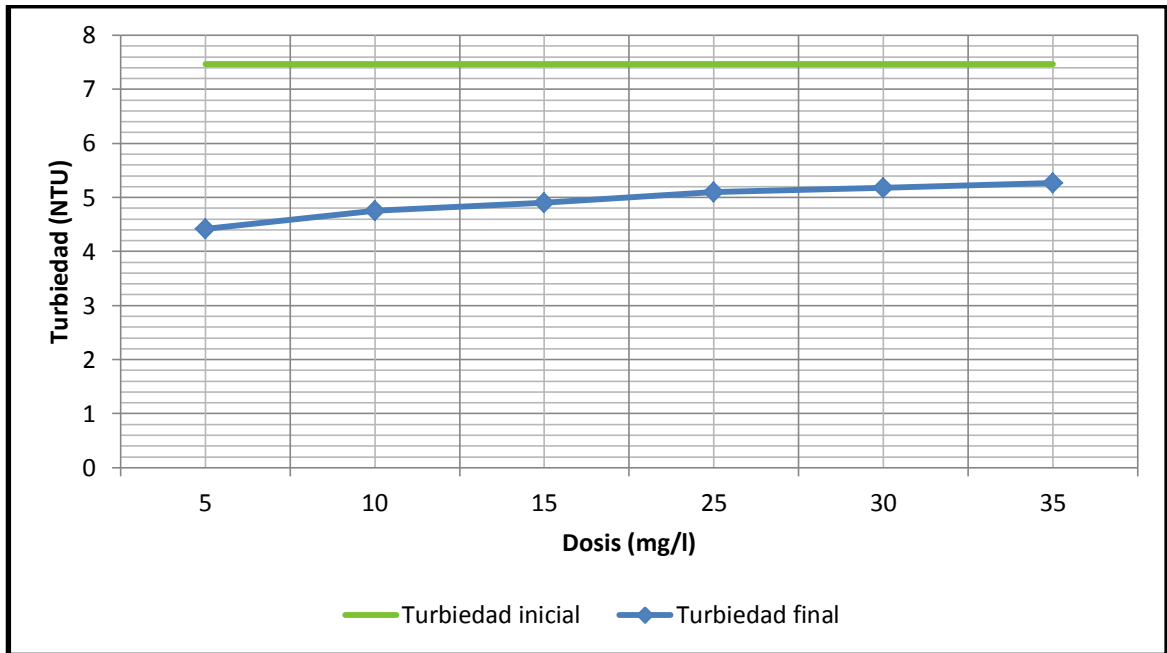


Figura 17. Comportamiento del almidón de yuca en función de la turbiedad (5 a 35 mg/l).

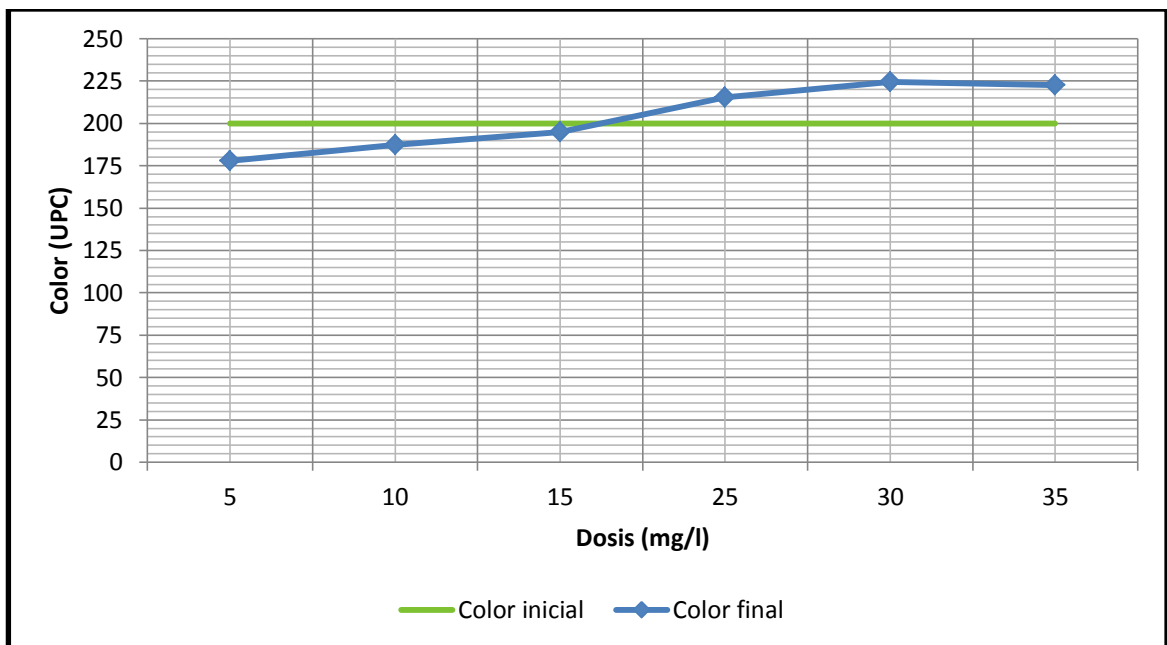


Figura 18. Comportamiento del almidón de yuca en función del color (5 a 35 mg/l).

3.1.4 Evaluación del comportamiento del almidón de yuca en el rango de 2 a 12 mg/l. El comportamiento del almidón de yuca en este rango mejoro significativamente en función de remoción de color y turbiedad a medida que las dosis van disminuyendo (fig. 19) y (fig. 20), por lo tanto es conveniente realizar ensayos con dosis menores a 2 mg/l.

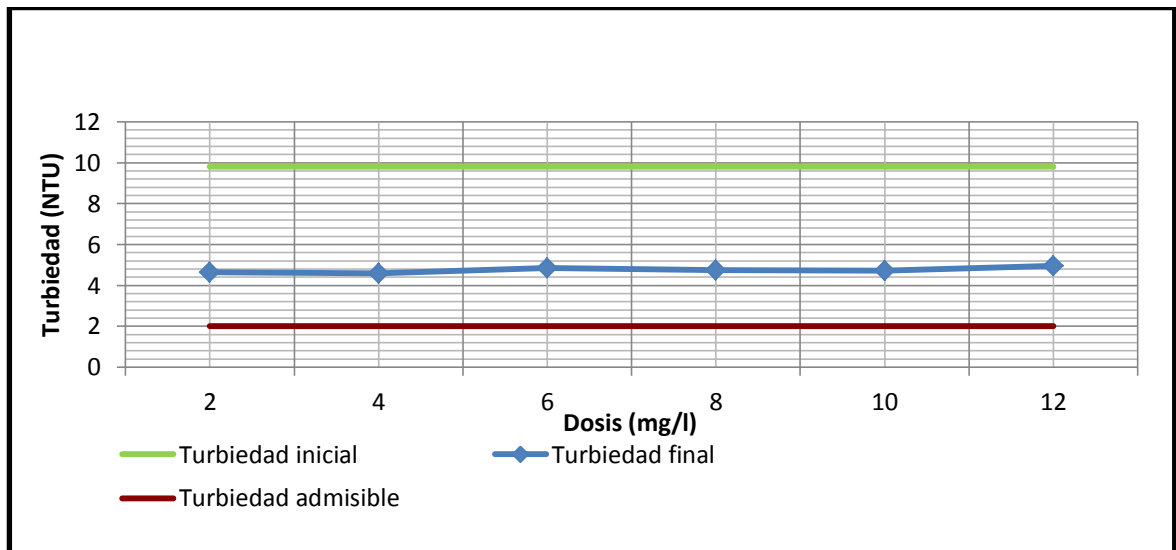


Figura 19. **Comportamiento del almidón de yuca en función de la turbiedad (2 a 12 mg/l).**

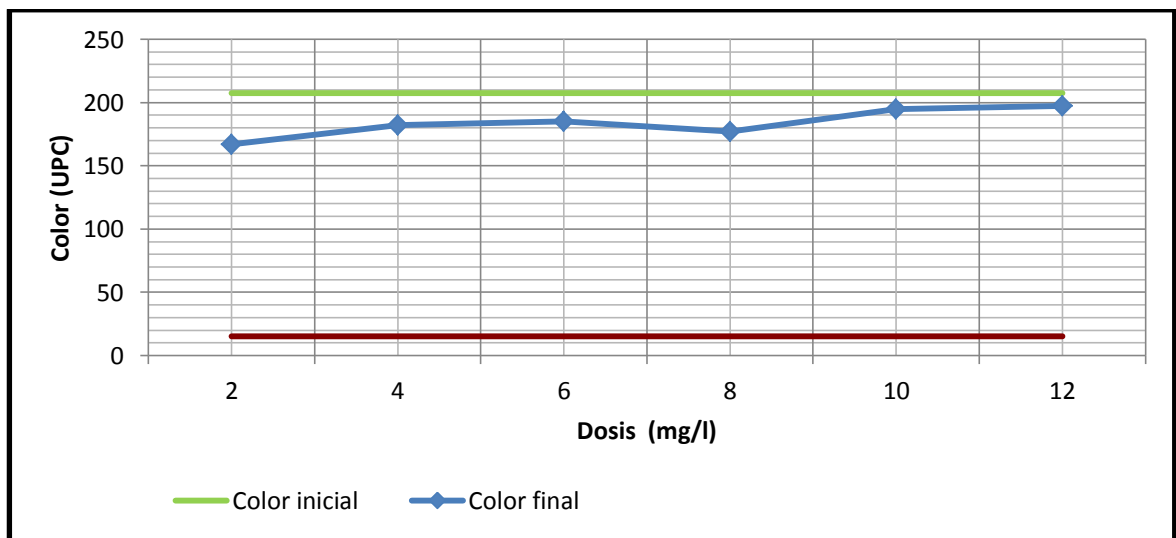


Figura 20. **Comportamiento del almidón de yuca en función del color (2 a 12 mg/l).**

Finalmente, se observa que con dosis menores a 2 mg/l (fig. 21) y (fig. 22), el nivel de remoción alcanzado no supera al obtenido anteriormente.

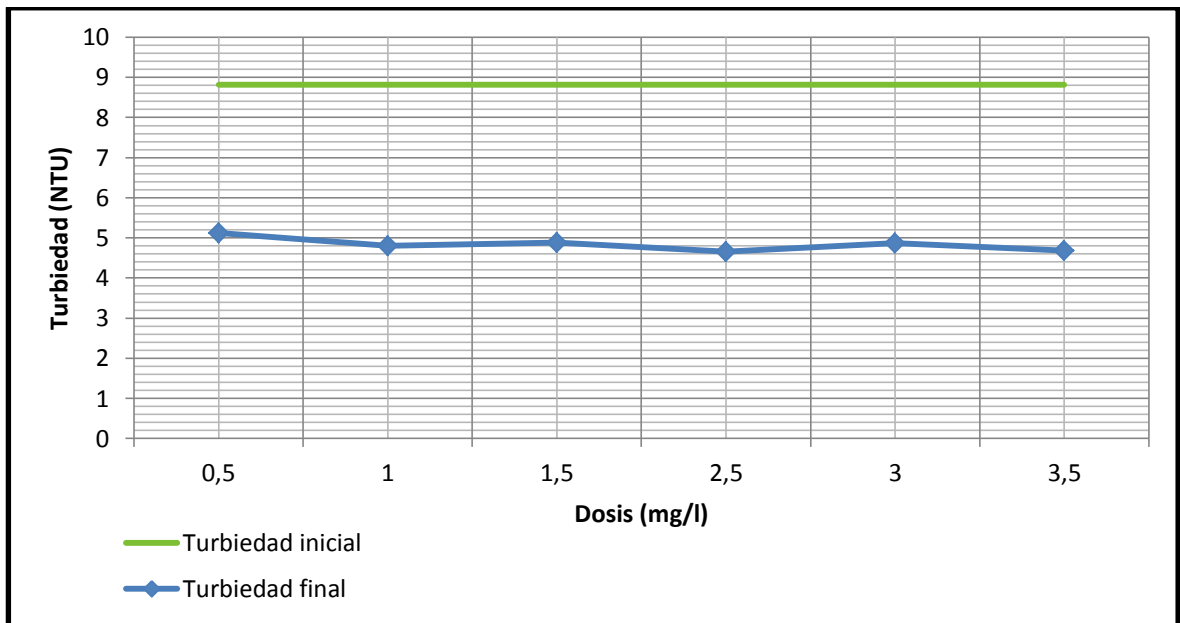


Figura 21. **Comportamiento del almidón de yuca en función de la turbiedad (0.5 a 3.5 mg/l).**

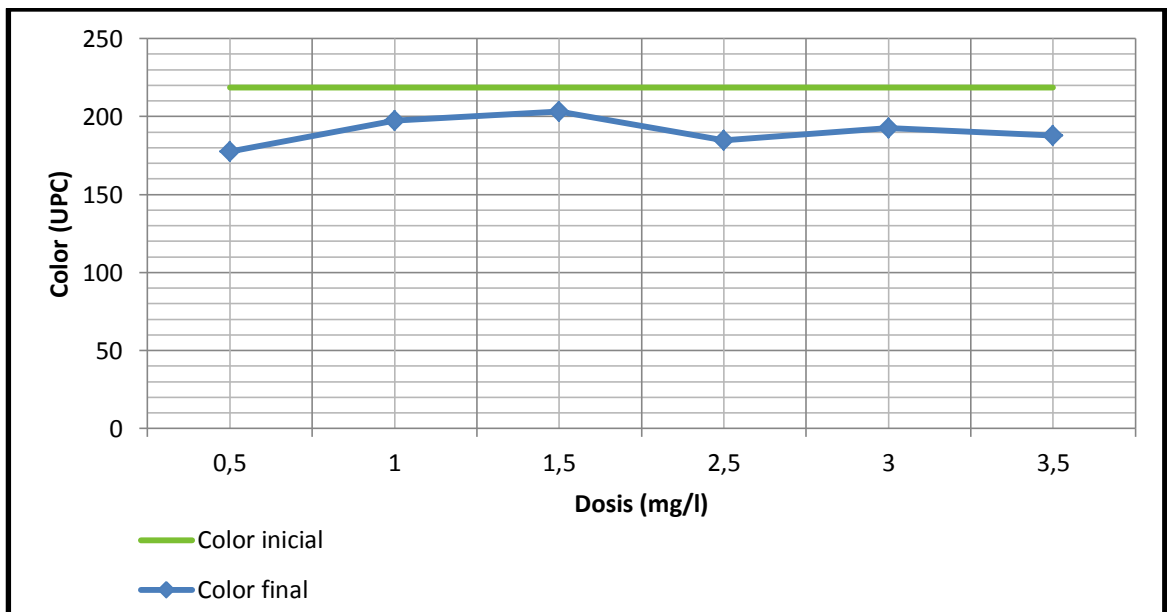


Figura 22. **Comportamiento del almidón de yuca en función del color (0.5 a 3.5 mg/l).**

3.1.5 Porcentajes de remoción del almidón de yuca. Se presenta a continuación los porcentajes de remoción máximos alcanzados por el almidón de yuca (fig. 23), los cuales son de 52.75% en función de la turbiedad y de 19.48% en función del color, con una dosis de 2 mg/l (Anexo D).

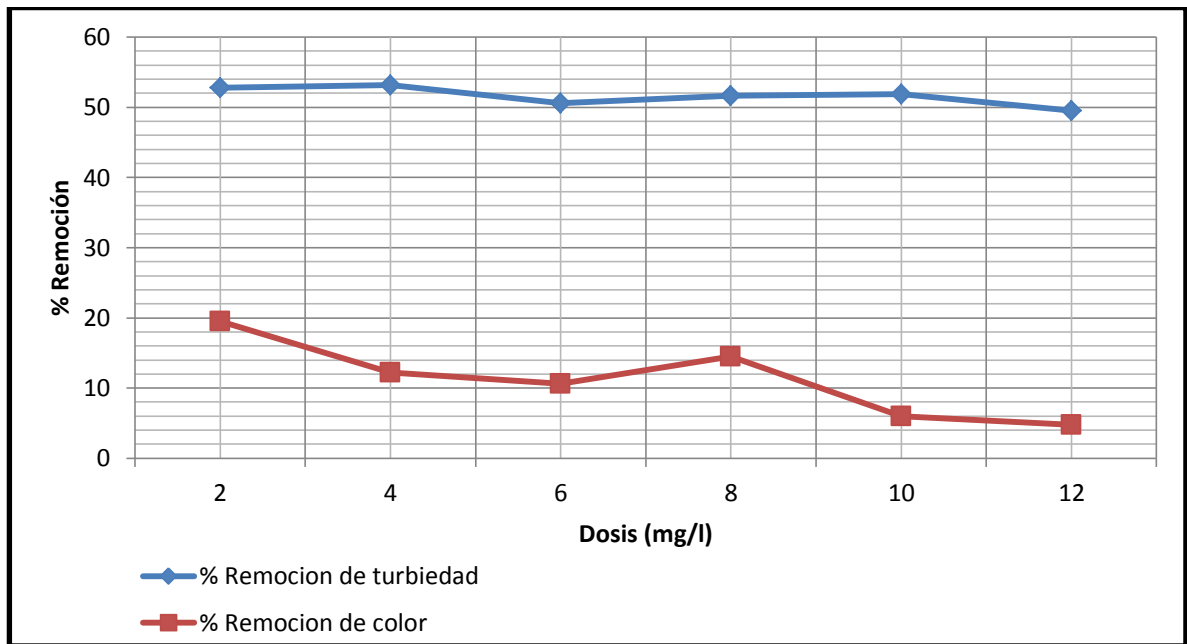


Figura 23. Porcentajes de remoción del almidón de yuca .

3.2 COMPARACIÓN DE LA EFICIENCIA ALCANZADA CON CADA COAGULANTE

Al comparar los resultados obtenidos con las dosis óptimas de sulfato de aluminio (Tabla No. 2) y almidón de yuca (Tabla No. 3), se evidencia una mayor eficiencia de remoción con el uso de sulfato de aluminio, aunque el valor final de color no cumple con el valor máximo admisible según el Decreto 1575 de 2007. Sin embargo, cabe resaltar que el almidón de yuca logra una remoción del 52.75% de turbiedad, demostrando una eficiencia de remoción aceptable en el agua de la quebrada Yamuesquer.

Tabla 2. Resultados con sulfato de aluminio

SULFATO DE ALUMINIO				
Dosis Optima (mg/l)	Parámetro	Valor Inicial	Valor Final	Valor Admisible
	Turbiedad (TNU)	6.895	1.08	2
43	Color (UPC)	190.064	42.111	15
	pH	7.17	5.29	6,5 - 9,0

Tabla 3. Resultados con almidón de yuca

ALMIDON DE YUCA				
Dosis (mg/l)	Parámetro	Valor Inicial	Valor Final	Valor Admisible
	Turbiedad (TNU)	9.82	4.64	2
2	Color (UPC)	207.32	166.935	15
	pH	6.6	6.96	6,5 - 9,0

3.3 VARIACIÓN DEL PH.

Al analizar los ensayos realizados en los rangos óptimos de cada coagulante se evalúa el efecto que cada coagulante ejerce sobre el pH.

Claramente se detecta que con el uso de sulfato de aluminio, el pH en la muestra se altera quedando por debajo del límite inferior del rango de pH establecido según el Decreto 1575 de 2007 (fig. 24).

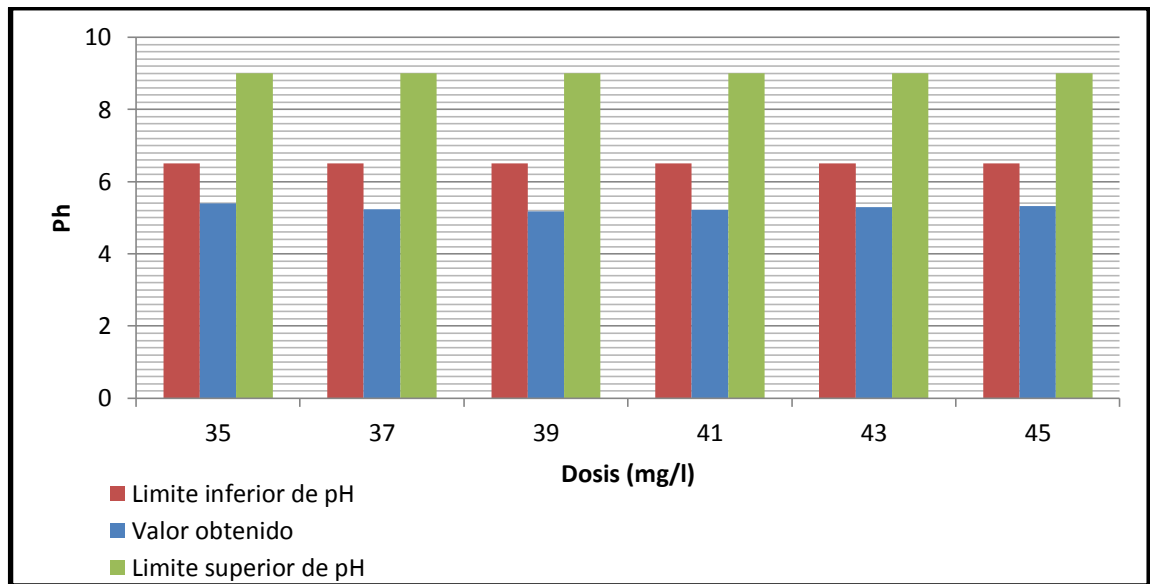


Figura 24. Variacion del pH con sulfato de aluminio

Por el contrario con el uso de almidón de yuca, el efecto que este ejerce sobre el pH en la muestra, permite que se mantenga dentro del rango establecido por el Decreto 1575 de 2007 (fig. 25).

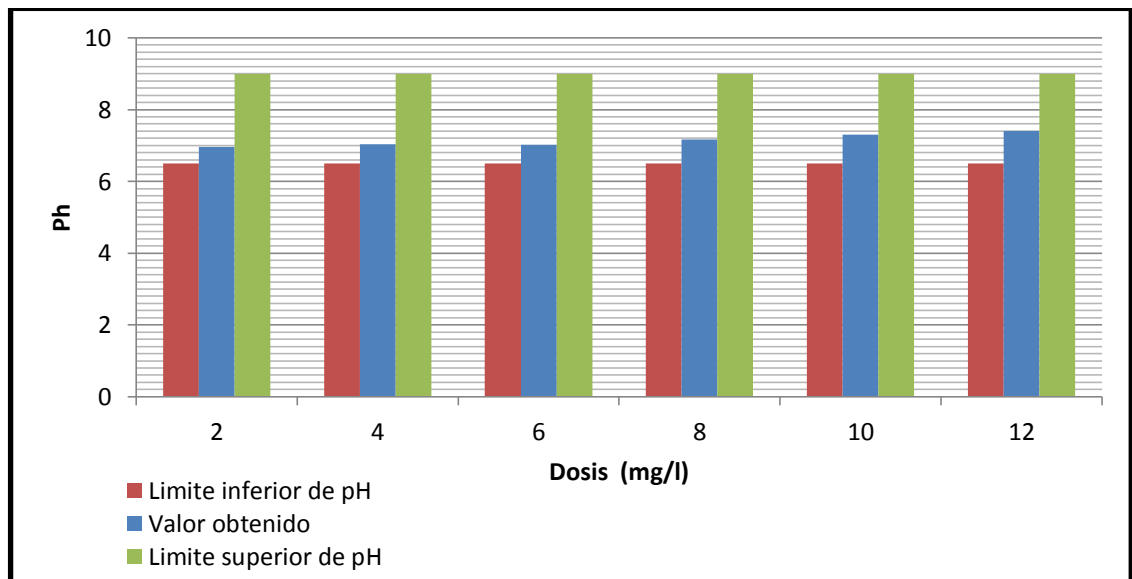


Figura 25. Variacion del pH con almidon de yuca

4. CONCLUSIONES

Observando el comportamiento del almidón de yuca en el rango de dosificación comprendido entre 20 mg/l a 120 mg/l, como se observa en la figura 12, podemos concluir que con dosis mayores a 20 mg/l la remoción de turbidez es muy poca, siendo claro un mejor comportamiento con dosis menores a esta.

Al evaluar el comportamiento del almidón de Yuca en el rango de dosificación comprendido entre 20 mg/l a 120 mg/l, como se observa en la figura 13, se evidencia que aplicando dosis mayores a 25 mg/l de almidón de yuca no se logra remoción de color, por el contrario, este le confiere color al agua, dejándola con un valor mayor al que inicialmente presenta la muestra de agua de la quebrada Yamuesquer, por lo tanto se debe evaluar su comportamiento con dosificaciones menores. Analizando el comportamiento del sulfato de aluminio en el rango de dosificación comprendido entre 20 mg/l a 120 mg/l, se evidencia que con dosis mayores a 50 mg/l de coagulante, los niveles de remoción obtenidos permanecen constantes, por lo tanto se selecciona como rango óptimo para el sulfato de aluminio el comprendido entre 35mg/l a 45mg/l. Después de analizar el comportamiento del almidón de yuca con dosificaciones menores a 25 mg/l, se evidencia que la eficiencia del almidón de yuca en función de la turbiedad aumenta significativamente como se observa en la figura 17, y en función del color manifiesta un efecto positivo, logrando remover color de la muestra.

El análisis de los resultados obtenidos permite establecer que el almidón de yuca alcanzo una eficiencia aceptable para el tipo de agua analizada, pues, pese a no alcanzar los parámetros establecidos en el Decreto 1575 de 2007, logra remover un porcentaje de turbidez de (52.75%) y de color (19.48%).

Al comparar los niveles de remoción obtenidos con cada coagulante se evidencia una mayor eficiencia con el uso de sulfato de aluminio, sin embargo, este no logro remover un porcentaje de color que cumpla con el valor máximo admisible según el Decreto 1575 de 2007. Esto se debe a que el agua analizada presenta un color muy elevado el cual no puede ser tratado simplemente con el proceso coagulación-floculación. El almidón de yuca como coagulante natural no le confirió ningún olor o sabor al agua tratada, además como se ve en la figura 25 el efecto causado por su uso en función del pH es satisfactorio ya que este se mantiene dentro del rango establecido por el Decreto 1575 de 2007, una vez realizada su aplicación. Después del tratamiento con el sulfato de aluminio, tal y como se observa en la figura 25, el pH de la muestra disminuye quedando fuera del rango que exige el decreto 1575 de 2007, por lo cual se debe considerar estudiar el control de este factor ya que es muy importante en el tratamiento de aguas.

5. RECOMENDACIONES

Continuar con la investigación de almidón de yuca para tratamiento del agua de la quebrada Yamuesquer, utilizándolo como auxiliar de coagulación y así lograr remover una mayor cantidad de color.

Estudiar la eficiencia del almidón de yuca como coagulante natural en fuentes de agua cuyos valores de color no sean tan elevados.

Dar continuidad a futuras investigaciones enfocadas en la búsqueda de nuevos productos naturales con propiedades coagulantes para dar mas alternativas a la hora de elegir un coagulante en tratamiento de agua potable.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALARCÓN M, Freddy & DUFOUR, Dominique. Almidón agrio de yuca en Colombia: producción y recomendaciones. -- Cali, Colombia: Centro Internacional de Agricultura Tropical; Montpellier, Francia: Centre de coopération internationale en recherche agronomique pour le développement, Département d'amélioration des méthodes pour l'innovation scientifique, 1998

BOLAÑOS ALVEAR, Dayan Vanesa. Guía: Ensayo de prueba de jarras – determinación de dosis óptima de coagulante. Bogotá: s.n., 2014.

CAMPOS, José Roberto & DI BERNARDO, Luis. Uso de polímeros naturales en el tratamiento de agua para abastecimiento. Bogotá: s.n., 1991

CARRILLO GUZMÁN, Luis Enrique & PÉREZ GARCÍA, Rafael. Uso de coagulantes naturales para la remoción de color y turbidez en tratamiento de agua potable. Bogotá: s.n., 2012.

CASTRILLON BEDOYA Daniela & GIRALDO María de los Ángeles. Determinación de las dosis óptimas de sulfato de aluminio granulado tipo B en función de la turbiedad y el color para la potabilización del agua en la planta de tratamiento en villa santana. 2012.

CINARA, INSTITUTO DE INVESTIGACION Y DESARROLLO EN ABASTECIMIENTO DE AGUA, SANEAMIENTO AMBIENTAL Y CONSERVACION DEL RECURSO HIDRICO. Boletín de Noticias Agua & Saneamiento, Edición No. 112, octubre de 2013.

GARCÍA FAYOS, Beatriz. Metodología de extracción in situ de coagulantes natural para la clarificación de agua superficial. Aplicación en países en vías de desarrollo. Tesis de master, Bogotá: s.n.2007.

GUZMÁN, Luis, VILLABONA, Ángel, TEJADA, Candelaria & GARCÍA, Rafael. Reducción de la turbidez del agua usando coagulantes naturales: una revisión, rev.udcaactual.divulg.cient. vol.16 no.1 Bogotá: s.n., 2013.

MARÍN HERBERT, Elidet. Extracción, caracterización y modificación de almidón de plátano (*musa sapientum*) variedad roatán, producto de desecho post-cosecha de la zona de vega de alatorre veracruz”, Tesis, 2013.

MENESES, Juliana, CORRALES, Catalina María & VALENCIA, Marco. Síntesis y caracterización de un polímero biodegradable a partir del almidón de yuca, Revista

EIA, ISSN 1794-1237 Número 8, p. 57-67. Diciembre 2007, Escuela de Ingeniería de Antioquia, Medellín (Colombia)

MONTOYA HENAO, Susana. Industrialización de la Yuca: Obtención de almidón nativo y sus aplicaciones. Bogotá: s.n., s.f.

RESTREPO OSORNO, Hernán Alonso. Evaluación del proceso de coagulación – floculación de una planta de tratamiento de agua potable. Bogotá: s.n., 2009.

SALAZAR, Roberto. Plantas de Potabilización. Pasto, Nariño: s.n. 2012.

SOLÍS SILVAN Rudy, LAINES CANEPA José Ramón & HERNÁNDEZ BARAJAS José Roberto. Mezclas con potencial coagulante para clarificar aguas superficiales. Bogotá: s.n., 2012

VARGAS CAMARENO, M & ROMERO ESQUIVEL, L.G. (2006). Aprovechamiento de algunos materiales en el desarrollo de coagulantes y floculantes para el tratamiento de aguas en Costa Rica. Tecnología en Marcha, (19-4),

ANEXOS

ANEXO A: CARACTERIZACIÓN FÍSICOQUÍMICA Y MICROBIOLÓGICA DEL AGUA DE LA QUEBRADA YAMUESQUER

Página 1 de 1

FECHA: DIA: 17 MES: 04 AÑO: 2013

Una vez realizado el recorrido de la fuente: Yamuesquer ubicada en el municipio: Potosí, localidad: Yamuesquer, se determina que los factores de riesgo que inciden en la calidad de agua de dicha fuente deben ser confirmados bajo el análisis de los siguientes parámetros:

LISTADO DE PARAMETROS	PARAMETROS A EVALUAR	LISTADO DE PARAMETROS	PARAMETROS A EVALUAR	LISTADO DE PARAMETROS	PARAMETROS A EVALUAR
FÍSICO-QUÍMICOS		FÍSICO-QUÍMICOS		FÍSICO-QUÍMICOS	
Color Aparente	X	Selenio		Molibdeno	
Conductividad	X	Trihalometanos Totales		Sulfatos	X
pH	X	Hidrocarburos Aromáticos Policíclicos (HAP)		Zinc	
Turbiedad	X	Carbono Orgánico Total		Fosfatos	
Antimonio		Nitritos	X	Plagucidas presencia cultivo de: _____ Plagucidas Organofosforados y carbamatos inhibidores de colinesterasa en agua.	
Arsenico		Nitratos	X		
Bario		Fluoruros	X	DBO5	X
Cadmio		Calcio		Oxigeno Disuelto	X
Cianuro Libre y Disociable		Alcalinidad Total	X	Fenoles	
Cobre		Cloruros		Boro	
Cromo Total		Aluminio		MICROBIOLÓGICOS	
Mercurio		Dureza Total	X	Giardia	
Níquel		Hierro Total	X	Criptosporidium	
Plomo		Magnesio		Coliformes Totales	X
Otros		Manganeso		Coliformes Fecales	X

NOMBRE Y FIRMA DEL FUNCIONARIO
Programa Calidad de Agua

COMPROMETIDOS CON LA CALIDAD

www.ids.n.gov.co

Calle 15 No. 28 - 41 Plazuela de Bomboná - San Juan de Pasto - Nariño - Colombia



LABORATORIOS DEL VALLE

Su salud en buenas manos en un mundo de servicios!

PBX: 731 3838 - Telefax: 731 0460 - Cels.316 823 0730 - 320 569 1294 - 300 617 1722 - Carrera 31C N° 19 - 19
www.labovalle.com - Email: labovalle@gmail.com NIT. 30712570 - 1 - Pasto - Nariño - Colombia

Solicitud : 03001586	Fecha Recepción : 2013-08-16-08:31:44
Cliente : ALCALDIA MUNICIPAL DE POTOSI	Fecha Impresión : 2014-05-30 09:34:38.
Identificación : 800037232-4	Remite : MEDICOS VARIOS
Convenio : ROBERTO IVAN ROSERO VOSMEDIANO	Telefono : 7263084
Dirección : CL7 PARQUE INMACULADA POTOSI	Fecha Toma Muestra : 28/03/2014 HORA 11:00AM
Tipo Muestra : AGUA PARA CONCESION	Punto Toma Muestra : F YAMUESQUER L YAMUESQUER
Tomada Por : RICARDO NARVAEZ	Observaciones : 1084

ANALISIS	RESULTADO	UNIDADES	VALORES DE REFERENCIA
-----------------	------------------	-----------------	------------------------------

MICROSCOPIA

COLIFORMES TOTALES.....: 23000

Por: 100ml

Método.....: Numero Mas Probable (NMP)

Técnica Sustrato Definido

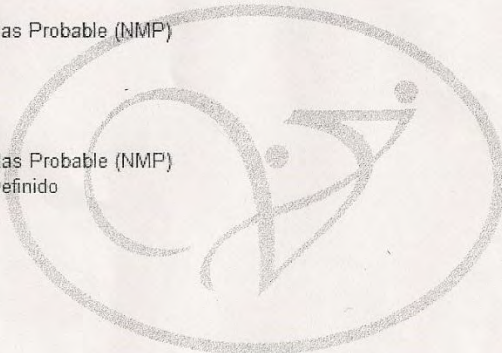
Escherichia coli.....: 23000

Por.: 100ml

Metodo.....: Numero Mas Probable (NMP)

Técnica.....: Sustrato Definido

EDNA LUCIA ZARAMA PEPINOSA
BACTERIOLOGA - T.P. 1693-03



Grupo del Valle



**Laboratorio Clínico de
Alta Complejidad**
3er Nivel

* El resultado es valido unicamente para las muestras analizadas. *
** Para verificar la conformidad del resultado, ver los limites admisibles segun norma. **



LABORATORIOS DEL VALLE

Su salud en buenas manos en un mundo de servicios!

PBX: 731 3838 - Telefax: 731 0460 - Cels. 316 823 0730 - 320 569 1294 - 300 617 1722 - Carrera 31C N° 19 - 19
www.labovalle.com - Email: labovalle@gmail.com NIT. 30712570 - 1 - Pasto - Nariño - Colombia

Identificación	: 03001586	Fecha Recepción	: 2013-08-16-08:31:44
Cliente	: ALCALDIA MUNICIPAL DE POTOSI	Fecha Impresión	: 2014-05-30 09:34:38.
Identificación	: 800037232-4	Remite	: MEDICOS VARIOS
Origen	: ROBERTO IVAN ROSERO VOSMEDIANO	Telefono	: 7263084
Dirección	: CL7 PARQUE INMACULADA POTOSI	Fecha Toma Muestra	: 28/03/2014 HORA 11:00AM
Tipo Muestra	: AGUA PARA CONCESION	Punto Toma Muestra	: F YAMUESQUER L YAMUESQUER
Formada Por	: RICARDO NARVAEZ	Observaciones	: 1084

ANALISIS	RESULTADO	UNIDADES	VALORES DE REFERENCIA
----------	-----------	----------	-----------------------

ANALISIS FISICOQUIMICO

COLOR APARENTE.....	145.0	UPC	
Metodo.....: Fotométrico			
pH.....	8.12	Unidades de pH	
Metodo.....: Potenciometro			
CONDUCTIVIDAD.....	12.66	uSiemens/ml	
Metodo.....: Potenciométrico			
TURBIDEZ.....	2.06	NTU	
Metodo.....: Turbidimetrico			
NITRITOS.....	0.002	mg/L NO2-	
Metodo.....: Fotométrico			
NITRATOS.....	0.4	mg/L NO3-	
Metodo.....: Fotométrico			
FLUORUROS.....	0.0	mg/L F-	
Metodo.....: Fotométrico			
ALCALINIDAD.....	12.0	mg/L CaCO3	
Metodo.....: Volumétrico			
CLORUROS.....	4.9	mg/L Cl-	
Metodo.....: Volumétrico			
HIERRO.....	0.47	mg/L Fe	
Metodo.....: Fotométrico			

Grupo del Valle



**Laboratorio Clínico de
Alta Complejidad**
Ser Nivel

* El resultado es valido unicamente para las muestras analizadas. *
** Para verificar la conformidad del resultado, ver los limites admisibles segun norma. **



LABORATORIOS DEL VALLE

Su salud en buenas manos en un mundo de servicios!

PBX: 731 3838 - Telefax: 731 0460 - Cels. 316 823 0730 - 320 569 1294 - 300 617 1722 - Carrera 31C N° 19 - 19
www.labovalle.com - Email: labovalle@gmail.com NIT. 30712570 - 1 - Pasto - Nariño - Colombia

Identificación	: 03001586	Fecha Recepción	: 2013-08-16-08:31:44
Cliente	: ALCALDIA MUNICIPAL DE POTOSI	Fecha Impresión	: 2014-05-30 09:34:38.
Identificación	: 800037232-4	Remite	: MEDICOS VARIOS
Convenio	: ROBERTO IVAN ROSERO VOSMEDIANO	Telefono	: 7263084
Dirección	: CL7 PARQUE INMACULADA POTOSI	Fecha Toma Muestra	: 28/03/2014 HORA 11:00AM
Punto Muestra	: AGUA PARA CONCESION	Punto Toma Muestra	: F YAMUESQUER L YAMUESQUER
Tomado Por	: RICARDO NARVAEZ	Observaciones	: 1084

ANALISIS	RESULTADO	UNIDADES	VALORES DE REFERENCIA
----------	-----------	----------	-----------------------

ANALISIS FISICOQUIMICO

SULFATOS.....	0.0	mg/L SO4-2
Metodo.....	Fotométrico	

DEMANDA BIOQUIMICA DE OXIGENO.....	24.0	mg/L O2
Metodo.....	Fotométrico	

OXIGENO DISUELTO.....	1.8	mg/L O2
Metodo.....	Volumétrico	

Maria Angelica Mera C.
ING. MARIA ANGELICA MERA
ANALISTA QUIMICA
EQ - 4574

MARIA ANGELICA MERA CORDOSA
QUIMICO TP

DUREZA TOTAL.....	26.0	ppm CaCO3
Metodo.....	Volumétrico	

Maria Angelica Mera C.
ING. MARIA ANGELICA MERA
ANALISTA QUIMICA
EQ - 4574

MARIA ANGELICA MERA CORDOSA
QUIMICO TP

Grupo del Valle

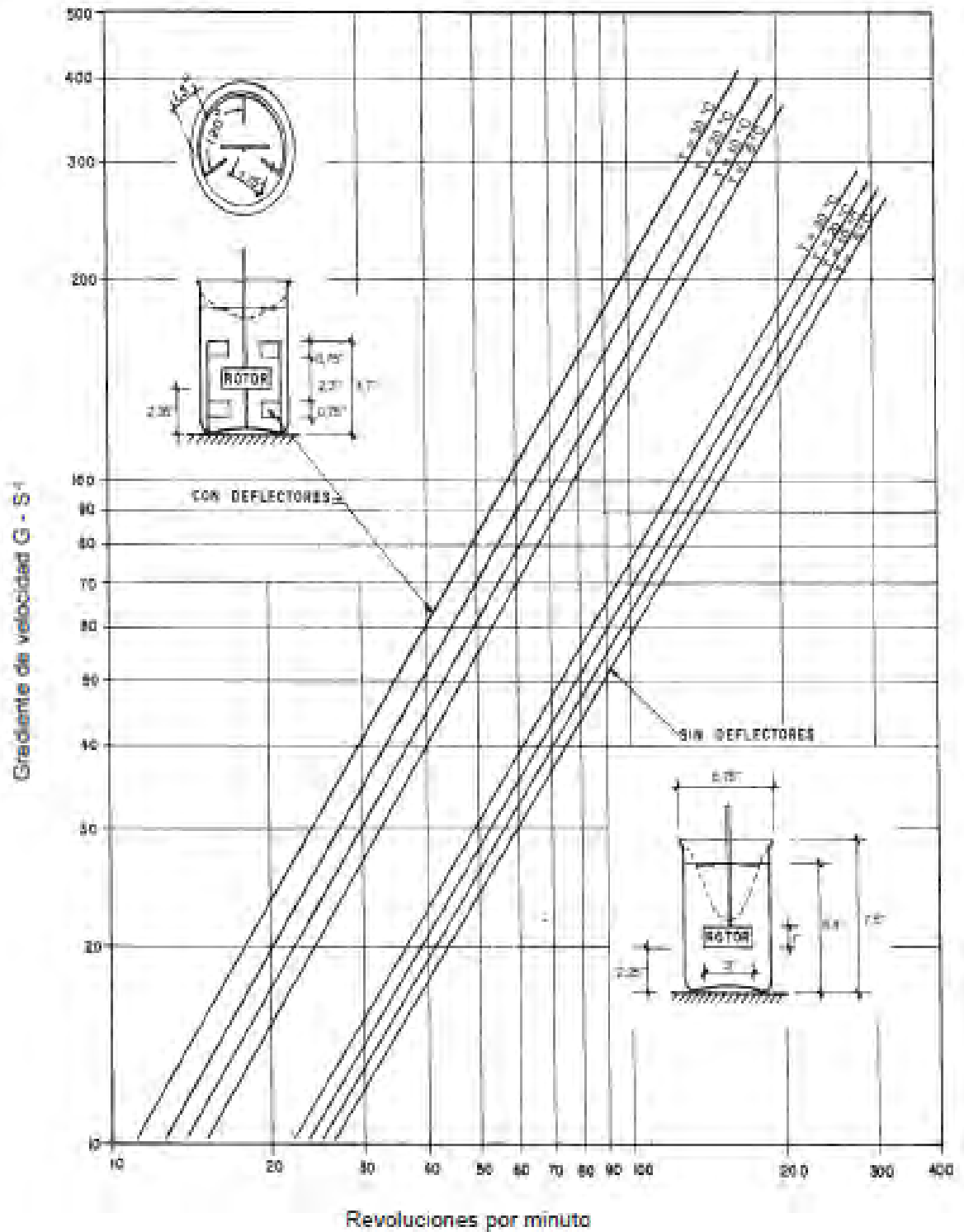


**Laboratorio Clínico de
Alta Complejidad**

3er Nivel

* El resultado es valido unicamente para las muestras analizadas. *
** Para verificar la conformidad del resultado, ver los limites admisibles segun norma. **

ANEXO B: ABACO QUE RELACIONA GRADIENTE DE VELOCIDAD CON LAS REVOLUCIONES POR MINUTO DE UN EQUIPO DE PRUEBA DE JARRAS CON RECIPIENTES DE 2 LITROS. JARRAS DE SECCIÓN CIRCULAR.



ANEXO C. RESULTADOS ENSAYOS CON SULFATO DE ALUMINIO.

Ensayo No. 1

Parámetros iniciales de la muestra ensayo No.1

Ensayo #	Fecha Ensayo	Origen muestra	Fecha muestreo	Turbiedad inicial (NTU)	Alcalinidad total (mg/l)		Color Aparente (UPC)					pH	Temp. °C	
					Gasto (ml)	Alcalinidad	ABS	0,114	0,114	0,114	0,114			0,114
							Promedio ABS: 0,114							
1	17/09/2014	Q. Yamuesquer	16/09/2014	7,2	0,5	10	Color resultante: 208,788					7,3	20	

Registro de parámetros obtenidos y % remoción ensayo No.1

VASO	DOSIS (mg/l)	Observación visual			Parámetros fisicoquímicos						% Remo. Turbiedad	% Remo. Color
		Formación floc (seg)	Calidad		Turbiedad (NTU)	Color verdadero (UPC)	GASTO H2SO4(ml)	Alcalinidad (mg/l)	pH	Temp. °C		
			Indice de Willcomb (Cuadro 1)	Sobrenadante (Cuadro 2)								
1	20	No	2	2	4,7	118,474	0,6	12	5,87	20,6	34,72	43,26
2	40	90	6	5	1,285	38,807	0,4	8	5,4	20,5	82,15	81,41
3	60	100	6	5	1,36	46,884	0,5	10	5,36	20,5	81,11	77,54
4	80	120	4	4	1,52	43,947	0,4	8	5,33	20,6	78,89	78,95
5	100	100	6	5	1,35	44,314	0,4	8	5,33	20,7	81,25	78,78
6	120	100	6	5	1,325	43,212	0,3	6	5,28	211,4	81,60	79,30

Ensayo No. 2

Parámetros iniciales de la muestra ensayo No.2

Ensayo #	Fecha Ensayo	Origen muestra	Fecha muestreo	Turbiedad inicial (NTU)	Alcalinidad total (mg/l)		Color Aparente (UPC)					pH	Temp. °C	
					Gasto (ml)	Alcalinidad	ABS	0,106	0,105	0,107	0,107			0,107
							Promedio ABS: 0,106							
2	17/09/2014	Q. Yamuesquer	16/09/2014	7,025	0,5	10	Color resultante: 194,837					7,35	19	

Registro de parámetros obtenidos y % remoción ensayo No.2

VASO	DOSIS (mg/l)	Observación visual			Parámetros fisicoquímicos						% Remo. Turbiedad	% Remo. Color
		Formación Floc (seg)	Calidad		Turbiedad (NTU)	Color verdadero (UPC)	GASTO H2SO4 (ml)	Alcalinidad (mg/l)	pH	Temp. °C		
			Indice de Willcomb (Cuadro 1)	Sobrenadante (Cuadro 2)								
1	130	No	2	2	4,92	62,303	0,5	10	5,7	19,6	29,96	68,02
2	140	No	2	2	4,240	45,048	0,6	12	5,27	19,6	39,64	76,88
3	150	120	2	3	3,92	57,898	0,6	12	5,14	19,6	44,20	70,28
4	160	120	2	3	3,95	52,391	0,7	14	5,19	19,5	43,77	73,11
5	170	120	2	3	3,62	50,555	0,5	10	5,19	19,4	48,47	74,05
6	180	120	2	3	3,71	50,555	0,6	12	5,19	19,4	47,19	74,05

Ensayo No. 3

Parámetros iniciales de la muestra ensayo No.3

Ensayo #	Fecha Ensayo	Origen muestra	Fecha muestreo	Turbiedad inicial (NTU)	Alcalinidad total (mg/l)		Color Aparente (UPC)					pH	Temp. °C	
					Gasto (ml)	Alcalinidad	ABS	0,103	0,102	0,104	0,105			0,105
							Promedio ABS: 0,104							
3	19/09/2014	Q. Yamuesquer	16/09/2014	6,895	0,6	12	Color resultante: 190,064					7,17	17,9	

Registro de parámetros obtenidos y % remoción ensayo No.3

VASO	DOSIS (mg/l)	Observación visual			Parámetros fisicoquímicos						% Remo. turbiedad	% Remo. color
		Formación Floc (seg)	Calidad		Turbiedad (NTU)	Color verdadero (UPC)	GASTO H2SO4 (ml)	Alcalinidad (mg/l)	pH	Temp. °C		
			Indice de Willcomb (Cuadro 1)	Sobrenadante (Cuadro 2)								
1	35	No	6	5	1,24	52,024	0,5	10	5,40	19,3	82,02	72,63
2	37	90	6	5	1,255	51,656	0,3	6	5,23	19,5	81,80	72,82
3	39	90	6	5	1,335	56,062	0,4	8	5,18	19,6	80,64	70,50
4	41	90	6	5	1,265	48,719	0,3	6	5,22	19,5	81,65	74,37
5	43	90	6	5	1,08	42,111	0,4	8	5,29	19,6	84,34	77,84
6	45	90	6	5	1,32	48,352	0,4	8	5,32	19,8	80,86	74,56



Dosis Óptima de Sulfato de Aluminio

Registro de color filtrado de la dosis optima

ABSORBANCIA					ABS prom	Color Real
0,003	0,006	0,006	0,006	0,006	0,0054	9,437

ANEXO D. RESULTADOS ENSAYOS CON ALMIDÓN DE YUCA.

Ensayo No. 1

Parámetros iniciales de la muestra ensayo No.1

Ensayo #	Fecha Ensayo	Origen muestra	Fecha muestreo	Turbiedad inicial (NTU)	Alcalinidad total (mg/l)		Color Aparente (UPC)					pH	Temp. °C	
					Gasto (ml)	Alcalinidad	ABS	0,101	0,102	0,105	0,106			0,107
							Promedio ABS: 0,104							
1	20/09/2014	Q. Yamuesquer	16/09/2014	9,645	0,7	14	Color resultante: 190,799					6,49	18,8	

Registro de parámetros obtenidos y % remoción ensayo No.1

VASO	DOSIS (mg/l)	Observación visual			Parámetros fisicoquímicos						% Remo. Turbiedad	% Remo. Color
		Formación floc (seg)	Calidad		Turbiedad (NTU)	Color verdadero (UPC)	GASTO H2SO4 (ml)	Alcalinidad (mg/l)	pH	Temp. °C		
			Indice de Willcomb (Cuadro 1)	Sobrenadante (Cuadro 2)								
1	20	No	2	2	5,32	194,470	0,4	8	7,44	19,2	44,84	-1,92
2	40	No	2	2	5,810	232,284	0,8	16	8,3	19,4	39,76	-21,74
3	60	No	2	2	5,92	235,589	0,9	18	8,81	19,2	38,62	-23,47
4	80	No	2	2	6,65	250,274	0,9	18	9,27	19,5	31,05	-31,17
5	100	No	2	2	6,87	255,046	1,1	22	9,43	19,6	28,77	-33,67
6	120	No	2	2	7,15	262,389	1,2	24	9,55	19,6	25,87	-37,52

Ensayo No. 2

Parámetros iniciales de la muestra ensayo No.2

Ensayo #	Fecha Ensayo	Origen muestra	Fecha muestreo	Turbiedad inicial (NTU)	Alcalinidad total (mg/l)		Color Aparente (UPC)					pH	Temp. °C	
					Gasto (ml)	Alcalinidad	ABS	0,109	0,109	0,110	0,110			0,108
							Promedio ABS: 0,109							
2	20/09/2014	Q. Yamuesquer	16/09/2014	9,645	0,5	10	Color resultante: 199,977					7,64	18,5	

Registro de parámetros obtenidos y % remoción ensayo No.2

VASO	DOSIS (mg/l)	Observación visual			Parámetros fisicoquímicos						% Remo. Turbiedad	% Remo. Color
		Formación floc (seg)	Calidad		Turbiedad (NTU)	Color verdadero (UPC)	GASTO H2SO4 (ml)	Alcalinidad (mg/l)	pH	Temp. °C		
			Indice de Willcomb (Cuadro 1)	Sobrenadante (Cuadro 2)								
1	5	No	2	3	4,425	177,949	0,3	6	8,47	18,8	40,76	11,02
2	10	No	2	3	4,755	187,495	0,4	8	8,08	18,7	36,35	6,24
3	15	No	2	2	4,905	194,837	0,5	10	8,15	18,5	34,34	2,57
4	25	No	2	2	5,09	215,396	0,6	12	8,33	18,6	31,86	-7,71
5	30	No	2	2	5,175	224,575	0,7	14	8,42	18,5	30,72	-12,30
6	35	No	2	2	5,265	222,739	0,7	14	8,67	18,5	29,52	-11,38

Ensayo No. 3

Parámetros iniciales de la muestra ensayo No.3

Ensayo #	Fecha Ensayo	Origen muestra	Fecha muestreo	Turbiedad inicial (NTU)	Alcalinidad total (mg/l)		Color Aparente (UPC)					pH	Temp. °C	
					Gasto (ml)	Alcalinidad	ABS	0,114	0,115	0,114	0,112			0,111
							Promedio ABS: 0,113							
3	20/09/2014	Q. Yamuesquer	16/09/2014	9,82	0,4	8	Color resultante: 207,320					6,6	17,7	

Registro de parámetros obtenidos y % remoción ensayo No.3

VASO	DOSIS (mg/l)	Observación visual			Parámetros fisicoquímicos						% Remo. Turbiedad	% Remo. Color
		Formación floc (seg)	Calidad		Turbiedad (NTU)	Color verdadero (UPC)	GASTO H2SO4 (ml)	Alcalinidad (mg/l)	pH	Temp. °C		
			Indice de Willcomb (Cuadro 1)	Sobrenadante (Cuadro 2)								
1	2	No	4	3	4,64	166,935	0,4	8	6,96	19,3	52,75	19,48
2	4	No	4	3	4,600	181,988	0,4	8	7,04	19,2	53,16	12,22
3	6	No	4	3	4,85	185,292	0,5	10	7,02	19,1	50,61	10,63
4	8	No	4	3	4,745	177,215	0,5	10	7,17	19,2	51,68	14,52
5	10	No	4	3	4,725	194,837	0,5	10	7,3	19,3	51,88	6,02
6	12	No	4	3	4,96	197,407	0,5	10	7,4	19,8	49,49	4,78

Dosis Óptima de Sulfato de Aluminio

Registro de color filtrado dosis optima

ABSORBANCIA					ABS prom	Color Real
0,027	0,026	0,027	0,029	0,028	0,0274	49,821

Ensayo No. 4

Parámetros iniciales de la muestra ensayo No.4

Ensayo #	Fecha Ensayo	Origen muestra	Fecha muestreo	Turbiedad inicial (NTU)	Alcalinidad total (mg/l)		Color Aparente (UPC)					pH	Temp. °C	
					Gasto (ml)	Alcalinidad	ABS	0,120	0,118	0,121	0,119			0,119
							Promedio ABS: 0,119							
4	20/09/2014	Q. Yamuesquer	16/09/2014	8,82	0,5	10	Color resultante: 218,701					7,15	18,4	

Registro de parámetros obtenidos y % remoción ensayo No.3

VASO	DOSIS (mg/l)	Observación visual			Parámetros fisicoquímicos						% Remo. Turbiedad	% Remo. Color
		Formación floc (seg)	Calidad		Turbiedad (NTU)	Color verdadero (UPC)	GASTO H2SO4 (ml)	Alcalinidad (mg/l)	pH	Temp. °C		
			Indice de Willcomb (Cuadro 1)	Sobrenadante (Cuadro 2)								
1	0,5	No	4	3	5,125	177,582	0,5	10	7,08	19,4	41,89	18,80
2	1	No	4	3	4,805	197,407	0,5	10	7,22	19,5	45,52	9,74
3	1,5	No	4	3	4,885	203,281	0,4	8	7,14	19,3	44,61	7,05
4	2,5	No	4	3	4,65	184,558	0,4	8	7,16	19,6	47,28	15,61
5	3	No	4	3	4,87	192,634	0,4	8	7,15	19,5	44,78	11,92
6	3,5	No	4	3	4,675	187,862	0,4	8	7,21	19,5	47,00	14,10

Ensayo comparación entre la dosis optima de sulfato de aluminio y almidón de yuca.

Ensayo No. 1

Parámetros iniciales de la muestra ensayo comparativo

Ensayo #	Fecha Ensayo	Origen muestra	Fecha muestreo	Turbiedad inicial (NTU)	Alcalinidad total (mg/l)		Color Aparente (UPC)					pH	Temp. °C
					Gasto (ml)	Alcalinidad	ABS	0,115	0,113	0,115	0,114		
							Promedio ABS: 0,114						
1	20/09/2014	Q. Yamuesquer	16/09/2014	9,805	0,4	8	Color resultante: 209,155					7,34	18,5

Registro de parámetros obtenidos y % remoción ensayo comparativo

VASO	DOSIS (mg/l)	Observación visual			Parámetros fisicoquímicos						% Remo. Turbiedad	% Remo. Color
		Formación floc (seg)	Calidad		Turbiedad (NTU)	Color verdadero (UPC)	GASTO H2SO4 (ml)	Alcalinidad (mg/l)	pH	Temp. °C		
			Indice de Willcomb (Cuadro 1)	Sobrenadante (Cuadro 2)								
1	43	No	6	5	0,99	45,782	0,3	6	5,38	19,6	89,90	78,11
2	43	No	6	5	0,975	45,048	0,4	8	5,35	19,6	90,06	78,46
3	43	No	6	5	0,98	46,150	0,4	8	5,32	19,5	90,01	77,94
4	2	No	4	3	5,000	179,051	0,5	10	6,55	19,6	49,01	14,39
5	2	No	4	3	4,9	169,872	0,5	10	6,6	19,5	50,03	18,78
6	2	No	4	3	4,92	171,708	0,5	10	6,6	19,6	49,82	17,90

ANEXO E. GLOSARIO

AGITACIÓN: ver mezclado.

AGITACIÓN MECÁNICA: Movimiento obtenido mediante dispositivos mecánicos (paletas, aspas, etc.) para producir turbulencia.

ANÁLISIS FÍSICO-QUÍMICO DEL AGUA: Pruebas de laboratorio que se efectúan a una muestra para determinar sus características físicas, químicas o ambas.

CLARIFICACION: Es referida a la obtención de una fase líquida clara, sin sólidos en suspensión.

COAGULACIÓN: Se refiere al proceso de desestabilización de las partículas suspendidas de modo que se reduzcan las fuerzas de separación entre ellas.

COLOIDE: Son suspensiones de partículas en un medio molecular. Para que estas suspensiones sean consideradas coloides, las partículas han de tener dimensiones en el intervalo 10 nm-10 μ m. Son sistemas ubicuos en la naturaleza y con grandes aplicaciones tecnológicas: la sangre (suspensión de glóbulos rojos y otras partículas en un medio acuoso), la leche (suspensión de gotitas de grasa en agua), los huesos, las nubes, la atmósfera, las pinturas, las tintas, y un sin fin de sistemas y materiales, biológicos y sintéticos, son coloides.

CONCENTRACIÓN DE LA SOLUCIÓN: Es la proporción o relación que hay entre la cantidad de soluto y la cantidad de disolvente, donde el soluto es la sustancia que se disuelve, el disolvente la sustancia que disuelve al soluto, y la disolución es el resultado de la mezcla homogénea de las dos anteriores. A menor proporción de soluto disuelto en el disolvente, menos concentrada está la disolución, y a mayor proporción más concentrada ésta.

EFICIENCIA DE REMOCIÓN: Medida de la efectividad de un proceso en la remoción de una sustancia específica.

FILTRACIÓN: Consiste en la remoción de partículas suspendidas y coloidales presentes en una suspensión acuosa que escurre a través de un medio poroso.

FLOCULACIÓN: Tiene relación con los fenómenos de transporte dentro del líquido para que las partículas hagan contacto. Esto implica la formación de puentes químicos entre 4 partículas de modo que se forme una malla de coágulos, la cual sería tridimensional y porosa. Así se formaría, mediante el crecimiento de partículas coaguladas, un floculo suficientemente grande y pesado como para sedimentar.

INTERCAMBIO IÓNICO: Se basa en la adsorción, el cual es un proceso de

separación en la que ciertos componentes de una fase fluida se transfieren hacia la superficie de un sólido adsorbente. Generalmente las pequeñas partículas de adsorbente se mantienen en un lecho fijo mientras que el fluido pasa continuamente a través del lecho hasta que el sólido está prácticamente saturado y no es posible alcanzar ya la separación deseada, con lo cual el lecho se ha de regenerar. La mayor parte de los adsorbentes son resinas, compuestos orgánicos de gran peso molecular que tiene la propiedad de disponer de un residuo catiónico o aniónico intercambiable, y gracias a su alta porosidad, la adsorción puede tener lugar fundamentalmente en el interior de las partículas, y aumentado así el área de contacto. La separación se produce debido a la diferente afinidad de las resinas con los cationes y aniones que se desean eliminar, y por tanto la buena elección del lecho favorecerá la separación de los iones y la eficacia dependerá del equilibrio sólido-líquido y de las velocidades de transferencia de materia.

OPERACIONES UNITARIAS: Son cada una de las acciones necesarias en el proceso de las materias primas, ya sean procesos de transformación y/o adecuación de ellas (procesos químicos y físicos) como también las necesarias para llevar a cabo su transporte.

PARTÍCULA: Una subdivisión relativamente pequeña de materia con un diámetro de unos pocos angstroms (como ocurre con las moléculas de gas) a unos pocos milímetros (como ocurre con las gotas de agua de gran tamaño). Una partícula puede tener diferentes formas y dimensiones.

SECADO: Operación unitaria física regida por la transferencia simultánea. Su objetivo es reducir el contenido de agua de un sólido. El término secado indica la disminución de la humedad del sólido.

VALOR ADMISIBLE: Valor establecido para la concentración de un componente o sustancia, que garantiza que el agua de consumo humano no representa riesgo para la salud del consumidor.

ANEXO F. REGISTRO FOTOGRÁFICO

I.

REGISTRO FOTOGRAFICO PLANTA DE TRATAMIENTO MUNICIPIO DE
POTOSI

II

REGISTRO FOTOGRAFICO DE LOS PROCESOS DEL ALMIDON DE YUCA

III

REGISTRO FOTOGRAFICO DE IDENTIFICACIÓN DE ALMIDÓN (PRUEBA DE
LUGOL)

IV

REGISTRO FOTOGRAFICO DE PROCESOS CON EL SULFATO DE
ALUMINIO

V

REGISTRO FOTOGRAFICO DEL ENSAYO DE JARRAS (JAR TEST)