



Universidad de San Carlos de Guatemala
Facultad de Ingeniería
Escuela de Ingeniería Química

**EVALUACIÓN DEL RENDIMIENTO DEL ALMIDÓN DE YUCA (*Manihot esculenta*)
MODIFICADO CON HIDRÓXIDO DE SODIO EN MEZCLAS CON DIFERENTES
COAGULANTES INORGÁNICOS, EN COMPARACIÓN CON LA POLIAMINA N-50**

Ligia Iveth Ulín Ramírez

Asesorada por: Ing. Jorge Mario Estrada Asturias

Guatemala, noviembre de 2016

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**EVALUACIÓN DEL RENDIMIENTO DEL ALMIDÓN DE YUCA (*Manihot esculenta*)
MODIFICADO CON HIDRÓXIDO DE SODIO EN MEZCLAS CON DIFERENTES
COAGULANTES INORGÁNICOS, EN COMPARACIÓN CON LA POLIAMINA N-50**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA
FACULTAD DE INGENIERÍA
POR

LIGIA IVETH ULÍN RAMÍREZ

ASESORADA POR EL ING. JORGE MARIO ESTRADA ASTURIAS

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE

INGENIERA QUÍMICA

GUATEMALA, NOVIEMBRE DE 2016

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE INGENIERÍA



NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA

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

TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO

DECANO	Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco
EXAMINADORA	Inga. Hilda Piedad Palma Ramos
EXAMINADOR	Ing. Carlos Salvador Wong Davi
EXAMINADOR	Ing. Sergio Alejandro Recinos
SECRETARIA	Inga. Lesbia Magalí Herrera López

HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR

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

**EVALUACIÓN DEL RENDIMIENTO DEL ALMIDÓN DE YUCA (*Manihot esculenta*)
MODIFICADO CON HIDRÓXIDO DE SODIO EN MEZCLAS CON DIFERENTES
COAGULANTES INORGÁNICOS, EN COMPARACIÓN CON LA POLIAMINA N-50**

Tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Ingeniería Química, con fecha 28 de octubre de 2015.

Ligia Iveth Ulín Ramírez

Guatemala, 29 de abril de 2016

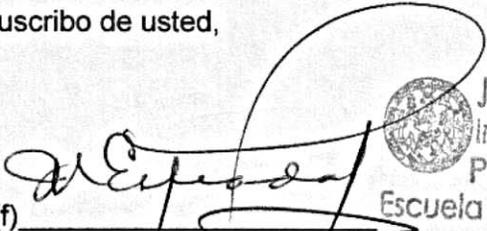
Ing. Carlos Wong
Director de Escuela de Ingeniería Química
Facultad de Ingeniería
USAC

Estimado Ing. Wong:

Por este medio hago constar mi aprobación del Informe Final de Trabajo de Graduación con título "EVALUACIÓN DEL RENDIMIENTO DEL ALMIDÓN DE YUCA (*Manihot esculenta*) MODIFICADO CON HIDRÓXIDO DE SODIO EN MEZCLAS CON DIFERENTES COAGULANTES INORGÁNICOS, EN COMPARACIÓN CON LA POLIAMINA N-50", elaborado por la estudiante de la carrera de Ingeniería Química, Ligia Iveth Ulín Ramírez, quien se identifica con número de carné 200915417.

Agradeciendo la atención prestada a la presente.

Me suscribo de usted,



(f)

Ing. Qco. Jorge Mario Estrada Asturias

Asesor

Universidad de San Carlos de Guatemala



Jorge Mario Estrada Asturias
Ingeniero Químico Col. 685
Profesor Titular
Escuela de Ing. Química USAC



Guatemala, 20 de julio de 2016.
Ref.EPS.DOC.423.07.16.

Inga. Christa del Rosario Classon de Pinto
Directora Unidad de EPS
Facultad de Ingeniería
Usac.

Inga. Classon de Pinto:

Por este medio atentamente le informo que como Asesor-Supervisor de la Práctica del Ejercicio Profesional Supervisado (E.P.S.), de la estudiante universitaria **Ligia Iveth Ulín Ramírez** de la Carrera de Ingeniería Química, con carné No. **200915417**, procedí a revisar el informe final, cuyo título es **"EVALUACIÓN DEL RENDIMIENTO DEL ALMIDÓN DE YUCA (MANIHOT ESCULENTA) MODIFICADO CON HIDRÓXIDO DE SÓDIO EN MEZCLAS CON DIFERENTES COAGULANTES INORGÁNICOS, EN COMPARACIÓN CON LA POLIAMINA N-50"**.

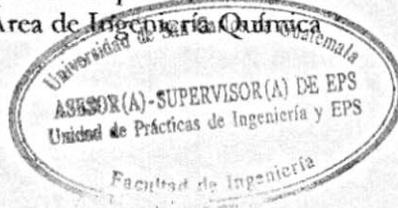
En tal virtud, **LO DOY POR APROBADO**, solicitándole darle el trámite respectivo.

Sin otro particular, me es grato suscribirme.

Atentamente,

"Id y Enseñad a Todos"


Ing. Sergio Alejandro Recinos
Asesor-Supervisor de EPS
Área de Ingeniería Química



c.c. Archivo
SAR/ra



Guatemala, 20 de julio de 2016.
Ref.EPS.D.271.07.16.

Ing. Carlos Salvador Wong Davi
Director Escuela de Ingeniería Química
Facultad de Ingeniería
Presente

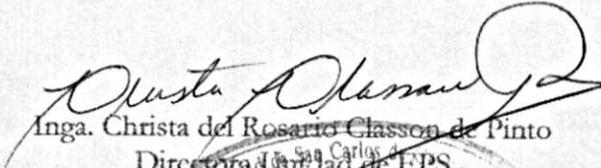
Estimado Ingeniero Wong Davi.

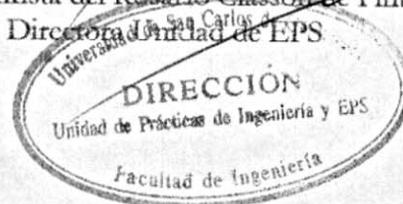
Por este medio atentamente le envío el informe final correspondiente a la práctica del Ejercicio Profesional Supervisado, (E.P.S) titulado **"EVALUACIÓN DEL RENDIMIENTO DEL ALMIDÓN DE YUCA (MANIHOT ESCULENTA) MODIFICADO CON HIDRÓXIDO DE SÓDIO EN MEZCLAS CON DIFERENTES COAGULANTES INORGÁNICOS, EN COMPARACIÓN CON LA POLIAMINA N-50"** que fue desarrollado por la estudiante universitaria Ligia Iveth Ulín Ramírez, quien fue debidamente asesorada y supervisada por el Ingeniero Sergio Alejandro Recinos.

Por lo que habiendo cumplido con los objetivos y requisitos de ley del referido trabajo y existiendo la aprobación del mismo por parte del Asesor-Supervisor de EPS, en mi calidad de Director apruebo su contenido solicitándole darle el trámite respectivo.

Sin otro particular, me es grato suscribirme.

Atentamente,
"Id y Enseñad a Todos"


Inga. Christa del Rosario Classon de Pinto
Directora Unidad de EPS



CdRCDP/ra



Guatemala, 30 de agosto de 2016.
Ref. EIQ.TG-IF.045.2016.

Ingeniero
Carlos Salvador Wong Davi
DIRECTOR
Escuela de Ingeniería Química
Facultad de Ingeniería

Estimado Ingeniero Wong:

Como consta en el registro de evaluación del informe final EIQ-PRO-REG-007 correlativo **069-2015** le informo que reunidos los Miembros de la Terna nombrada por la Escuela de Ingeniería Química, se practicó la revisión del:

**INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADUACIÓN
-Modalidad Ejercicio Profesional Supervisado-**

Solicitado por la estudiante universitaria: **Ligia Iveth Ulín Ramírez**.
Identificada con número de carné: **2009-15417**.
Previo a optar al título de **INGENIERA QUÍMICA**.

Siguiendo los procedimientos de revisión interna de la Escuela de Ingeniería Química, los Miembros de la Terna han procedido a **APROBARLO** con el siguiente título:

**EVALUACIÓN DEL RENDIMIENTO DEL ALMIDÓN DE YUCA (*Manihot esculenta*)
MODIFICADO CON HIDRÓXIDO DE SODIO EN MEZCLAS CON DIFERENTES COAGULANTES
INORGÁNICOS, EN COMPARACIÓN CON LA POLIAMINA N-50**

El Trabajo de Graduación ha sido asesorado por el Ingeniero Químico: **Jorge Mario Estrada Asturias**.

Habiendo encontrado el referido informe final del trabajo de graduación **SATISFACTORIO**, se autoriza al estudiante, proceder con los trámites requeridos de acuerdo a las normas y procedimientos establecidos por la Facultad para su autorización e impresión.

"ID Y ENSEÑAD A TODOS"


Inga. Hilda Piedad Palma de Martini
COORDINADORA DE TERNA
Tribunal de Revisión
Trabajo de Graduación



C.c.: archivo



Ref.EIQ.TG.068.2016

El Director de la Escuela de Ingeniería Química de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer el dictamen del Asesor y de los Miembros del Tribunal nombrado por la Escuela de Ingeniería Química para revisar el Informe del Ejercicio Profesional Supervisado (**EPS final**) de la **carrera de Ingeniería Química**, de la estudiante **LIGIA IVETH ULÍN RAMÍREZ** titulado: **"EVALUACIÓN DEL RENDIMIENTO DEL ALMIDÓN DE YUCA (*Manihot esculenta*) MODIFICADO CON HIDRÓXIDO DE SODIO EN MEZCLAS CON DIFERENTES COAGULANTES INORGÁNICOS, EN COMPARACIÓN CON LA POLIAMINA N-50 "** Procede a la autorización del mismo, ya que reúne el rigor, la secuencia, la pertinencia y la coherencia metodológica requerida.

"Id y Enseñad a Todos"


Ing. Carlos Salvador Wong Davila
DIRECTOR
Escuela de Ingeniería Química



Guatemala, noviembre de 2016

Cc: Archivo
CSWD/ale

Universidad de San Carlos
de Guatemala

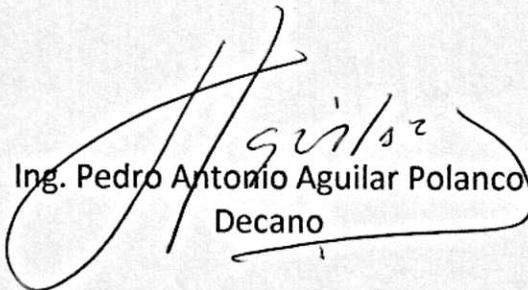


Facultad de Ingeniería
Decanato

DTG. 587.2016

El Decano de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer la aprobación por parte del Director de la Escuela de Ingeniería Química, al Trabajo de Graduación titulado: **EVALUACIÓN DEL RENDIMIENTO DEL ALMIDÓN DE YUCA (*Manihot esculenta*) MODIFICADO CON HIDRÓXIDO DE SODIO EN MEZCLAS CON DIFERENTES COAGULANTES INORGÁNICOS, EN COMPARACIÓN CON LA POLIAMINA N-50**, presentado por la estudiante universitaria: **Ligia Iveth Ulín Ramírez**, y después de haber culminado las revisiones previas bajo la responsabilidad de las instancias correspondientes, autoriza la impresión del mismo.

IMPRÍMASE:


Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco
Decano

Guatemala, noviembre de 2016

/gdech



ACTO QUE DEDICO A:

Dios	Por su amor, misericordia, gracia y fidelidad. Por hacer de mí la mujer que soy ahora y permitirme alcanzar esta meta para su gloria.
Mis padres	Rolando Ulín y Ester Ramírez, por su entrega, amor y apoyo en todo momento, por ser parte fundamental de este logro.
Mi hermano	Dennis Ulín, por su apoyo incondicional, por ser mi fiel compañero de batalla.
Mi familia	Tíos, primos y abuelos, por su cariño y apoyo cuando más lo necesité.
Mis amigos y hermanos	Por ser una fuerte influencia en mi vida, por su apoyo, amor, oraciones y consejo en todo momento.
Mi asesor	Ing. Jorge Estrada, por su apoyo y consejo en la realización de este estudio, por compartir sus conocimientos conmigo.

AGRADECIMIENTOS A:

**Universidad de San
Carlos de Guatemala**

Por la formación profesional brindada a cada uno de los estudiantes de esta casa de estudios. Por estar al servicio del pueblo.

Facultad de Ingeniería

Por cada uno de los conocimientos brindados y por cada uno de los catedráticos que fueron parte importante de mi formación

**Escuela de Ingeniería
Química**

Por brindarme las bases para mi carrera profesional y su constante mejora continua en formar profesionales de calidad.

**Representaciones
Químicas, S. A.**

Por el apoyo brindado para la realización de este estudio y por permitirme ser parte de su equipo de trabajo.

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES.....	V
LISTA DE SÍMBOLOS	XIII
GLOSARIO	XV
RESUMEN.....	XVII
OBJETIVOS.....	XIX
Hipótesis	XXI
INTRODUCCIÓN	XXIII
1. ANTECEDENTES	1
2. MARCO TEÓRICO.....	3
2.1. Agua	3
2.1.1. Ciclo hidrológico	3
2.1.2. Clasificación del agua de acuerdo con su calidad	5
2.1.3. Parámetros de calidad del agua	6
2.1.3.1. Parámetros físicos	6
2.1.3.2. Parámetros químicos.....	7
2.2. Tratamiento de aguas residuales	9
2.3. Partículas en suspensión.....	10
2.3.1. Coloides.....	11
2.3.1.1. Teoría de doble capa eléctrica.....	11
2.3.1.2. Potencial zeta	12
2.4. Proceso de coagulación en tratamiento de aguas.....	13
2.4.1. Factores que influyen en la coagulación.....	15
2.5. Tipos de coagulantes	17

2.5.1.	Coagulantes inorgánicos	17
2.5.2.	Coagulantes orgánicos.....	18
2.5.2.1.	Coagulantes naturales	18
2.5.2.2.	Coagulantes sintéticos	19
2.5.2.2.1.	Polímeros aniónicos.....	21
2.5.2.2.2.	Polímeros catiónicos	23
2.5.2.2.3.	Polímeros no iónicos	24
2.5.3.	Coadyuvantes de coagulación	25
2.5.3.1.	Coadyuvantes inorgánicos	26
2.5.3.2.	Coadyuvantes orgánicos	26
2.6.	Prueba de jarras.....	27
2.7.	Yuca	29
2.7.1.	Producción y rendimiento agrícola de yuca.....	29
2.8.	Almidón de yuca.....	30
2.8.1.	Producción de almidón de yuca en Guatemala	33
2.8.2.	Proceso industrial de producción del almidón de yuca.....	34
2.8.3.	Almidón modificado	37
2.8.3.1.	Almidón modificado con hidróxido de sodio.....	38
3.	DISEÑO METODOLÓGICO.....	41
3.1.	Variables	41
3.2.	Delimitación del campo de estudio.....	41
3.3.	Recursos humanos disponibles	42
3.4.	Recursos materiales disponibles.....	42
3.4.1.	Equipo	42
3.4.2.	Cristalería	45
3.4.3.	Reactivos.....	46

3.4.4.	Material auxiliar.....	46
3.5.	Técnicas cuantitativas y cualitativas.....	46
3.6.	Recolección y ordenamiento de la información	47
3.7.	Tabulación, ordenamiento y procesamiento de la información.....	51
3.8.	Análisis estadístico	56
3.8.1.	Análisis de varianza de dos factores para las mezclas con cloruro férrico.....	56
3.8.2.	Análisis de varianza de dos factores para las mezclas con sulfato de aluminio.....	59
3.8.3.	Análisis de varianza de dos factores para las mezclas con clorhidróxido de aluminio	61
4.	RESULTADOS.....	65
5.	INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS.....	79
	CONCLUSIONES	89
	RECOMENDACIONES.....	91
	BIBLIOGRAFÍA.....	93
	APÉNDICES	97

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

FIGURAS

1.	Ciclo hidrológico del agua	4
2.	Doble capa de una partícula coloidal	12
3.	Potencial zeta	13
4.	Proceso de coagulación	15
5.	Estructura básica del almidón	19
6.	Equipo de prueba de jarras	28
7.	Gráfica de dosis óptima de coagulante	28
8.	Estructura simplificada de las moléculas lineales de amilosa	30
9.	Estructura simplificada de las moléculas ramificadas de amilopectina	31
10.	Gránulos de almidón nativo de yuca vistos con un microscopio electrónico	33
11.	Mecanismo de reacción del almidón con hidróxido de sodio.....	39
12.	Prueba de jarras “Velp Scientifica”	42
13.	Prueba de jarras “ECE”	43
14.	Turbidímetro “La Motte”	43
15.	Colorímetro “Hanna Instruments”	44
16.	Balanza analítica “Radwag”	44
17.	Agitador magnético “Jintan Precies Machinery Co., Ltd.”	45
18.	Porcentaje de remoción de turbiedad de dos coadyuvantes de coagulación en mezclas con cloruro férrico, en una proporción 95:5, en función de la dosis aplicada	65

19.	Porcentaje de remoción de turbiedad de dos coadyuvantes de coagulación en mezclas con cloruro férrico, en una proporción 90:10, en función de la dosis aplicada	66
20.	Porcentaje de remoción de color de dos coadyuvantes de coagulación en mezclas con cloruro férrico, en una proporción 95:5, en función de la dosis aplicada	67
21.	Porcentaje de remoción de color de dos coadyuvantes de coagulación en mezclas con cloruro férrico, en una proporción 90:10, en función de la dosis aplicada	68
22.	Porcentaje de remoción de turbiedad de dos coadyuvantes de coagulación en mezclas con sulfato de aluminio, en una proporción 95:5, en función de la dosis aplicada	70
23.	Porcentaje de remoción de turbiedad de dos coadyuvantes de coagulación en mezclas con sulfato de aluminio, en una proporción 90:10, en función de la dosis aplicada	71
24.	Porcentaje de remoción de color de dos coadyuvantes de coagulación en mezclas con sulfato de aluminio, en una proporción 95:5, en función de la dosis aplicada	72
25.	Porcentaje de remoción de color de dos coadyuvantes de coagulación en mezclas con sulfato de aluminio, en una proporción 90:10, en función de la dosis aplicada	73
26.	Porcentaje de remoción de turbiedad de dos coadyuvantes de coagulación en mezclas con clorhidróxido de aluminio, en una proporción 95:5, en función de la dosis aplicada	74
27.	Porcentaje de remoción de turbiedad de dos coadyuvantes de coagulación en mezclas con clorhidróxido de aluminio, en una proporción 90:10, en función de la dosis aplicada	75

28.	Porcentaje de remoción de color de dos coadyuvantes de coagulación en mezclas con clorhidróxido de aluminio, en una proporción 95:5, en función de la dosis aplicada.....	76
29.	Porcentaje de remoción de color de dos coadyuvantes de coagulación en mezclas con clorhidróxido de aluminio, en una proporción 90:10, en función de la dosis aplicada.....	77

TABLAS

I.	Tiempos de sedimentación de diferentes partículas en función de su diámetro y densidad del agua	10
II.	Ejemplos de polielectrolitos aniónicos.....	22
III.	Ejemplos de polielectrolitos catiónicos	23
IV.	Ejemplos de polielectrolitos no iónicos.....	25
V.	Porcentaje de almidón, proteínas, fibras y ceniza de algunas fuentes de almidón	32
VI.	Variables independientes y dependientes.....	41
VII.	Técnicas cualitativas y cuantitativas.....	46
VIII.	Resultados obtenidos en las pruebas de clarificación con cloruro férrico + poliamina N-50 y sus mezclas.....	47
IX.	Resultados obtenidos en las pruebas de clarificación con cloruro férrico + almidón de yuca modificado y sus mezclas	48
X.	Resultados obtenidos en las pruebas de clarificación con sulfato de aluminio + poliamina N-50 y sus mezclas	48
XI.	Resultados obtenidos en las pruebas de clarificación con sulfato de aluminio + almidón de yuca modificado y sus mezclas	49
XII.	Resultados obtenidos en las pruebas de clarificación con clorhidróxido de aluminio + poliamina N-50 y sus mezclas	50

XIII.	Resultados obtenidos en las pruebas de clarificación con clorhidróxido de aluminio + almidón de yuca modificado y sus mezclas.....	51
XIV.	Resultados de dosis óptimas obtenidas con cloruro férrico + poliamina N-50, aplicando la Mezcla 1	51
XV.	Resultados de dosis óptimas obtenidas con cloruro férrico + almidón de yuca modificado, aplicando la Mezcla 1	52
XVI.	Resultados de dosis óptimas obtenidas con cloruro férrico + poliamina N-50, aplicando la Mezcla 2	52
XVII.	Resultados de dosis óptimas obtenidas con cloruro férrico + almidón de yuca modificado, aplicando la Mezcla 2	52
XVIII.	Resultados de dosis óptimas obtenidas con sulfato de aluminio + poliamina N-50, aplicando la Mezcla 1	53
XIX.	Resultados de dosis óptimas obtenidas con sulfato de aluminio + almidón de yuca modificado, aplicando la Mezcla 1	53
XX.	Resultados de dosis óptimas obtenidas con sulfato de aluminio + poliamina N-50, aplicando la Mezcla 2	53
XXI.	Resultados de dosis óptimas obtenidas con sulfato de aluminio + almidón de yuca modificado, aplicando la Mezcla 2	54
XXII.	Resultados de dosis óptimas obtenidas con clorhidróxido de aluminio + poliamina N-50, aplicando la Mezcla 1	54
XXIII.	Resultados de dosis óptimas obtenidas con clorhidróxido de aluminio + almidón de yuca modificado, aplicando la Mezcla 1	54
XXIV.	Resultados de dosis óptimas obtenidas con clorhidróxido de aluminio + poliamina N-50, aplicando la Mezcla 2	55
XXV.	Resultados de dosis óptimas obtenidas con clorhidróxido de aluminio + almidón de yuca modificado, aplicando la Mezcla 2.....	55
XXVI.	Experimento de dos factores para el porcentaje de remoción de turbiedad en mezclas con cloruro férrico	56

XXVII.	Análisis de varianza para el porcentaje de remoción de turbiedad en mezclas con cloruro férrico	57
XXVIII.	Experimento de dos factores para el porcentaje de remoción de color en mezclas con cloruro férrico.....	57
XXIX.	Análisis de varianza para el porcentaje de remoción de color en mezclas con cloruro férrico	58
XXX.	Prueba de Tukey para determinar si existe diferencia significativa entre los porcentajes de remoción de color de los coadyuvantes de coagulación en mezclas con cloruro férrico	58
XXXI.	Experimento de dos factores para el porcentaje de remoción de turbiedad en mezclas con sulfato de aluminio.....	59
XXXII.	Análisis de varianza para el porcentaje de remoción de turbiedad en mezclas con sulfato de aluminio.....	59
XXXIII.	Prueba de Tukey para determinar si existe diferencia significativa entre los porcentajes de remoción de turbiedad de los coadyuvantes de coagulación en mezclas con sulfato de aluminio	60
XXXIV.	Experimento de dos factores para el porcentaje de remoción de color en mezclas con sulfato de aluminio.....	60
XXXV.	Análisis de varianza para el porcentaje de remoción de color en mezclas con sulfato de aluminio	61
XXXVI.	Experimento de dos factores para el porcentaje de remoción de turbiedad en mezclas con clorhidróxido de aluminio	61
XXXVII.	Análisis de varianza para el porcentaje de remoción de turbiedad en mezclas con clorhidróxido de aluminio.....	62
XXXVIII.	Experimento de dos factores para el porcentaje de remoción de color en mezclas con clorhidróxido de aluminio	62
XXXIX.	Análisis de varianza para el porcentaje de remoción de color en mezclas con clorhidróxido de aluminio.....	63

XL.	Porcentajes de remoción de turbiedad y color obtenidos con dos coadyuvantes de coagulación en mezclas con cloruro férrico, en dos proporciones diferentes.....	65
XLI.	Modelo matemático para el porcentaje de remoción de turbiedad de dos coadyuvantes de coagulación en mezclas con cloruro férrico, en una proporción 95:5, en función de la dosis aplicada	66
XLII.	Modelo matemático para el porcentaje de remoción de turbiedad de dos coadyuvantes de coagulación en mezclas con cloruro férrico, en una proporción 90:10, en función de la dosis aplicada	67
XLIII.	Modelo matemático para el porcentaje de remoción de color de dos coadyuvantes de coagulación en mezclas con cloruro férrico, en una proporción 95:5, en función de la dosis aplicada	68
XLIV.	Modelo matemático para el porcentaje de remoción de color de dos coadyuvantes de coagulación en mezclas con cloruro férrico, en una proporción 90:10, en función de la dosis aplicada	69
XLV.	Porcentajes de remoción de turbiedad y color obtenidos con dos coadyuvantes de coagulación en mezclas con sulfato de aluminio, en dos proporciones diferentes.....	69
XLVI.	Modelo matemático para el porcentaje de remoción de turbiedad de dos coadyuvantes de coagulación en mezclas con sulfato de aluminio, en una proporción 95:5, en función de la dosis aplicada	70
XLVII.	Modelo matemático para el porcentaje de remoción de turbiedad de dos coadyuvantes de coagulación en mezclas con sulfato de aluminio, en una proporción 90:10, en función de la dosis aplicada	71
XLVIII.	Modelo matemático para el porcentaje de remoción de color de dos coadyuvantes de coagulación en mezclas con sulfato de aluminio, en una proporción 95:5, en función de la dosis aplicada	72

XLIX.	Modelo matemático para el porcentaje de remoción de color de dos coadyuvantes de coagulación en mezclas con sulfato de aluminio, en una proporción 90:10, en función de la dosis aplicada.....	73
L.	Porcentajes de remoción de turbiedad y color obtenidos con dos coadyuvantes de coagulación en mezclas con clorhidróxido de aluminio, en dos proporciones diferentes.....	74
LI.	Modelo matemático para el porcentaje de remoción de turbiedad de dos coadyuvantes de coagulación en mezclas con clorhidróxido de aluminio, en una proporción 95:5, en función de la dosis aplicada	75
LII.	Modelo matemático para el porcentaje de remoción de turbiedad de dos coadyuvantes de coagulación en mezclas con clorhidróxido de aluminio, en una proporción 90:10, en función de la dosis aplicada	76
LIII.	Modelo matemático para el porcentaje de remoción de color de dos coadyuvantes de coagulación en mezclas con clorhidróxido de aluminio, en una proporción 95:5, en función de la dosis aplicada	77
LIV.	Modelo matemático para el porcentaje de remoción de color de dos coadyuvantes de coagulación en mezclas con clorhidróxido de aluminio, en una proporción 90:10, en función de la dosis aplicada	78

LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolo	Significado
R²	Coeficiente de correlación
S	Desviación estándar
F	F de Fisher
mg/L	Miligramos por litro
%	Porcentaje
w	Valor calculado de la prueba de Tukey
Q	Valor crítico de la prueba de Tukey

GLOSARIO

Almidón de yuca	Polisacárido formado por cadenas largas de moléculas de glucosa, permite que la yuca almacene su alimento en la raíz.
Coadyuvante	Agente auxiliar del proceso de coagulación o floculación, actúa sobre los elementos que producen interferencia y mejora la sedimentación.
Coagulante	Agente agregado al agua para ayudar a la sedimentación de finas partículas que se encuentran en suspensión.
Color	Parámetro físico de calidad del agua, generado por sustancias disueltas o por coloides.
Dosis óptima	Dosis de coagulante y floculante que permite obtener los mejores resultados en los parámetros finales de calidad del agua tratada.
Hidróxido de sodio	También llamado soda cáustica, su fórmula molecular es NaOH, posee una alta alcalinidad y solubilidad en agua.
NTU	<i>Nephelometric Turbidity Unit</i> , unidad de medición para la turbiedad.

PCU	<i>Platinum-Cobalt Units</i> , unidad de medición para el color.
Poliamina	Coagulante orgánico de origen sintético, es un polímero con carga positiva, utilizado como coagulante primario o coadyuvante de coagulación en tratamiento de aguas.
Prueba de jarras	Método de simulación del proceso de coagulación y floculación realizado a nivel laboratorio, determina las condiciones óptimas de operación para el tratamiento de aguas.
Turbiedad	Parámetro físico de calidad del agua, causada por la presencia de material suspendido en el agua y obstaculiza el paso de la luz.

RESUMEN

Se evaluó el rendimiento, expresado como porcentaje de remoción de turbiedad y color, del almidón de yuca (*Manihot esculenta*) modificado con hidróxido de sodio en mezclas con diferentes coagulantes inorgánicos, como coadyuvante de coagulación, en comparación con la poliamina N-50 en el proceso de clarificación del agua del río Villalobos.

Se prepararon mezclas de coagulantes inorgánicos: cloruro férrico, sulfato de aluminio y clorhidróxido de aluminio con almidón de yuca modificado con hidróxido de sodio y paralelamente con la poliamina N-50. Se estudió el funcionamiento de dos proporciones de mezcla, 95:5 y 90:10. Por medio de pruebas de jarras realizadas a nivel laboratorio, se encontraron las dosis óptimas de las mezclas de coagulantes inorgánicos con la poliamina N-50 y luego se evaluaron las mezclas de coagulantes inorgánicos con almidón de yuca modificado con hidróxido de sodio aplicando las dosis óptimas encontradas anteriormente.

Al aplicar la misma dosis, el almidón de yuca modificado y la poliamina N-50 como coadyuvantes de coagulación poseen un funcionamiento similar y las diferencias que pudieran existir entre ellos, para la remoción de turbiedad y color en una muestra de agua residual representativa, no son significativas si se mezcla el almidón de yuca con un coagulante inorgánico altamente eficiente.

OBJETIVOS

General

Evaluar el rendimiento, expresado como porcentaje de remoción de turbiedad y color, del almidón de yuca (*Manihot esculenta*) modificado con hidróxido de sodio en mezclas con diferentes coagulantes inorgánicos, como coadyuvante de coagulación; en comparación con la poliamina N-50 en el proceso de clarificación del agua del río Villalobos.

Específicos

1. Seleccionar y preparar las proporciones de mezcla de los coagulantes inorgánicos y almidón de yuca modificado, así como las mezclas de coagulantes inorgánicos y poliamina N-50.
2. Determinar la dosis óptima y porcentaje de remoción de turbiedad y color, de cada mezcla de coagulantes inorgánicos con poliamina N-50, para la muestra de agua a analizar.
3. Evaluar el porcentaje de remoción de turbiedad y color de las mezclas de coagulantes inorgánicos con almidón de yuca modificado con hidróxido de sodio, aplicando la dosis óptima de las mezclas de coagulantes inorgánicos con poliamina N-50.

4. Determinar si existe diferencia significativa entre los porcentajes de remoción de los dos auxiliares de coagulación, el almidón de yuca modificado y la poliamina N-50, a la misma dosis.

5. Determinar la proporción de coagulantes inorgánicos con almidón de yuca modificado, con mayor porcentaje de remoción de carga contaminante.

HIPÓTESIS

Hipótesis nula:

No existe diferencia significativa entre el rendimiento, expresado como porcentaje de remoción de turbiedad y color, del almidón de yuca modificado con hidróxido de sodio y de la poliamina N-50, como coadyuvantes de coagulación.

Hipótesis alternativa:

Existe diferencia significativa entre el rendimiento, expresado como porcentaje de remoción de turbiedad y color, del almidón de yuca modificado con hidróxido de sodio y de la poliamina N-50, como coadyuvantes de coagulación.

INTRODUCCIÓN

La yuca es un cultivo que se cosecha en casi todos los departamentos de Guatemala, principalmente en el área rural donde es utilizada para autoconsumo, además, es la segunda fuente de almidón en el mundo después del maíz. El almidón es un polímero natural y puede modificarse por calentamiento o por tratamiento con solución de hidróxido de sodio, el gel resultante tiene la propiedad de actuar como coadyuvante de floculación de las partículas en suspensión que presenta el agua.

Este estudio nace de la necesidad de crear un coagulante para tratamiento de aguas competitivo en cuanto a costos y funcionalidad, además de disminuir el consumo de polímeros sintéticos que pueden generar sustancias peligrosas para la salud del consumidor. Al producir un coadyuvante de coagulación a partir de la yuca, se estaría generando un nuevo mercado para este cultivo y se ayudaría, de esta manera, a la economía de Guatemala.

El objetivo de este estudio es evaluar el rendimiento, expresado como porcentaje de remoción de turbiedad y color, del almidón de yuca (*Manihot esculenta*) modificado con hidróxido de sodio en mezclas con diferentes coagulantes inorgánicos, como coadyuvante de coagulación, en comparación con la poliamina N-50 en el proceso de clarificación del agua del río Villalobos.

1. ANTECEDENTES

Entre los trabajos de graduación realizados en la Universidad de San Carlos, que traten acerca del uso de coagulantes naturales o auxiliares naturales de coagulación en el tratamiento de aguas, se encuentran: el de Juan Mejía¹ estudió la utilización de la semilla de la *Moringa oleifera* como coagulante natural. Carlos Rivera evaluó la utilización de la harina de papa (*Solanum tuberosum*) como alternativa de ayuda en el proceso de coagulación con sulfato de aluminio. Eddy Martínez evaluó el uso de fécula de maíz en el proceso de coagulación del agua cuando se utiliza sulfato de aluminio y el trabajo de Claudia Grijalva, quien realizó un análisis comparativo de un polímero coagulante catiónico vs. sulfato de aluminio en la clarificación de agua en una planta de elaboración de bebidas carbonatadas.

Se han realizado estudios en otros países acerca del uso del almidón de yuca modificado con hidróxido de sodio como coadyuvante del proceso de floculación, estudio realizado por L. Leiva. Se ha evaluado el uso del almidón de yuca como coagulante en el tratamiento de aguas pero sin modificarlo, de acuerdo con J. Rodríguez. También se ha evaluado el uso de almidón de plátano en mezclas con sulfato de aluminio pero sin modificar el almidón, estudio realizado por José Laines y Randy Adams.

Hasta la fecha no hay estudios comparativos del uso del almidón de yuca modificado con hidróxido de sodio frente a una poliamina, como coadyuvante de coagulación en mezclas con coagulantes inorgánicos.

¹ Los datos completos de este estudio y los otros mencionados en los antecedentes, aparecen citados en la bibliografía.

2. MARCO TEÓRICO

2.1. Agua

Es una sustancia líquida inodora, incolora e insípida que se encuentra en la naturaleza y es indispensable para el desarrollo de la vida. Está compuesta por dos átomos de hidrógeno y uno de oxígeno, puede presentarse en tres estados: líquido, sólido y gaseoso.

2.1.1. Ciclo hidrológico

Las aguas naturales forman parte de un ciclo continuo. La humedad que se evapora de los océanos y otras superficies de agua es precipitada en forma de lluvia, nieve y granizo. Parte de esta precipitación regresa a las superficies de agua y parte cae sobre la tierra, donde, a su vez, es empleada por la vegetación. Algo se evapora, otra parte corre hacia los océanos por conducto de corrientes de agua o lagos y el resto penetra en la tierra. Las variaciones de estos factores afectan la cantidad de agua aprovechable y su calidad.

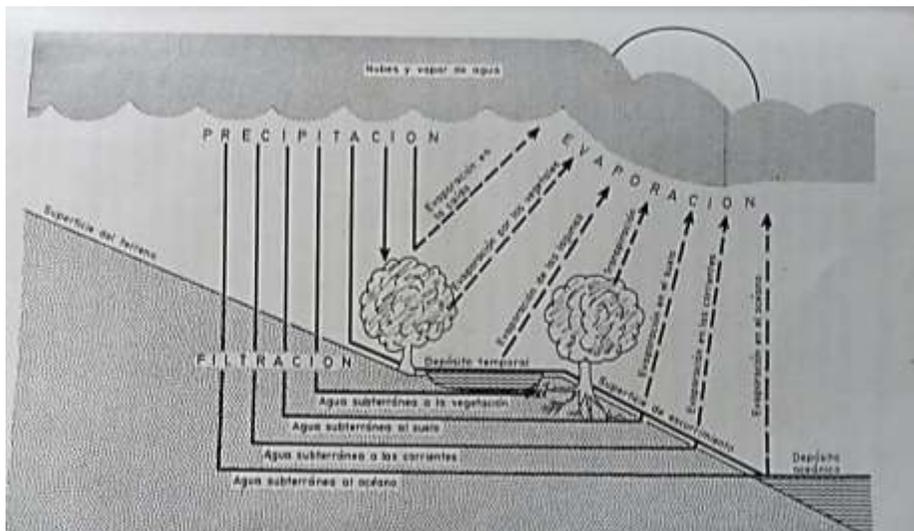
Las fuentes de agua aprovechables en el ciclo hidrológico se clasifican en:

- Lluvia y nieve: a medida que caen, absorben oxígeno, dióxido de carbono y otros gases del aire, polvo, humos y vapores. Recogen también bacterias y esporas vegetales que se encuentran en el aire. El agua de lluvia es suave, saturada de oxígeno, insípida y un poco corrosiva; debido a esto no debe entrar en contacto con tuberías o recipientes de plomo.

- Agua de superficie: pueden ser corrientes de agua, lagunas y lagos naturales o embalses. La calidad del agua de superficie depende de las características y área de la cuenca, de su geología, topografía, extensión y naturaleza del desarrollo realizado por el hombre, época del año y condiciones climáticas. Las fuentes de superficie en zonas muy pobladas se ven afectadas por las aguas de alcantarilla y desperdicios industriales.
- Aguas subterráneas: se encuentran los manantiales, pozos poco profundos y galerías de infiltración y pozos profundos. En las aguas subterráneas el flujo de agua es estable en cuanto a velocidad y dirección.

El ciclo hidrológico del agua se ilustra a continuación en la figura 1.

Figura 1. **Ciclo hidrológico del agua**



Fuente: American water works association. *Agua, su calidad y tratamiento*. p. 3.

2.1.2. Clasificación del agua de acuerdo con su calidad

- Agua cruda: este término se refiere al agua que se encuentra en su estado natural en el ambiente (superficial, subterránea, ríos, lagos, entre otros) y que no ha recibido ningún tipo de tratamiento. La calidad del agua cruda depende de la posición geográfica, origen y de las poblaciones aledañas.

- Aguas residuales: son aquellas que han sido utilizadas para cualquier uso benéfico pero luego constituyen un residuo porque ya no sirve para el usuario directo. Las principales fuentes de contaminación del agua se pueden clasificar de la siguiente manera:
 - Urbanas: provenientes de labores domésticas, sobre todo residuos fecales y detergentes.
 - Industriales: causadas por vertido de aguas residuales cargadas de materia orgánica, metales, aceites industriales e incluso radiactividad.
 - Agrícolas: causadas por vertido de aguas cargadas de residuos orgánicos, procedentes de labores de transformación de productos vegetales o de excremento de animales.

- Agua tratada: es el agua a la que se le han cambiado sus características físicas, químicas y microbiológicas con el propósito de utilizarla en algún uso benéfico. La calidad del agua tratada va a depender del uso que se le vaya a asignar.

2.1.3. Parámetros de calidad del agua

Para conocer los niveles de contaminación del agua, es necesario medir parámetros físicos, químicos y microbiológicos.

2.1.3.1. Parámetros físicos

- Turbiedad: capacidad de un material suspendido en el agua para obstaculizar el paso de la luz. Puede ser causada por la erosión natural de las cuencas de los ríos o por la contaminación debida a desechos industriales y domésticos. La turbiedad es importante en el tratamiento del agua por estética y para seleccionar los procesos de tratamiento. En la actualidad, la turbiedad se mide con turbidímetros basados en principios nefelométricos, la sustancia patrón de medida es una mezcla de sulfato de hidrazina y hexametiltetramina. Los resultados se expresan en UNT (Unidades Nefelométricas de Turbiedad).

- Color: está ligado a la turbiedad, pero puede considerarse una característica independiente, es generado por sustancias disueltas y por coloides. El color se clasifica como:
 - Color aparente: producido por material suspendido.
 - Color verdadero: permanece en el agua después de remover la turbiedad.

El color natural en el agua puede ser producido por la descomposición natural de materia vegetal y por la disolución de minerales mientras que el color debido al vertimiento de desechos industriales es asociado a la presencia de

sustancias tóxicas en el agua. El color se expresa en unidades de color y es medido en el laboratorio por medio de colorímetros.

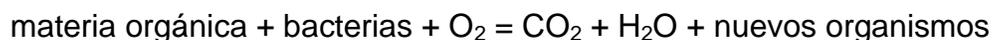
- Olor y sabor: están asociados con la presencia de sustancias indeseables, como: plancton, compuestos orgánicos generados por la actividad de las bacterias y algas, desechos industriales o por la descomposición de la materia orgánica.
- Temperatura: puede afectar la viscosidad, la velocidad de reacciones químicas e interviene en el diseño de la mayoría de los procesos de tratamiento del agua.
- Sólidos: es necesario determinar la cantidad de material sólido que contiene la muestra. Tipos de sólidos presentes en el agua:
 - Sólidos totales: se refiere a todo el material que queda después de evaporar el agua a 105°C. Estos se dividen en: sólidos disueltos y sólidos suspendidos.
 - Sólidos sedimentables: se refiere al material que sedimenta en el fondo de un recipiente de forma cónica en el transcurso de un período de 60 minutos. Los resultados se expresan en mL/L.

2.1.3.2. Parámetros químicos

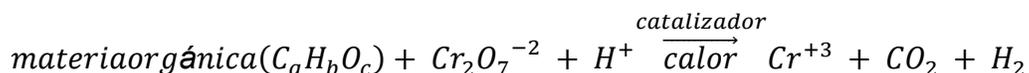
- pH: expresa la intensidad de las condiciones ácidas o básicas del agua. Se define como:

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

- Conductividad: es un indicador de las sales disueltas en el agua, mide la cantidad de iones (Ca, Mg, Na, P, bicarbonatos, cloruros y sulfatos). Se mide en Siemens/cm. Es una medida indirecta de sólidos disueltos.
- Alcalinidad: capacidad que tiene el agua para neutralizar ácidos. Indica la presencia de sustancias básicas en el agua como sales de ácidos débiles o bases fuertes.
- Dureza: es ocasionada por la presencia de cualquier catión bivalente en el agua, Ca^{+2} y Mg^{+2} . Las aguas duras requieren grandes cantidades de jabón para producir espuma, a elevadas temperaturas forman incrustaciones en los equipos mecánicos y las tuberías.
- Demanda bioquímica de oxígeno (DBO): parámetro utilizado para determinar el contenido de materia orgánica de una muestra de agua. Se mide determinando la cantidad de oxígeno que requieren los microorganismos para degradar la materia orgánica. Durante el proceso de desoxigenación o estabilización de la materia orgánica, el consumo de oxígeno está descrito por la ecuación:



- Demanda química de oxígeno (DQO): determina el contenido de materia orgánica de una muestra de agua. En esta prueba la materia orgánica es oxidada utilizando dicromato de potasio, la reacción química que ocurre es:



Los valores de DQO son mayores que los de DBO, esta diferencia aumenta con la presencia de sustancias tóxicas que hagan la muestra de agua biológicamente resistente a la degradación. La relación DQO/DBO, es útil para determinar la cantidad de materia orgánica biológicamente degradable.

2.2. Tratamiento de aguas residuales

El principal objetivo del tratamiento de aguas residuales es la remoción de la carga contaminante, en especial materia orgánica. Este proceso consta de las siguientes etapas:

- Pre-tratamiento: prepara el agua, eliminando partículas de gran tamaño como madera, plástico, arena y grasa que pueden obstruir o dificultar los procesos posteriores. Se utilizan cribas o rejillas, desarenadores, flotación o eliminación de grasas, homogenización y sedimentación.
- Tratamiento primario: tiene el objetivo de eliminar los sólidos en suspensión que no fueron retenidos en el tratamiento previo, así como sustancias flotantes y aceites. Se da una separación por medios físicos y a veces complementados con químicos, como la sedimentación, floculación y flotación.
- Tratamiento secundario: elimina la materia orgánica biodegradable. En esta etapa se propicia el crecimiento de microorganismos que se alimentan de la materia orgánica, transformándola en microorganismos insolubles y fáciles de eliminar. Este proceso se denomina tratamiento biológico y se produce en tanques de estabilización, tanques de aireación, percolación, lodos activos y digestores anaeróbicos.

- Tratamiento terciario: elimina la materia orgánica u otro tipo de contaminante que no haya sido eliminado en los tratamientos anteriores. Estos tratamientos pueden ser: adsorción, intercambio iónico, ósmosis inversa y precipitación química.
- Tratamientos específicos: elimina contaminantes específicos y puede realizarse en cualquier etapa del tratamiento, consiste en operaciones de neutralización, oxidación-reducción, desinfección.

2.3. Partículas en suspensión

Las partículas en suspensión de una fuente de agua superficial provienen de la disolución de minerales, erosión de suelos y descomposición de materia orgánica. A este aporte natural se debe adicionar las descargas de aguas domésticas, industriales y agrícolas.

Las partículas en suspensión se clasifican según su tamaño, las partículas con diámetros menores a 1 micrómetro son las que requieren un mayor tiempo de sedimentación.

Tabla I. **Tiempos de sedimentación de diferentes partículas en función de su diámetro y densidad del agua**

Tipo de partículas	Diámetro (mm)	Tiempo de sedimentación	
		Densidad 2,65 g/mL	Densidad 1,1 g/mL
Grava	10	0,013 s	0,2 s
Arena gruesa	1	1,266 s	20,9 s
Arena fina	0,1	126,66 s	34,83 min
Lodo fino	0,01	3,52 h	58 h
Bacterias	0,001	14,65 días	249,1 días
Coloides	0,0001	4,12 años	66,59 días

Fuente: ANDÍA CÁRDENAS, Yolanda. *Tratamiento de agua, coagulación y floculación*. p. 7.

En la Tabla I se observa que a una misma densidad de agua, las partículas de menor tamaño tienen un tiempo de sedimentación mayor, esto hace imposible la sedimentación sin la adición de un factor externo.

2.3.1. Coloides

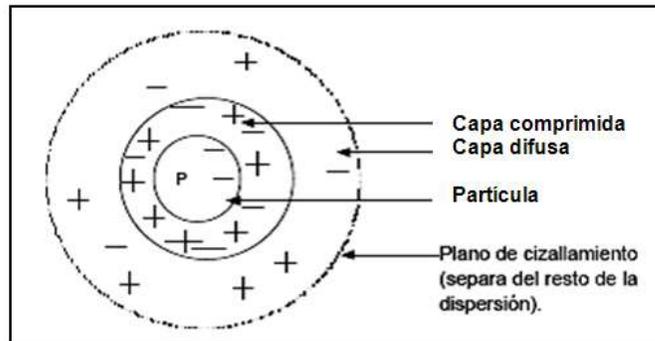
Son suspensiones estables, por lo que es imposible su sedimentación natural, son sustancias responsables de la turbiedad y color del agua. Los sistemas coloidales presentan una superficie de contacto inmensa entre la fase sólida y la fase líquida.

2.3.1.1. Teoría de doble capa eléctrica

La teoría de la estabilidad de los coloides se conoce como la teoría de la doble capa eléctrica (*double electrical layer*), debido a como se modela la superficie intermedia entre la partícula coloidal y el seno del líquido.

Las partículas coloidales generalmente poseen carga eléctrica negativa situada en la superficie, ésta se denomina carga primaria. Esta carga atrae los iones positivos del agua, formando una capa denominada capa de Stern o capa adherida, estos iones se adhieren fuertemente a las partículas y atraen a su alrededor iones negativos acompañados de una débil cantidad de iones positivos. Los iones que se adhieren débilmente, hasta la superficie neutra del líquido, constituyen la capa difusa. La figura 2 muestra la doble capa de una partícula coloidal.

Figura 2. **Doble capa de una partícula coloidal**



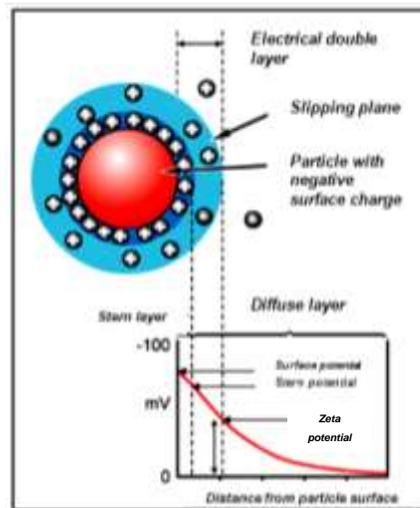
Fuente: ANDÍA CÁRDENAS, Yolanda. *Tratamiento de agua, coagulación y floculación*. p. 8.

2.3.1.2. **Potencial zeta**

Una partícula coloidal cargada tiene cierto potencial eléctrico con respecto a la solución neutra en la que se halla, este potencial decrece hasta una distancia suficiente donde los efectos de la carga son imperceptibles. El valor de la diferencia de potencial entre el límite de solución rígidamente unida a la partícula y la masa del líquido se denomina potencial Zeta.

La existencia del potencial Zeta y la doble capa es lo que impide que las partículas puedan aproximarse a una distancia suficiente como para que las fuerzas de atracción de Van der Waals entren en acción y agrupen los coloides. Unido a ello aparece el fenómeno de la repulsión electrostática entre cargas de igual signo, de modo que todo ello fortalece la estabilidad del sistema. Conseguir la aglomeración de las partículas dependerá de la capacidad de ruptura de la estabilidad de los coloides. La figura 3 muestra a detalle el potencial zeta de una partícula coloidal.

Figura 3. **Potencial zeta**



Fuente: PÉREZ, Francisco; URREA, Mario. *Tema 6 Coagulación y floculación*. p. 6.

Las partículas coloidales están en constante movimiento y se producen colisiones de las que se desprende energía. Cuanto mayor número de colisiones se produzcan, mayor será la posibilidad de agregación; a pesar de ello, no se generará un número suficiente de uniones fruto de la colisión, si no existe una previa desestabilización del equilibrio coloidal. Pueden aumentarse las colisiones entre partículas, estableciendo flujos hidráulicos, recurriendo a la creación de zonas de mezcla rápida o zonas de gran turbulencia, variando las condiciones de agitación.

2.4. Proceso de coagulación en tratamiento de aguas

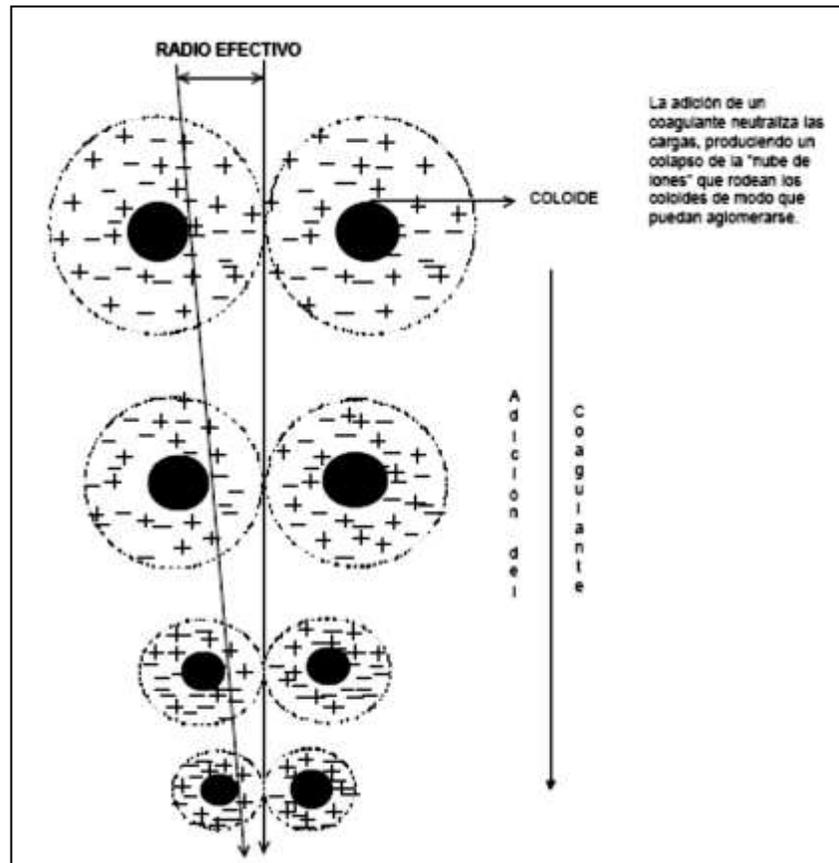
Un coagulante es un agente agregado al agua para facilitar la sedimentación de material coloidal o finas partículas que se encuentran en suspensión. La coagulación, como proceso de tratamiento de agua, es la serie

de operaciones químicas y mecánicas por las cuales se aplican los coagulantes y estos producen su efecto. Este proceso consta de dos fases:

- Mezcla: el coagulante disuelto se dispersa rápidamente en el agua mediante fuerte agitación. dando como resultado la formación de partículas en suspensión de mayor tamaño. En esta etapa ocurren los siguientes fenómenos:
 - Neutralización de las cargas negativas de los contaminantes con el ión coagulante trivalente.
 - Reacción del coagulante con la alcalinidad del agua y la formación de flóculos de óxido hidratado coloidal con carga positiva, estos son atraídos por las impurezas coloidales de carga negativa.
 - Adsorción superficial de impurezas por los flóculos que resultan de cualquiera de los dos fenómenos anteriores.
- Floculación: agitación del agua a baja velocidad durante un tiempo prolongado, durante esta etapa las partículas de menor tamaño crecen, se unen y se aglomeran en flóculos bien definidos con un tamaño suficiente para sedimentar fácilmente. El aumento de tamaño de los flóculos depende de dos factores, de la colisión (esta depende de alguna acción física, en especial de la agitación del agua) y de la adhesión (que se controla por fuerzas químicas o electrónicas).

Los coagulantes anulan las cargas eléctricas sobre la superficie del coloide, permitiendo que las partículas coloidales se aglomeren formando flóculos; este fenómeno se ilustra en la figura 4.

Figura 4. **Proceso de coagulación**



Fuente: ANDÍA CÁRDENAS, Yolanda. *Tratamiento de agua, coagulación y floculación*. p. 10.

2.4.1. Factores que influyen en la coagulación

Los factores que intervienen en el proceso de coagulación de aguas con color y turbiedad son: tipo de coagulante, cantidad de coagulante, cantidad y carácter del color y turbiedad, caracteres químicos del agua, concentración de iones hidrógeno del agua, tiempo de mezcla y floculación, temperatura del agua, fuerza de la agitación y presencia de núcleos.

- Cantidad de coagulante: existe cierta relación entre la turbiedad del agua cruda y la dosis del coagulante apropiado pero la cantidad exacta sólo puede determinarse mediante ensayos. Esta cantidad puede variar con otros factores como el tiempo de mezcla y temperatura del agua.
- Características químicas del agua: material suspendido muy fino es más difícil de coagular que partículas más grandes, se necesita mayor cantidad de coagulante para una turbiedad dada y la capacidad de intercambio de cationes de las partículas de la turbiedad tiene una relación importante con el éxito de la floculación.
- Concentración de iones de hidrógeno del agua: influye en la formación satisfactoria de flóculos. En algunos tipos de aguas se necesita ajustar el pH hacia el lado ácido o alcalino para que sea posible una coagulación eficaz y económica. Existe una zona de pH en cualquier agua donde se produce una buena coagulación y floculación en el plazo más corto y con una dosis dada de coagulante.
- Temperatura del agua: influye en el tiempo requerido para una buena formación de flóculos. Cuando el agua se encuentra más fría, más largo será el tiempo requerido para producir buenos flóculos con una determinada cantidad de coagulante.
- Fuerza de la agitación: se ha comprobado que una velocidad de 30 a 40 cm/s, empleada en el diseño de tanques de coagulación, produce aproximadamente la fuerza de agitación deseada.
- Presencia de núcleos: las partículas sólidas en suspensión actúan como núcleos para la formación inicial de flóculos. En un agua con poca

turbiedad coloidal, resulta frecuentemente difícil la floculación que en el agua que contiene gran cantidad de turbiedad gruesa.

2.5. Tipos de coagulantes

Se pueden dividir en tres grupos: coagulantes inorgánicos, coagulantes orgánicos y coadyuvantes o auxiliares de coagulación.

2.5.1. Coagulantes inorgánicos

- Sales de aluminio: pueden ser sales simples como el sulfato de aluminio, aluminato sódico y cloruro de aluminio. De acuerdo con la A.W.W.A. (Asociación Americana de Plantas de Agua), el sulfato de aluminio debe tener un mínimo de 17 % de Al_2O_3 soluble en agua y un máximo de contenido de hierro de 0,75 % de Fe_2O_3 , su fórmula empírica aproximada es $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 15\text{H}_2\text{O}$. También pueden ser sales prehidrolizadas o polimerizadas como el cloruro de polialuminio, sulfato de polialuminio y silicato sulfato de polialuminio.
- Sales de hierro: pueden ser sales simples como el sulfato ferroso, sulfato férrico y cloruro férrico. También pueden ser sales polimerizadas como el sulfato poliférrico y cloruro poliférrico. El sulfato férrico está compuesto por no menos del 90 % de $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$ para la forma anhidra y no menos de 60 % para la cristalina. El cloruro férrico contiene 60 % de cristales de FeCl_3 ($\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$), en forma líquida contiene 39,45 % de FeCl_3 .

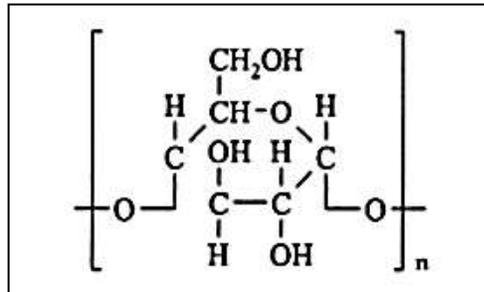
2.5.2. Coagulantes orgánicos

Pertenece a este grupo los polímeros de elevado peso molecular, estos pueden ser de origen natural y sintético.

2.5.2.1. Coagulantes naturales

- Polímeros de origen microbiológico: son mezclas compuestas por proteínas, lípidos, ácidos nucleicos y polisacáridos, capaces de ser degradados fácilmente por reacciones microbiológicas. Estos biofloculantes se pueden obtener de fangos biológicos o de cultivos de microorganismos aislados de los fangos biológicos.
- Polímeros de origen natural: son compuestos orgánicos de origen biológico, entre estos destacan los derivados del almidón y la celulosa, extractos vegetales, alginatos, ciertas gomas, guar y quitosán. Estos polielectrolitos naturales pueden tener propiedades de carácter catiónico como el quitosán y el almidón o propiedades aniónicas como los polisacáridos sulfatados y no iónicas como algunos derivados del almidón, galactomanosa, derivados de la celulosa y gelatinas. La figura 5 muestra la estructura básica del almidón.

Figura 5. Estructura básica del almidón



Fuente: AGUILAR, M. I. *Tratamiento físico-químico de aguas residuales, coagulación-floculación*. p. 60.

2.5.2.2. Coagulantes sintéticos

En el tratamiento de aguas, los polímeros sintéticos se conocen como polielectrolitos, son cadenas de unidades monoméricas que pueden contener uno o varios tipos de monómeros. Las unidades de monómeros pueden estar enlazadas de manera lineal o ramificada, los grupos funcionales están localizados periódicamente a lo largo de la cadena y pueden poseer una carga negativa (polielectrolitos aniónicos), positiva (polielectrolitos catiónicos) o neutra (polielectrolitos no iónicos).

Los factores que pueden afectar el funcionamiento del polielectrolito son la densidad de carga, el peso molecular, la naturaleza polar de los enlaces no iónicos en la molécula, el tamaño y la geometría molecular.

La densidad de carga del polímero se refiere a la concentración de cargas positivas o negativas como porcentaje del contenido de monómeros ionizados, esto depende del tipo de polímero, contenido de polímero en el producto, concentración del producto cuando se adiciona al agua y, en algunos casos, el

pH de disolución. De acuerdo con peso molecular se pueden clasificar en polímero de bajo, alto y muy alto peso molecular.

Actualmente, los polielectrolitos sintéticos son los más utilizados en la industria, y presentan las siguientes ventajas:

- Su carácter sintético permite seleccionar los grupos de monómeros e iónicos que se adaptan mejor a cada necesidad.
- En comparación con los polímeros naturales, ofrecen una mayor pureza, estabilidad de calidad y eficacia; debido a que poseen pesos moleculares más elevados, permitiendo tener un grado de floculación más alto.
- No añaden sustancias insolubles a los lodos y no modifican las propiedades fisicoquímicas del agua, esto permite reutilizar el agua clarificada.
- Producen flóculos grandes con una dosis baja de polímero, debido a la presencia de grupos multifuncionales en las cadenas macromoleculares.
- No afectan el pH del agua tratada.
- Mejoran la floculación en épocas difíciles del año.

Al utilizar polielectrolitos sintéticos se debe tener en cuenta su toxicidad, ya que se han obtenido a partir de monómeros, que en algunos casos, son relativamente tóxicos. Casi todos los polielectrolitos comerciales poseen un porcentaje mínimo de residualidad en forma de impurezas.

Los polielectrolitos pueden actuar como agentes de coagulación pero generalmente se requieren altas dosis y su aplicación no resulta económica, además las disoluciones concentradas presentan una alta viscosidad y baja solubilidad en agua, por tal motivo suelen ser empleados como ayudantes de coagulación junto con sales metálicas, aumentando la velocidad de sedimentación y mejorando la calidad del agua.

2.5.2.2.1. Polímeros aniónicos

Son polímeros de carga negativa con grados de polimerización que pueden ser superiores a 100 000 y su peso molecular se encuentra entre 1 y 10 millones, pueden estar formados por copolímeros acrilatoacrilamida, poliacrilamidas hidrolizadas, polivinilos y polietilenos portadores de grupos sulfónicos y carboxílicos. Las partículas con carga positiva se enlazan con los grupos activos de los polímeros aniónicos, esto se aprovecha para utilizarlos como coadyuvantes juntamente con sales de aluminio o hierro que aportan iones metálicos positivos. La tabla II proporciona algunos ejemplos de polielectrolitos aniónicos.

Tabla II. Ejemplos de polielectrolitos aniónicos

Tipo estructural	Grupo funcional	Polímero
Carboxilo	$\begin{array}{c} \text{O} \\ \parallel \\ \text{—C—} \\ \text{O}^- \end{array}$	Ácido poliacrílico $\left[\begin{array}{c} \text{CH}_2 - \text{CH} \\ \\ \text{C} = \text{O} \\ \\ \text{O}^- \end{array} \right]_n$
		Polimetacrilato $\left[\begin{array}{c} \text{CH}_2 - \text{C} \\ \quad \\ \text{CH}_3 \quad \text{C} = \text{O} \\ \\ \text{O}^- \end{array} \right]_n$
		Ácido poliglutámico $\left[\begin{array}{c} \text{H} \quad \text{O} \\ \quad \\ \text{CH}_2 - \text{C} - \text{C} \\ \quad \\ \text{CH}_2 \quad \text{C} = \text{O} \\ \\ \text{O}^- \end{array} \right]_n$
		Poliacrilamida parcialmente hidrolizada $\left[\begin{array}{c} \text{CH}_2 - \text{CH} - \text{CH}_2 - \text{CH} \\ \quad \quad \quad \\ \text{C} = \text{O} \quad \text{C} = \text{O} \\ \quad \\ \text{NH}_2 \quad \text{O}^- \end{array} \right]_n$
Sulfónico	$\begin{array}{c} \text{O} \\ \parallel \\ \text{—S—} \\ \parallel \quad \\ \text{O} \quad \text{O}^- \end{array}$	Polivinilsulfónicos $\left[\begin{array}{c} \text{H} \quad \text{H} \\ \quad \\ \text{CH}_2 - \text{C} - \text{CH}_2 - \text{C} \\ \quad \\ \text{O} = \text{S} = \text{O} \quad \text{O} = \text{S} = \text{O} \\ \quad \\ \text{O}^- \quad \text{O}^- \end{array} \right]_n$
		Poliestirenosulfonado $\left[\begin{array}{c} \text{CH}_2 - \text{CH} \\ \\ \text{C}_6\text{H}_4 \\ \\ \text{SO}_3^- \end{array} \right]_n$

Fuente: AGUILAR, M. I. *Tratamiento físico-químico de aguas residuales, coagulación-floculación*. p. p. 62-71.

2.5.2.2. Polímeros catiónicos

Son polímeros con carga positiva cuyo peso molecular es el más bajo de los tres grupos. Reciben las cargas positivas de grupos amina o amonio cuaternario. En este grupo se encuentran las poliaminas, poliamidaminas, polietileniminas, copolímeros de acrilamida con monómeros catiónicos, entre otros. Los polímeros catiónicos pueden funcionar como agentes coagulantes formando puentes, neutralización de cargas o ambas a la vez; absorben carga negativa por lo que se requieren pesos moleculares muy elevados. En la tabla III se muestran algunos ejemplos de polielectrolitos catiónicos.

Tabla III. Ejemplos de polielectrolitos catiónicos

Tipo estructural	Grupo funcional	Polímero
Amina	$\begin{array}{c} \text{H} \\ \\ -\text{N}-\text{H} \\ \\ \text{H} \end{array}$	Polietilamina $\left[-\text{CH}_2-\text{CH}_2-\overset{\text{H}}{\underset{\text{H}^+}{\text{N}}} \right]_n$
Amonio cuaternario	$\begin{array}{c} \text{R} \\ \\ -\text{N}-\text{R} \\ \\ \text{R}^+ \end{array}$	Polivinilaminas $\left[\begin{array}{c} \text{CH}_2-\text{CH} \\ \\ \text{H}-\text{N}-\text{H} \\ \\ \text{H} \end{array} \right]_n$
		Polidialildimetilamonio (PDADMA) $\left[\begin{array}{c} \text{CH}_2 \\ \text{HC} \quad \text{CH}-\text{CH}_2 \\ \quad \\ \text{H}_2\text{C} \quad \text{CH}_2 \\ \quad \\ \text{H}_3\text{C} \quad \text{N} \quad \text{CH}_3 \end{array} \right]_n$

Continuación de la tabla III.

		<p>Polivinilpiridinas</p> $\left[\begin{array}{c} \text{CH}_2 - \text{CH} \\ \\ \text{C}_6\text{H}_4 \\ \\ \text{N}^+ \\ \\ \text{R} \end{array} \right]_n$
		<p>Poliacrilamida parcialmente sustituida con grupos amonio cuaternario</p> $\left[\begin{array}{c} \text{CH}_2 - \text{CH} - \text{CH}_2 - \text{CH} \\ \quad \quad \\ \text{C} = \text{O} \quad \quad \text{CH}_3 \\ \quad \quad \\ \text{NH}_2 \quad \quad \text{R}_2 - \text{N}^+ - \text{R}_1 \\ \quad \quad \quad \\ \quad \quad \quad \text{R}_3 \end{array} \right]_n$
Imino	$\begin{array}{c} \text{R}_1 \\ \diagdown \\ \text{C} = \text{N} - \text{R}_3 \\ \diagup \\ \text{R}_2 \end{array}$	<p>Polietileniminas</p> $\left[\begin{array}{c} \text{H} \\ \\ \text{CH}_2 - \text{CH}_2 - \text{N} - \\ \\ \text{H} \\ \\ \text{Cl}^- \end{array} \right]_n$

Fuente: AGUILAR, M. I. *Tratamiento físico-químico de aguas residuales, coagulación-floculación*. p. p. 62-71.

2.5.2.2.3. Polímeros no iónicos

Son polímeros de comportamiento eléctricamente neutro en disolución acuosa, con elevados grados de polimerización que pueden alcanzar valores de 200 000 y con pesos moleculares comprendidos entre 3 y 15 millones. En este grupo se encuentran las poliacrilamidas, óxidos polietilénicos, polialcoholes y copolímeros del ácido acrílico y alcohol vinílico. Estos coagulantes adsorben partículas positivas y negativas. En la tabla IV se muestran algunos ejemplos de polielectrolitos no iónicos.

Tabla IV. Ejemplos de polielectrolitos no iónicos

Tipo estructural	Grupo funcional	Polímero
Poliamida	$\begin{array}{c} \text{H} \\ \\ -\text{N}-\text{H} \\ \\ \text{H} \end{array}$	Poliacrilamida $-\overset{\text{O}}{\parallel}{\text{C}}-\text{NH}_2$
		Polisina (polipéptido) $\left[\begin{array}{c} \text{N}-\text{C}-\text{C} \\ \quad \quad \\ \text{N}-\text{CH}_2-\text{O} \\ \\ \text{CH}_2 \\ \\ \text{CH}_2 \\ \\ \text{NH}_2 \end{array} \right]_n$
Polialcohol	-OH	Polivinil alcohol $\left[\text{CH}_2-\underset{\text{OH}}{\text{CH}} \right]_n$
		Copolímero del ácido acrílico y alcohol vinílico $\left[\begin{array}{c} \text{H} \quad \text{H} \quad \text{H} \\ \quad \quad \\ \text{C}-\text{CH}_2-\text{C}-\text{CH}_2-\text{C}-\text{CH}_2 \\ \quad \quad \\ \text{C}=\text{O} \quad \text{OH} \quad \text{C}=\text{O} \\ \text{OH} \quad \quad \quad \text{OH} \end{array} \right]_n$
Polióxido	$-\text{O}-$	Óxido polietilénico $-\left[\text{CH}_2-\text{CH}_2-\text{O} \right]_n-$

Fuente: AGUILAR, M. I. *Tratamiento físico-químico de aguas residuales, coagulación-floculación*. p. 62-71.

2.5.3. Coadyuvantes de coagulación

Pueden existir problemas y dificultades en el proceso de coagulación, por ello se desea resolver estos problemas y mejorar dicho proceso, a fin de conseguir una buena y rápida sedimentación. Para este propósito se usan los

coadyuvantes que son agentes auxiliares de la coagulación o floculación, actúan sobre los elementos que producen interferencias en la coagulación o floculación, favorecen la unión de flóculos o aumentan su densidad, a fin de mejorar la sedimentación.

2.5.3.1. Coadyuvantes inorgánicos

- Modificadores del pH del agua: se emplean para que el pH del agua esté en su punto óptimo, para facilitar la actuación del coagulante. Los más importantes son la cal y la soda cáustica. Los ácidos sulfúricos y fosfóricos son los más empleados cuando se requiere disminuir fuertemente el pH.
- Medio adsorbente: son materiales de soporte y un medio adsorbente pesado que facilitan la aglomeración de flóculos. Estos materiales pueden ser arcillas, sílice activada, carbón activado, carbonato cálcico precipitado.
- Oxidantes: se utilizan para la eliminación de compuestos orgánicos, estos agentes oxidantes pueden ser cloro u ozono.

2.5.3.2. Coadyuvantes orgánicos

En la primera etapa del tratamiento de aguas residuales se utiliza un coagulante inorgánico, actuando en la segunda etapa un coagulante orgánico, como ayudante, con la misión de favorecer el proceso de formación de flóculos.

- Polímeros de origen natural: almidón, alginatos, quitosán, entre otros
- Polímero de origen sintético: aniónicos, catiónicos y no iónicos

2.6. Prueba de jarras

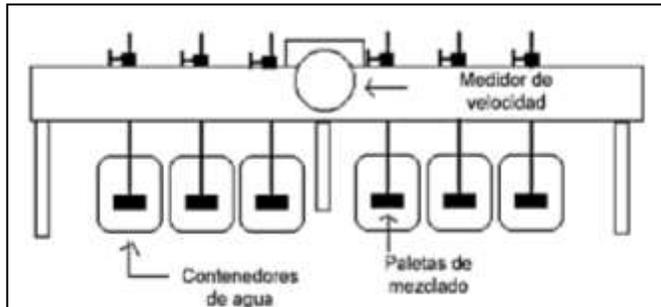
Es un método de simulación del proceso de coagulación y floculación realizado a nivel laboratorio, determina las condiciones de operación óptimas para el tratamiento de aguas. La prueba de jarras permite ajustar el pH, variar las dosis de coagulantes y floculantes, observar el tamaño del flóculo, alternar velocidades de mezclado y simular las condiciones de coagulación del agua en una planta de tratamiento.

La prueba de jarras consta de los siguientes pasos:

- Llenar los vasos de precipitados del equipo con el agua por analizar.
- Adicionar el coagulante a cada jarra y mezclar aproximadamente a 100 rpm por 1 minuto.
- Disminuir la velocidad de mezcla a 25 o 40 rpm, adicionar floculante si fuera necesario y continuar el proceso de mezclado por 20 minutos máximo.
- Apagar el equipo de mezclado y esperar a que sedimente de 10 a 45 minutos.
- Filtrar el contenido de las jarras y analizar el agua tratada para determinar su calidad.

La figura 6 detalla las partes que componen un equipo para realizar pruebas de jarras.

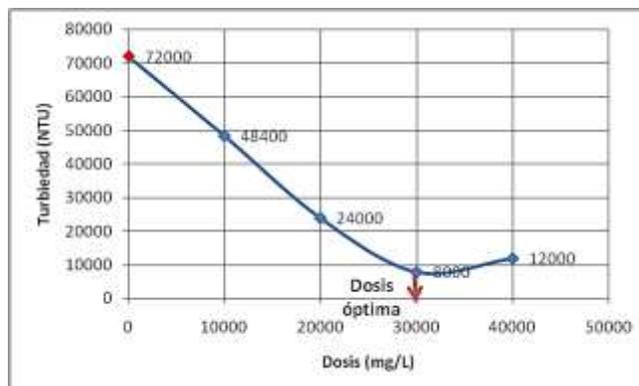
Figura 6. **Equipo de prueba de jarras**



Fuente: Sedapal. http://www.sedapal.com.pe/c/document_library/get_file?uuid=2792d3e3-59b7-4b9e-ae55-56209841d9b8&groupId=10154. Consulta: 20 de febrero de 2015.

Este método se realiza para determinar la dosis óptima de los coagulantes y floculantes, donde los resultados de turbiedad obtenidos en las diferentes jarras para dosis variables de coagulantes son graficados, colocando los valores de turbiedad en el eje "Y" y la dosis aplicada en el eje "X". La dosis óptima se obtiene en el punto de inflexión, que es el punto más bajo de la curva, este tipo de gráfica se ilustra en la figura 7.

Figura 7. **Gráfica de dosis óptima de coagulante**



Fuente: elaboración propia.

2.7. Yuca

La yuca o mandioca es una especie de origen americano, pertenece a la familia Euphorbiaceae, la especie *Manihot esculenta* es la especie cultivada. Las especies silvestres del género *Manihot* tienen dos centros de origen: uno en México y América Central y el otro en el noroeste de Brasil.

El cultivo de yuca es una actividad tradicional de gran importancia para la población rural de muchos países del mundo. En los países que están en vías de desarrollo, la yuca es uno de los componentes principales de la dieta alimentaria de sus habitantes, quienes alimentan también con ella a sus animales y la venden en el mercado. La yuca generalmente es utilizada para consumo humano, pero también tiene uso industrial en la producción de subproductos tales como harina, almidón, trozos secos, entre otros.

2.7.1. Producción y rendimiento agrícola de yuca

La producción mundial de yuca en 1997 llegó a más de 166 millones de toneladas métricas anuales (se producían solo 70 millones en 1960), de las cuales 51,7 % (85,9 millones) se cosechó en África, 28,7 % (47,7 millones) en Asia y el 19,4 % restante (32,3 millones) en América Latina y el Caribe.

En el año 2013 se utilizaron 898,42 hectáreas para cultivar yuca en Guatemala, la yuca es sembrada en los 22 departamentos de Guatemala pero la mayor cantidad proviene de los departamentos de El Progreso, Escuintla, Baja Verapaz e Izabal. En condiciones experimentales y en monocultivo, la yuca rinde hasta 90 Ton/ha de raíces (25 a 30 Ton/ha de materia seca); sin embargo, el rendimiento promedio, en condiciones reales (suelos marginales,

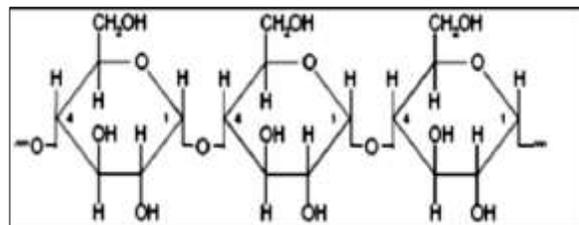
climas severos y asociación con otros cultivos) es de 9,8 Ton/ha en el mundo (12,4 Ton/ha en América Latina).

2.8. Almidón de yuca

El almidón es un polisacárido, resultado de la unión de moléculas de glucosa formando largas cadenas, esta sustancia permite que las plantas almacenen su alimento en raíces (yuca), tubérculos (papa), frutas y semillas. El almidón está constituido esencialmente por una mezcla de polisacáridos conformada por amilosa y amilopectina, y una fracción minoritaria (de 1 % a 2 %) de conformación no glucosídica. La mayoría de los almidones en su estructura glucosídica está conformada por 20 % de amilosa, y el restante 80 % de amilopectina. La amilosa es esencialmente un polímero, en el cual las unidades de anhidro glucosas están presentes y unidas en mayor parte por enlaces glucosídicos $\alpha(1-4)$ y un leve grado de ramificación en enlaces $\alpha(1-6)$.

La molécula tiene un peso molecular promedio de 10^5 a 10^6 g/mol y por la presencia de grupos hidroxilos ofrece propiedades hidrofílicas al polímero. La estructura simplificada de las moléculas lineales de amilosa se muestra en la figura 8.

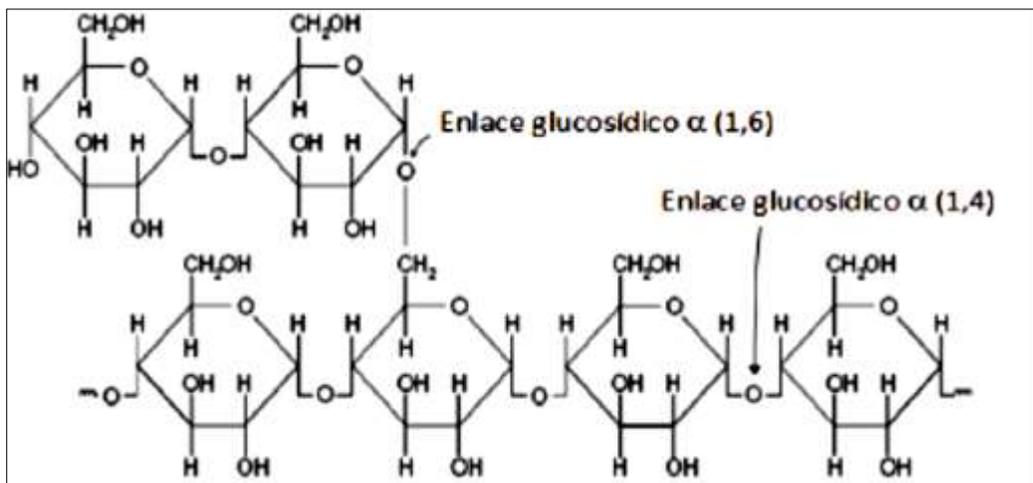
Figura 8. Estructura simplificada de las moléculas lineales de amilosa



Fuente: PEÑARANDA, Oscar. *Revisión de la modificación química del almidón con ácidos orgánicos*. p. 47.

La otra fracción del almidón es la amilopectina, que son moléculas más grandes que la amilosa, contienen enlaces glucosídicos $\alpha(1-4)$ y $\alpha(1-6)$ y ramificaciones que dan a su forma molecular semejanza a un árbol y es insoluble en agua. La macromolécula posee un peso molecular comprendido de 10^7 a 10^8 g/mol. La estructura simplificada de las moléculas ramificadas de amilopectina se muestra en la figura 9.

Figura 9. **Estructura simplificada de las moléculas ramificadas de amilopectina**



Fuente: PEÑARANDA, Oscar. *Revisión de la modificación química del almidón con ácidos orgánicos*. p. 48.

Existen dos tipos de almidón:

- Almidón nativo: es el almidón que no han sufrido ningún proceso de modificación química durante su obtención.

- Almidón modificado: es el almidón que ha sufrido algún proceso de modificación química durante su obtención.

El alto contenido de almidón de la yuca y su mayor proporción de amilosa, en comparación con otras fuentes de almidón, hacen de este un importante cultivo industrial además de ser un cultivo alimenticio rico en calorías. El almidón de yuca es la segunda fuente de almidón en el mundo después del maíz. La tabla V muestra la composición porcentual de diferentes fuentes de almidón.

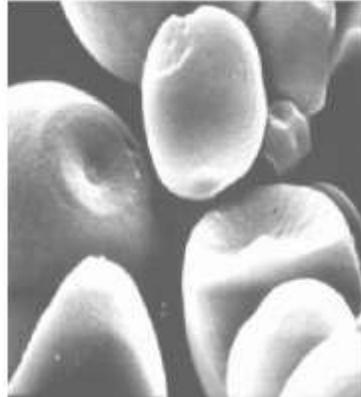
Tabla V. **Porcentaje de almidón, proteínas, fibras y ceniza de algunas fuentes de almidón**

COMPONENTE	COMPOSICIÓN (porcentaje)			
	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

Fuente: Biblioteca virtual de desarrollo sostenible y salud ambiental. Capítulo 4, el almidón como auxiliar. p. 34.

Los gránulos del almidón de yuca no son uniformes en tamaño y forma: son redondos con terminales truncados, esto se muestra en la figura 10.

Figura 10. **Gránulos de almidón nativo de yuca vistos con un microscopio electrónico**



Fuente: ALARCÓN, Freddy. *Almidón agrio de yuca en Colombia producción y recomendaciones*. p. 16.

2.8.1. Producción de almidón de yuca en Guatemala

La demanda de almidón de yuca en Guatemala no se conoce con precisión, pero se tiene conocimiento que varias industrias lo utilizan; en 2014 se exportaron 37 564 kilogramos de almidón de yuca. El almidón que se produce en Guatemala se exporta principalmente al mercado centroamericano, sobre todo, a El Salvador.

En Guatemala el principal producto que se extrae de la yuca es el almidón, mejor conocido como yuquilla, y el principal productor es el municipio de Sansare en el departamento de El Progreso. Este municipio produce el 95 % de la producción total de El Progreso, esta producción es destinada a la elaboración de almidón granulado mediante un proceso artesanal.

El almidón granulado es comprado por algunos empresarios para uso industrial, tanto a nivel nacional como internacional, ya que se exporta a El Salvador. Este almidón granulado es procesado para elaborar harina fina y extrafina. En Sansare la yuquilla o almidón granulado es comprado por los propietarios de un molino particular a fin de refinarlo e incrementar el precio del producto final aproximadamente en un 50 %.

Del proceso artesanal de producción de almidón granulado se obtienen como subproductos la cáscara y el “posol”. La cáscara se pone a secar para luego ser utilizada para la alimentación de animales o pasarla por un molino y obtener harina de cascarilla. El “posol” es un producto residuo del colado, con el que se hacen bolas que se secan al sol y se utilizan para la elaboración de concentrados.

El productor de yuca casi nunca tiene los medios para poder comercializar su producto en la capital y, por lo general, siempre lo vende a un intermediario mayorista. El intermediario mayorista compra la yuca fresca, la procesa y obtiene almidón granulado, por lo que debe contar con el equipo apropiado para el refinado del almidón granulado; si compra almidón granulado y lo refina posteriormente, puede exportarlo a Estados Unidos de América o a El Salvador o bien llevarlo a los diferentes mercados de Guatemala.

2.8.2. Proceso industrial de producción del almidón de yuca

- Recepción de raíces: las raíces, una vez cosechadas, deben ser transportadas a la planta de procesamiento dentro de las siguientes 24-48 horas para evitar su deterioro fisiológico y/o microbiano. El proceso inicia con el pesaje de la yuca.

- Lavado y pelado de raíces: en esta etapa se elimina la tierra y las impurezas adheridas a las raíces. La cascarilla se desprende por la fricción de unas raíces con otras durante el proceso de lavado. Las raíces de yuca son conducidas a los lavadores por medio de bandas transportadoras.
- Rallado o desintegración: en esta etapa se liberan los gránulos de almidón contenidos en las células de las raíces de la mandioca. La eficiencia de esta operación determina, en gran parte, el rendimiento total del almidón en el proceso de extracción. Las raíces trituradas se conducen por un elevador de rosca helicoidal a un alimentador-dosificador, que permitirá la distribución de la cantidad programada a un desintegrador; este es un cilindro rotativo que funciona a alta velocidad periférica, con láminas dentadas en la superficie que rallan la yuca causando el rompimiento celular y permiten la liberación del almidón.
- Colado o extracción: en esta etapa se realiza la separación de la pulpa o material fibroso de la lechada de almidón. La masa rallada es una mezcla de mandioca rallada con agua, que es bombeada a las tamizadoras o extractoras cónicas rotativas para retirar la fibra del almidón. Estos extractores son montados en baterías con la finalidad de aumentar el rendimiento. El agua entra en chorros a contracorriente para separar mejor el almidón.
- Purificación y concentración: la suspensión extraída o lechada de almidón es alimentada a dos separadores centrífugos, uno primario y otro secundario, para las etapas de purificación y concentración, respectivamente. La lechada de almidón se alimenta a la centrífuga primaria de platos por medio de un tanque pulmón o de bombeo donde

es purificada con la adición de agua y centrifugada para retirar los almidones solubles y partículas extrañas. Enseguida, la lechada de almidón purificada sigue a la etapa de concentración en la centrífuga secundaria, donde el almidón es concentrado hasta 20-22 °Bé (Baumé).

- Zarandeo: el almidón concentrado es bombeado a un tanque especial de mezclado que posee un mecanismo de agitación, que permite la mezcla constante del producto concentrado y evita su decantación. Luego es bombeado a un separador. La canasta centrífuga consta de un disco que gira a altas revoluciones y que permite obtener un producto con 33-35 % de humedad. El filtro de vacío consta de una tela cilíndrica perforada cubierta por tejidos que se remueven cada ocho horas.
- Sedimentación o deshidratación: se realiza por medio de sedimentación o centrifugación, para separar los gránulos de almidón de su suspensión en agua.
- Secado: se remueve la humedad del almidón mediante un método artificial. El almidón deshidratado al vacío pasa a través de una válvula rotativa que lo dosifica a un secador neumático. El almidón es secado en secadores neumáticos con corto tiempo de residencia y evaporación rápida de agua. El almidón se conduce y seca por una corriente de aire caliente proveniente de una caldera. Las temperaturas en estos equipos varían entre 120-170 °C.
- Acondicionamiento: comprende las etapas de molienda, tamizado y empaque. Una vez secado y enfriado el almidón es tamizado para remover las partículas grandes y luego es transportado por alimentadores helicoidales a una envasadora automática.

2.8.3. Almidón modificado

El uso del almidón sin modificar es limitado debido a su fragilidad en el área de empaques, el deterioro de las propiedades mecánicas a condiciones ambientales por la exposición con la humedad, la reducida procesabilidad debido a su alta viscosidad, así como su incompatibilidad con algunos solventes y polímeros. Debido a las limitaciones de los almidones en cuanto a propiedades mecánicas y químicas, y a su alta degradación, se realizan modificaciones químicas, físicas o microbianas.

Algunas de las modificaciones químicas son:

- Entrecruzamiento
- Sustitución
- Hidrólisis
- Oxidación

Estas modificaciones se hacen con la adición de químicos como sulfato de aluminio, óxido de propileno, hidróxido de sodio y otros. Estos procesos cambian la estructura de la amilosa y de la amilopectina y se obtiene como resultado que el almidón puede formar geles resistentes, tiene mejores funciones como espesante, resiste a medios ácidos, a cambios de temperatura, entre otros.

Las modificaciones físicas son las que se obtienen por aplicación de calor y luego secado, de modo que el almidón queda pregelatinizado. Se utilizan en mezclas secas de refrescos, pudines, salsas y alimentos con alto contenido de sólidos. Dentro de las propiedades que adquieren los alimentos con el uso de almidones modificados se encuentran: pueden ser rehidratados en agua fría y

no requieren cocción, mejoran su viscosidad, la apariencia del producto, resisten medios ácidos, cambios de temperatura, procesos que generen fricción, estabilidad del gel en procesos de congelado-descongelado.

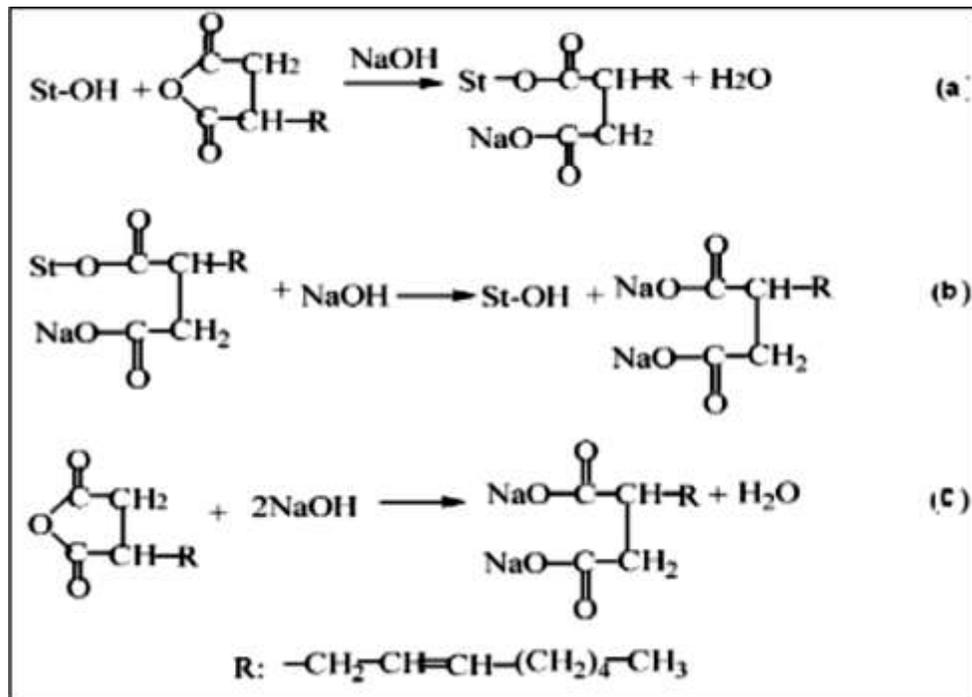
2.8.3.1. Almidón modificado con hidróxido de sodio

Como se sabe, el almidón es un polímero natural, que en suspensión acuosa es capaz de adquirir una estructura de gel, por calentamiento o tratamiento con solución de hidróxido de sodio.

Las moléculas de almidón, ya sea la amilosa o la amilopectina, se encuentran encerradas en una envoltura que debe romperse para permitir su liberación al medio líquido. La ruptura de la membrana envolvente puede lograrse a través de calentamiento o por medio de la adición de hidróxido de sodio a una suspensión concentrada de almidón. Ambas alternativas son de fácil ejecución en plantas de tratamiento de agua, pero la gelatinización con hidróxido de sodio, en frío, generalmente, es la que se prefiere, porque no exige un sistema especial de calentamiento.

En las modificaciones de polisacáridos se utilizan catalizadores básicos que ayudan a disminuir la degradación en el producto. En el mecanismo de reacción entre el hidróxido de sodio y el almidón, se da una sustitución nucleofílica de los grupos hidroxilos del almidón y permite que las partículas de almidón se hinchen, esto se ilustra en la figura 11. Pero el problema está en que conlleva a reacciones indeseables, disminuyéndose la selectividad de la reacción.

Figura 11. Mecanismo de reacción del almidón con hidróxido de sodio.



Fuente: PEÑARANDA, Oscar. *Revisión de la modificación química del almidón con ácidos orgánicos*. p. 50.

En general, el uso del hidróxido de sodio como catalizador se utiliza para la modificación de la estructura del almidón, con el fin de favorecer la disposición de los grupos hidroxilos para ser modificados con los cloruros de ácidos orgánicos.

El gel resultante, ya sea por calentamiento o tratamiento con solución de hidróxido de sodio, tiene la propiedad de actuar como coadyuvante de floculación de las partículas en suspensión que presenta el agua de río cuando, en el proceso de potabilización, se la trata con coagulantes inorgánicos.

Preparación del gel de almidón con hidróxido de sodio:

- Preparar una suspensión acuosa de almidón al 1 % - 1,5 %.
- Agregar lentamente hidróxido de sodio, previamente diluido en agua desmineralizada, a la suspensión de almidón en una relación 1:5. Se deben efectuar pruebas para encontrar la proporción ideal entre los dos productos que optimice los resultados de coagulación-floculación.
- Agitar vigorosamente la mezcla a fin lo lograr una homogenización completa hasta su gelificación.

3. DISEÑO METODOLÓGICO

3.1. Variables

En la tabla VI se enumeran cada una de las variables de este estudio.

Tabla VI. **Variables independientes y dependientes**

Variable	Independiente	Dependiente
Coagulante	X	
Coadyuvante de coagulación	X	
Proporción de mezcla	X	
Dosis aplicada	X	
Turbiedad		X
Color		X
Porcentaje de remoción de turbiedad		X
Porcentaje de remoción de color		X

Fuente: elaboración propia.

3.2. Delimitación del campo de estudio

La investigación se limita a la evaluación de tres coagulantes inorgánicos: cloruro férrico, sulfato de aluminio y clorhidróxido de aluminio, mezclados con almidón de yuca modificado con hidróxido de sodio y paralelamente con la poliamina N-50, en una muestra de agua del río Villalobos, tomada en el Km. 13 hacia Villa Nueva. El estudio es a escala laboratorio por medio de pruebas de jarras, encontrando dosis óptimas de las mezclas de coagulantes, específicas para la muestra de agua analizada.

3.3. Recursos humanos disponibles

Investigador: Br. Ligia Iveth Ulín Ramírez

Asesor técnico: Ing. Qco. Jorge Mario Estrada Asturias

Representante de la empresa: Ing. Estuardo Morfin

3.4. Recursos materiales disponibles

Bienes materiales empleados para el alcance de los objetivos.

3.4.1. Equipo

Conjunto formado por aparatos técnicos, instrumentos y materiales necesarios para realizar un trabajo.

Figura 12. Prueba de jarras “Velp Scientifica”



Fuente: Laboratorio de Representaciones Químicas, S. A.

Figura 13. Prueba de jarras “ECE”



Fuente: Laboratorio de Representaciones Químicas, S. A.

Figura 14. Turbidímetro “La Motte”



Fuente: Laboratorio de Representaciones Químicas, S. A.

Figura 15. **Colorímetro “Hanna Instruments”**



Fuente: Laboratorio de Representaciones Químicas, S. A.

Figura 16. **Balanza analítica “Radwag”**



Fuente: Laboratorio de Representaciones Químicas, S. A.

Figura 17. **Agitador magnético “Jintan Precies Machinery Co., Ltd.”**



Fuente: Laboratorio de Representaciones Químicas, S. A.

3.4.2. Cristalería

- *Beakers* de 1000 mL
- Pipetas de 1 mL
- Pipetas de 2 mL
- Pipetas de 10 mL
- *Beakers* de 250 mL
- Lápices de succión de 25 mL
- Vidrio de reloj
- Varilla de agitación
- Piseta de 100 mL
- Portafiltros de policarbonato “Albet”

3.4.3. Reactivos

- Almidón de yuca
- Hidróxido de sodio
- Poliamina N-50
- Cloruro férrico
- Sulfato de aluminio
- Clorhidróxido de aluminio
- Polímero aniónico “Innovafloc 1021”

3.4.4. Material auxiliar

- Membranas filtrantes de nitrato de celulosa
- Envases PET

3.5. Técnicas cuantitativas y cualitativas

La tabla VII muestra las variables dependientes y el método de estudio a emplear.

Tabla VII. **Variables dependientes y su clasificación de las técnicas de estudio empleadas**

Parámetro	Cualitativa	Cuantitativa
Turbiedad		X
Color		X
Porcentaje de remoción de turbiedad		X
Porcentaje de remoción de color		X

Fuente: elaboración propia.

3.6. Recolección y ordenamiento de la información

En las siguientes tablas se presenta la información obtenida como resultado de las pruebas realizadas.

Tabla VIII. **Resultados obtenidos en las pruebas de clarificación con cloruro férrico + poliamina N-50 y sus mezclas**

Parámetros iniciales del agua cruda							
Turbiedad Inicial		Color Inicial					
42.9 NTU		70 PCU					
44 NTU		60 PCU					
Datos de pruebas de clarificación							
No. Corrida	Coagulante	Parámetro	Dosis (mg/L)				
			50	75	100	125	150
1	Mezcla 1	Turbiedad (NTU)	2,6	0,41	0,23	0,13	0,21
		Color (PCU)	20	30	10	20	20
	Mezcla 2	Turbiedad (NTU)	6,09	1,28	0,20	0,20	0,49
		Color (PCU)	40	30	10	20	0
2	Mezcla 1	Turbiedad (NTU)	2,71	0,48	0,13	0,11	0,17
		Color (PCU)	30	30	30	30	30
	Mezcla 2	Turbiedad (NTU)	1,50	0,22	0,14	0	0,18
		Color (PCU)	30	40	30	30	30
3	Mezcla 1	Turbiedad (NTU)	2,76	0,57	0,23	0,23	0,13
		Color (PCU)	30	30	30	30	30
	Mezcla 2	Turbiedad (NTU)	1,05	0,22	0,32	0,17	0,27
		Color (PCU)	30	30	30	30	30
4	Mezcla 1	Turbiedad (NTU)	2,77	0,68	0,28	0,14	0,32
		Color (PCU)	30	40	30	30	30
	Mezcla 2	Turbiedad (NTU)	1,59	0,33	0,19	0,19	0,27
		Color (PCU)	30	30	40	20	30
5	Mezcla 1	Turbiedad (NTU)	2,94	0,10	0,17	0,08	0,14
		Color (PCU)	40	40	30	30	30
	Mezcla 2	Turbiedad (NTU)	0,70	0,35	0,35	0,28	0,30
		Color (PCU)	40	40	30	30	40

Fuente: elaboración propia.

Tabla IX. **Resultados obtenidos en las pruebas de clarificación con cloruro férrico + almidón de yuca modificado y sus mezclas**

No. Corrida	Coagulante	Dosis (mg/L)	Parámetro	
			Turbiedad (NTU)	Color (PCU)
1	Mezcla 1	125	0,5	30
	Mezcla 2	100	3,04	30
2	Mezcla 1	125	0,34	30
	Mezcla 2	125	0,52	40
3	Mezcla 1	150	0,36	30
	Mezcla 2	125	0,64	40
4	Mezcla 1	125	0,32	30
	Mezcla 2	125	0,32	40
5	Mezcla 1	125	0,08	30
	Mezcla 2	125	0,29	30

Fuente: elaboración propia.

Tabla X. **Resultados obtenidos en las pruebas de clarificación con sulfato de aluminio + poliaminaN-50 y sus mezclas**

Parámetros iniciales del agua cruda							
Turbiedad Inicial		Color Inicial					
75 NTU		80 PCU					
Datos de pruebas de clarificación							
No. Corrida	Coagulante	Parámetro	Dosis (mg/L)				
			100	200	300	400	450
1	Mezcla 1	Turbiedad (NTU)	25	14,4	6,56	2,37	1,98
		Color (PCU)	70	80	50	50	50
	Mezcla 2	Turbiedad (NTU)	14	9,63	3,61	1,51	1,98
		Color (PCU)	80	70	60	60	60
2	Mezcla 1	Turbiedad (NTU)	20,7	10,98	5,34	1,96	2,37
		Color (PCU)	70	70	60	50	60
	Mezcla 2	Turbiedad (NTU)	15	10,36	5,26	2,39	2,77
		Color (PCU)	90	80	60	70	70

Continuación de la tabla X.

3	Mezcla 1	Turbiedad (NTU)	19,5	12,5	6,96	2,79	2,37
		Color (PCU)	100	80	60	50	50
	Mezcla 2	Turbiedad (NTU)	26,7	10,88	5,65	6,92	2,32
		Color (PCU)	70	60	70	40	50
4	Mezcla 1	Turbiedad (NTU)	23,9	15,9	14,6	10,54	9,25
		Color (PCU)	100	90	100	90	90
	Mezcla 2	Turbiedad (NTU)	17,2	11,1	6,86	4,35	4,50
		Color (PCU)	80	60	50	40	50
5	Mezcla 1	Turbiedad (NTU)	12,8	9,61	3,78	1,12	1,11
		Color (PCU)	80	60	50	40	50
	Mezcla 2	Turbiedad (NTU)	15,8	11,7	6,94	6,25	3,36
		Color (PCU)	60	60	50	50	40

Fuente: elaboración propia.

Tabla XI. **Resultados obtenidos en las pruebas de clarificación con sulfato de aluminio + almidón de yuca modificado y sus mezclas**

No. Corrida	Coagulante	Dosis (mg/L)	Parámetro	
			Turbiedad (NTU)	Color (PCU)
1	Mezcla 1	450	5,42	70
	Mezcla 2	400	11,8	70
2	Mezcla 1	400	8,61	60
	Mezcla 2	400	18,3	80
3	Mezcla 1	450	7,41	60
	Mezcla 2	450	3,60	50
4	Mezcla 1	450	3,94	50
	Mezcla 2	400	4,52	50
5	Mezcla 1	450	5,53	60
	Mezcla 2	450	2,17	50

Fuente: elaboración propia.

Tabla XII. **Resultados obtenidos en las pruebas de clarificación con clorhidróxido de aluminio + poliaminaN-50 y sus mezclas**

Parámetros iniciales del agua cruda							
Turbiedad Inicial		Color Inicial					
23.3 NTU		20 PCU					
38.4 NTU		0 PCU					
54.4 NTU		0 PCU					
Datos de pruebas de clarificación							
No. Corrida	Coagulante	Parámetro	Dosis (mg/L)				
			50	75	100	125	150
1	Mezcla 1	Turbiedad (NTU)	3,09	0,38	0,06	0	0
		Color (PCU)	0	0	0	0	0
	Mezcla 2	Turbiedad (NTU)	0	0	0	0	0
		Color (PCU)	0	0	0	0	0
2	Mezcla 1	Turbiedad (NTU)	3,58	0,49	0	0	0
		Color (PCU)	0	0	0	0	0
	Mezcla 2	Turbiedad (NTU)	0	0	0	0	0
		Color (PCU)	0	0	0	0	0
3	Mezcla 1	Turbiedad (NTU)	2,96	0	0	0	0
		Color (PCU)	0	0	0	0	0
	Mezcla 2	Turbiedad (NTU)	0	0	0	0	0
		Color (PCU)	0	0	0	0	0
4	Mezcla 1	Turbiedad (NTU)	1,80	0	0	0	0
		Color (PCU)	0	0	0	0	0
	Mezcla 2	Turbiedad (NTU)	0	0	0	0	0
		Color (PCU)	0	0	0	0	0
5	Mezcla 1	Turbiedad (NTU)	0	0	0	0	0
		Color (PCU)	0	0	0	0	0
	Mezcla 2	Turbiedad (NTU)	0	0	0	0	0
		Color (PCU)	0	0	0	0	0

Fuente: elaboración propia.

Tabla XIII. **Resultados obtenidos en las pruebas de clarificación con clorhidróxido de aluminio + almidón de yuca modificado y sus mezclas**

No. Corrida	Coagulante	Dosis (mg/L)	Parámetro	
			Turbiedad (NTU)	Color (PCU)
1	Mezcla 1	125	0	0
	Mezcla 2	50	0	0
2	Mezcla 1	100	0	0
	Mezcla 2	50	0	0
3	Mezcla 1	75	0,22	0,25
	Mezcla 2	50	0	0
4	Mezcla 1	75	0,74	0,5
	Mezcla 2	50	0	0
5	Mezcla 1	50	0	0
	Mezcla 2	50	0	0

Fuente: elaboración propia.

3.7. Tabulación, ordenamiento y procesamiento de la información

En las siguientes tablas se presentan los resultados obtenidos a partir del tratamiento de los datos experimentales de este estudio.

Tabla XIV. **Resultados de dosis óptimas obtenidas con cloruro férrico + poliaminaN-50, aplicando la Mezcla 1**

No. Corrida	Dosis óptima (mg/L)	Turbiedad (NTU)	Color (PCU)	Porcentaje de remoción turbiedad	Porcentaje de remoción color
1	125	0,13	20	99,70	69,23
2	125	0,11	30	99,75	53,85
3	150	0,13	30	99,70	53,85
4	125	0,14	30	99,68	53,85
5	125	0,08	30	99,82	53,85
PROMEDIO	130	0,118	28	99,73	56,92

Fuente: elaboración propia.

Tabla XV. **Resultados de dosis óptimas obtenidas con cloruro férrico + almidón de yuca modificado, aplicando la Mezcla 1**

Corrida	Dosis óptima (mg/L)	Turbiedad (NTU)	Color (PCU)	Porcentaje de remoción turbiedad	Porcentaje de remoción color
1	125	0,5	30	98,85	53,85
2	125	0,34	30	99,22	53,85
3	150	0,36	30	99,17	53,85
4	125	0,32	30	99,26	53,85
5	125	0,08	30	99,82	53,85
PROMEDIO	130	0,32	30	99,26	53,85

Fuente: elaboración propia.

Tabla XVI. **Resultados de dosis óptimas obtenidas con cloruro férrico + poliaminaN-50, aplicando la Mezcla 2**

Corrida	Dosis óptima (mg/L)	Turbiedad (NTU)	Color (PCU)	Porcentaje de remoción turbiedad	Porcentaje de remoción color
1	100	0,2	10	99,54	84,62
2	125	0	30	100,00	53,85
3	125	0,17	30	99,61	53,85
4	125	0,19	20	99,56	69,23
5	125	0,28	30	99,36	53,85
PROMEDIO	120,00	0,17	24,00	99,61	63,08

Fuente: elaboración propia.

Tabla XVII. **Resultados de dosis óptimas obtenidas con cloruro férrico + almidón de yuca modificado, aplicando la Mezcla 2**

Corrida	Dosis óptima (mg/L)	Turbiedad (NTU)	Color (PCU)	Porcentaje de remoción turbiedad	Porcentaje de remoción color
1	100	3,04	30	93,00	53,85
2	125	0,52	40	98,80	38,46
3	125	0,64	40	98,53	38,46
4	125	0,32	40	99,26	38,46
5	125	0,29	30	99,33	53,85
PROMEDIO	120,00	0,96	36,00	97,79	44,62

Fuente: elaboración propia.

Tabla XVIII. **Resultados de dosis óptimas obtenidas con sulfato de aluminio + poliaminaN-50, aplicando la Mezcla 1**

Corrida	Dosis óptima (mg/L)	Turbiedad (NTU)	Color (PCU)	Porcentaje de remoción turbiedad	Porcentaje de remoción color
1	450	1,98	50	97,36	37,50
2	400	1,96	50	97,39	37,50
3	450	2,37	50	96,84	37,50
4	450	9,25	80	87,67	0,00
5	450	1,11	40	98,52	50,00
PROMEDIO	440	3,334	54	95,55	32,50

Fuente: elaboración propia.

Tabla XIX. **Resultados de dosis óptimas obtenidas con sulfato de aluminio + almidón de yuca modificado, aplicando la Mezcla 1**

Corrida	Dosis óptima (mg/L)	Turbiedad (NTU)	Color (PCU)	Porcentaje de remoción turbiedad	Porcentaje de remoción color
1	450	5,42	70	92,77	12,50
2	400	8,61	60	88,52	25,00
3	450	7,41	60	90,12	25,00
4	450	3,94	50	94,75	37,50
5	450	5,53	60	92,63	25,00
PROMEDIO	440	6,182	60	91,76	25,00

Fuente: elaboración propia.

Tabla XX. **Resultados de dosis óptimas obtenidas con sulfato de aluminio + poliaminaN-50, aplicando la Mezcla 2**

Corrida	Dosis óptima (mg/L)	Turbiedad (NTU)	Color (PCU)	Porcentaje de remoción turbiedad	Porcentaje de remoción color
1	400	1,51	60	97,99	25,00
2	400	2,39	70	96,81	12,50
3	450	2,32	50	96,91	37,50
4	400	4,35	40	94,20	50,00
5	450	3,36	40	95,52	50,00
PROMEDIO	420,00	2,79	52,00	96,29	35,00

Fuente: elaboración propia.

Tabla XXI. **Resultados de dosis óptimas obtenidas con sulfato de aluminio + almidón de yuca modificado, aplicando la Mezcla 2**

Corrida	Mezcla 2 Dosis (mg/L)	Turbiedad (NTU)	Color (PCU)	Porcentaje de remoción turbiedad	Porcentaje de remoción color
1	400	11,8	70	84,27	12,50
2	400	18,3	80	75,60	0,00
3	450	3,6	50	95,20	37,50
4	400	4,52	50	93,97	37,50
5	450	2,17	50	97,11	37,50
PROMEDIO	420,00	8,08	60,00	89,23	25,00

Fuente: elaboración propia.

Tabla XXII. **Resultados de dosis óptimas obtenidas con clorhidróxido de aluminio + poliaminaN-50, aplicando la Mezcla 1**

Corrida	Dosis óptima (mg/L)	Turbiedad (NTU)	Color (PCU)	Porcentaje de remoción turbiedad	Porcentaje de remoción color
1	125	0	0	100,00	100,00
2	100	0	0	100,00	100,00
3	75	0	0	100,00	100,00
4	75	0	0	100,00	100,00
5	50	0	0	100,00	100,00
PROMEDIO	85	0	0	100,00	100,00

Fuente: elaboración propia.

Tabla XXIII. **Resultados de dosis óptimas obtenidas con clorhidróxido de aluminio + almidón de yuca modificado, aplicando la Mezcla 1**

Corrida	Dosis óptima (mg/L)	Turbiedad (NTU)	Color (PCU)	Porcentaje de remoción turbiedad	Porcentaje de remoción color
1	125	0	0	100,00	100,00
2	100	0	0	100,00	100,00
3	75	0,22	0,25	99,43	96,25
4	75	0,74	0,5	98,09	92,50
5	50	0	0	100,00	100,00
PROMEDIO	85	0,192	0,15	99,50	97,75

Fuente: elaboración propia.

Tabla XXIV. **Resultados de dosis óptimas obtenidas con clorhidróxido de aluminio + poliaminaN-50, aplicando la Mezcla 2**

Corrida	Dosis óptima (mg/L)	Turbiedad (NTU)	Color (PCU)	Porcentaje de remoción turbiedad	Porcentaje de remoción color
1	50	0	0	100,00	100,00
2	50	0	0	100,00	100,00
3	50	0	0	100,00	100,00
4	50	0	0	100,00	100,00
5	50	0	0	100,00	100,00
PROMEDIO	50,00	0,00	0,00	100,00	100,00

Fuente: elaboración propia.

Tabla XXV. **Resultados de dosis óptimas obtenidas con clorhidróxido de aluminio + almidón de yuca modificado, aplicando la Mezcla 2**

Corrida	Dosis óptima (mg/L)	Turbiedad (NTU)	Color (PCU)	Porcentaje de remoción turbiedad	Porcentaje de remoción color
1	50	0	0	100,00	100,00
2	50	0	0	100,00	100,00
3	50	0	0	100,00	100,00
4	50	0	0	100,00	100,00
5	50	0	0	100,00	100,00
PROMEDIO	50,00	0,00	0,00	100,00	100,00

Fuente: elaboración propia.

3.8. Análisis estadístico

El análisis estadístico permite establecer si existe diferencia significativa entre el funcionamiento de los dos coadyuvantes de coagulación, el almidón de yuca y la poliamina N-50. Para ello, se llevó a cabo un análisis de varianza (ANOVA) de dos factores para cada una de las variables respuesta, porcentaje de remoción de turbiedad y color, y para cada coagulante inorgánico estudiado. Los factores por analizar son tipo de coadyuvante de coagulación y proporción de mezcla.

3.8.1. Análisis de varianza de dos factores para las mezclas con cloruro férrico

Las siguientes tablas muestran los resultados del análisis de varianza cuando se emplean las mezclas con cloruro férrico.

Tabla XXVI. Experimento de dos factores para el porcentaje de remoción de turbiedad en mezclas con cloruro férrico

Factor A (Proporción de mezcla)	Factor B (Coadyuvante de coagulación)		Suma	Media
	Poliamina N-50	Almidón de yuca modificado		
Mezcla 1	99,70	98,85	994,96	99,50
	99,75	99,22		
	99,70	99,17		
	99,68	99,26		
	99,82	99,82		
Mezcla 2	99,54	93,00	987,00	98,70
	100,00	98,80		
	99,61	98,53		
	99,56	99,26		
	99,36	99,33		
Suma	996,71	985,25	1 981,96	
Media	99,67	98,52		99,1

Fuente: elaboración propia.

Tabla XXVII. **Análisis de varianza para el porcentaje de remoción de turbiedad en mezclas con cloruro férrico**

Origen de las variaciones	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio de los cuadrados	F	Probabilidad	Valor crítico para F
Muestra	3,1706	1	3,1706	1,7049	0,2101	4,4940
Columnas	6,5682	1	6,5682	3,5319	0,0785	4,4940
Interacción	2,3205	1	2,3205	1,2478	0,2805	4,4940
Dentro del grupo	29,7549	16	1,8597			
Total	41,8142	19				

Fuente: elaboración propia.

Tabla XXVIII. **Experimento de dos factores para el porcentaje de remoción de color en mezclas con cloruro férrico**

Factor A (Proporción de mezcla)	Factor B (Coadyuvante de coagulación)		Suma	Media
	Poliamina N-50	Almidón de yuca modificado		
Mezcla 1	69,23	53,85	553,85	55,38
	53,85	53,85		
	53,85	53,85		
	53,85	53,85		
	53,85	53,85		
Mezcla 2	84,62	53,85	538,46	53,85
	53,85	38,46		
	53,85	38,46		
	69,23	38,46		
	53,85	53,85		
Suma	600	492,31	1092,31	
Media	60	49,23		54,62

Fuente: elaboración propia.

Tabla XXIX. **Análisis de varianza para el porcentaje de remoción de color en mezclas con cloruro férrico**

Origen de las variaciones	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio de los cuadrados	F	Probabilidad	Valor crítico para F
Muestra	11,8343	1	11,8343	0,1538	0,7001	4,4940
Columnas	579,8817	1	579,8817	7,5385	0,0144	4,4940
Interacción	295,8580	1	295,8580	3,8462	0,0675	4,4940
Dentro del grupo	1 230,7692	16	76,9231			
Total	2 118,3432	19				

Fuente: elaboración propia.

Tabla XXX. **Prueba de Tukey para determinar si existe diferencia significativa entre los porcentajes de remoción de color de los coadyuvantes de coagulación en mezclas con cloruro férrico**

Intervalo de confianza	Valor crítico para Q	$w = Q * S$	Media Poliamina N-50	Media Almidón de yuca modificado	Diferencia entre medias comparadas
95 %	3	8,32	60	49,23	10,77

Fuente: elaboración propia.

- Si el valor de la diferencia entre las medias comparadas es menor que el valor w , no existe diferencia significativa entre las medias comparadas.
- Si el valor de la diferencia entre las medias comparadas es mayor que el valor w , sí existe diferencia significativa entre las medias comparadas.

3.8.2. Análisis de varianza de dos factores para las mezclas con sulfato de aluminio

Las siguientes tablas muestran los resultados del análisis de varianza cuando se emplean las mezclas con sulfato de aluminio.

Tabla XXXI. Experimento de dos factores para el porcentaje de remoción de turbiedad en mezclas con sulfato de aluminio

Factor A (Proporción de mezcla)	Factor B (Coadyuvante de coagulación)		Suma	Media
	Poliamina N-50	Almidón de yuca modificado		
Mezcla 1	97,36	92,77	936,56	93,66
	97,39	88,52		
	96,84	90,12		
	87,67	94,75		
	98,52	92,63		
Mezcla 2	97,99	84,27	927,57	92,76
	96,81	75,60		
	96,91	95,20		
	94,20	93,97		
	95,52	97,11		
Suma	959,20	904,93	1 864,13	
Media	95,92	90,49		93,21

Fuente: elaboración propia.

Tabla XXXII. Análisis de varianza para el porcentaje de remoción de turbiedad en mezclas con sulfato de aluminio

Origen de las variaciones	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio de los cuadrados	F	Probabilidad	Valor crítico para F
Muestra	4,0380	1	4,0380	0,1461	0,7073	4,4940
Columnas	147,2436	1	147,2436	5,3270	0,0347	4,4940
Interacción	13,2736	1	13,2736	0,4802	0,4983	4,4940
Dentro del grupo	442,2539	16	27,6409			
Total	606,8091	19				

Fuente: elaboración propia.

Tabla XXXIII. **Prueba de Tukey para determinar si existe diferencia significativa entre los porcentajes de remoción de turbiedad de los coadyuvantes de coagulación en mezclas con sulfato de aluminio**

Intervalo de confianza	Valor crítico para Q	$w = Q * S$	Media Poliamina N-50	Media Almidón de yuca modificado	Diferencia entre medias comparadas
95 %	3	4,99	95,92	90,49	5,43

Fuente: elaboración propia.

- Si el valor de la diferencia entre las medias comparadas es menor que el valor w , no existe diferencia significativa entre las medias comparadas.
- Si el valor de la diferencia entre las medias comparadas es mayor que el valor w , sí existe diferencia significativa entre las medias comparadas.

Tabla XXXIV. **Experimento de dos factores para el porcentaje de remoción de color en mezclas con sulfato de aluminio**

Factor A (Proporción de mezcla)	Factor B (Coadyuvante de coagulación)		Suma	Media
	Poliamina N-50	Almidón de yuca modificado		
Mezcla 1	37.50	12.50	287.5	28.75
	37.50	25.00		
	37.50	25.00		
	0.00	37.50		
	50.00	25.00		
Mezcla 2	25.00	12.50	300	30
	12.50	0.00		
	37.50	37.50		
	50.00	37.50		
	50.00	37.50		
Suma	337.5	250	587.5	
Media	33.75	25		29.38

Fuente: elaboración propia.

Tabla XXXV. **Análisis de varianza para el porcentaje de remoción de color en mezclas con sulfato de aluminio**

Origen de las variaciones	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio de los cuadrados	F	Probabilidad	Valor crítico para F
Muestra	7,8125	1	7,8125	0,0308	0,8630	4,4940
Columnas	382,8125	1	382,8125	1,5077	0,2372	4,4940
Interacción	7,8125	1	7,8125	0,0308	0,8630	4,4940
Dentro del grupo	4062,5	16	253,9063			
Total	4 460,9375	19				

Fuente: elaboración propia.

3.8.3. Análisis de varianza de dos factores para las mezclas con clorhidróxido de aluminio

Las siguientes tablas muestran los resultados del análisis de varianza cuando se emplean las mezclas con clorhidróxido de aluminio.

Tabla XXXVI. **Experimento de dos factores para el porcentaje de remoción de turbiedad en mezclas con clorhidróxido de aluminio**

Factor A (Proporción de mezcla)	Factor B (Coadyuvante de coagulación)		Suma	Media
	Poliamina N-50	Almidón de yuca modificado		
Mezcla 1	100,00	100,00	997,52	99,75
	100,00	100,00		
	100,00	99,43		
	100,00	98,09		
	100,00	100,00		
Mezcla 2	100,00	100,00	1000	100
	100,00	100,00		
	100,00	100,00		
	100,00	100,00		
	100,00	100,00		
Suma	1000	997,52	1 997,52	
Media	100	99,75		99,88

Fuente: elaboración propia.

Tabla XXXVII. **Análisis de varianza para el porcentaje de remoción de turbiedad en mezclas con clorhidróxido de aluminio**

Origen de las variaciones	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio de los cuadrados	F	Probabilidad	Valor crítico para F
Muestra	0,3077	1	0,3077	1,7909	0,1995	4,4940
Columnas	0,3077	1	0,3077	1,7909	0,1995	4,4940
Interacción	0,3077	1	0,3077	1,7909	0,1995	4,4940
Dentro del grupo	2,7488	16	0,1718			
Total	3,6718	19				

Fuente: elaboración propia.

Tabla XXXVIII. **Experimento de dos factores para el porcentaje de remoción de color en mezclas con clorhidróxido de aluminio**

Factor A (Proporción de mezcla)	Factor B (Coadyuvante de coagulación)		Suma	Media
	Poliamina N-50	Almidón de yuca modificado		
Mezcla 1	100,00	100,00	988,75	98,88
	100,00	100,00		
	100,00	96,25		
	100,00	92,50		
	100,00	100,00		
Mezcla 2	100,00	100,00	1000	100
	100,00	100,00		
	100,00	100,00		
	100,00	100,00		
	100,00	100,00		
Suma	1000	988,75	1 988,75	
Media	100	98,88		99,44

Fuente: elaboración propia.

Tabla XXXIX. **Análisis de varianza para el porcentaje de remoción de color en mezclas con clorhidróxido de aluminio**

Origen de las variaciones	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio de los cuadrados	F	Probabilidad	Valor crítico para F
Muestra	6,3281	1	6,3281	2,25	0,1531	4,4940
Columnas	6,3281	1	6,3281	2,25	0,1531	4,4940
Interacción	6,3281	1	6,3281	2,25	0,1531	4,4940
Dentro del grupo	45	16	2,8125			
Total	63,9844	19				

Fuente: elaboración propia.

Para los resultados del análisis de varianza (ANOVA) se tomará una distribución de Fisher con un nivel de confianza del 95 % para encontrar la F crítica y compararla con la F calculada.

- Si el valor de la F calculada es mayor al valor de la F crítica, se rechaza la hipótesis nula y se acepta la hipótesis alternativa.
- Si el valor de la F calculada es menor al valor de la F crítica, se rechaza la hipótesis alternativa y se acepta la hipótesis nula.

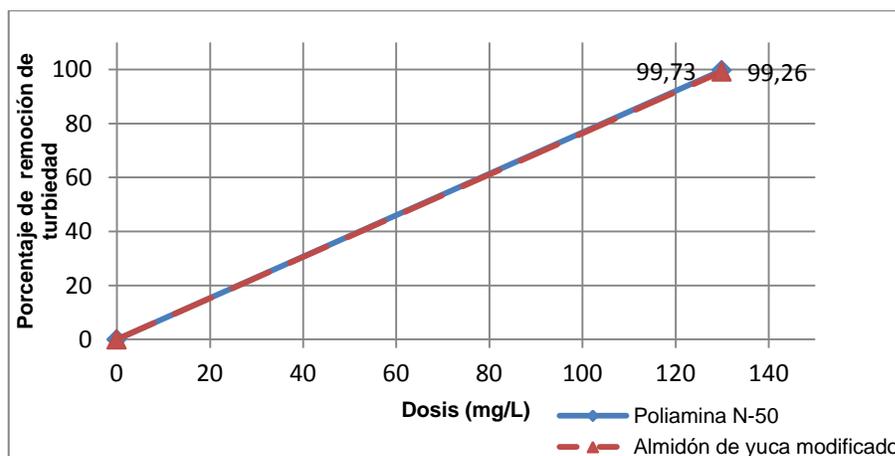
4. RESULTADOS

Tabla XL. **Porcentajes de remoción de turbiedad y color obtenidos con dos coadyuvantes de coagulación en mezclas con cloruro férrico, en dos proporciones diferentes**

Proporción de mezcla	Dosis óptima promedio (mg/L)	Coadyuvante de coagulación			
		Poliamina N-50		Almidón de yuca modificado	
		Porcentaje remoción de turbiedad	Porcentaje remoción de color	Porcentaje remoción de turbiedad	Porcentaje remoción de color
95:5	130	99,73	56,92	99,26	53,85
90:10	120	99,61	63,08	97,79	44,62

Fuente: elaboración propia.

Figura 18. **Porcentaje de remoción de turbiedad de dos coadyuvantes de coagulación en mezclas con cloruro férrico, en una proporción 95:5, en función de la dosis aplicada**



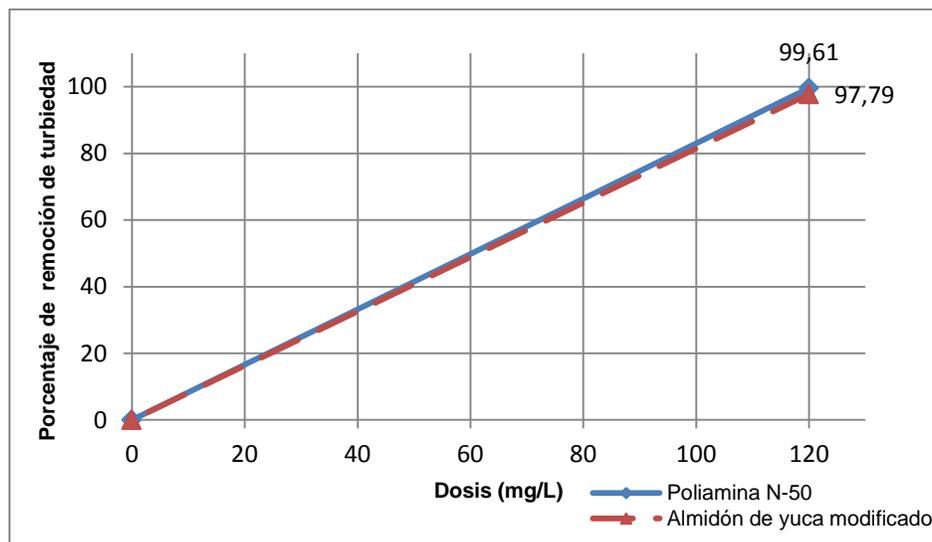
Fuente: elaboración propia.

Tabla XLI. **Modelo matemático para el porcentaje de remoción de turbiedad de dos coadyuvantes de coagulación en mezclas con cloruro férrico, en una proporción 95:5, en función de la dosis aplicada**

Color	Coadyuvante de coagulación	Modelo matemático	R ²
	Poliamina N-50	$\%Rt = 0,7672d$	1
	Almidón de yuca modificado	$\%Rt = 0,7635d - 10^{-14}$	1

Fuente: elaboración propia.

Figura 19. **Porcentaje de remoción de turbiedad de dos coadyuvantes de coagulación en mezclas con cloruro férrico, en una proporción 90:10, en función de la dosis aplicada**



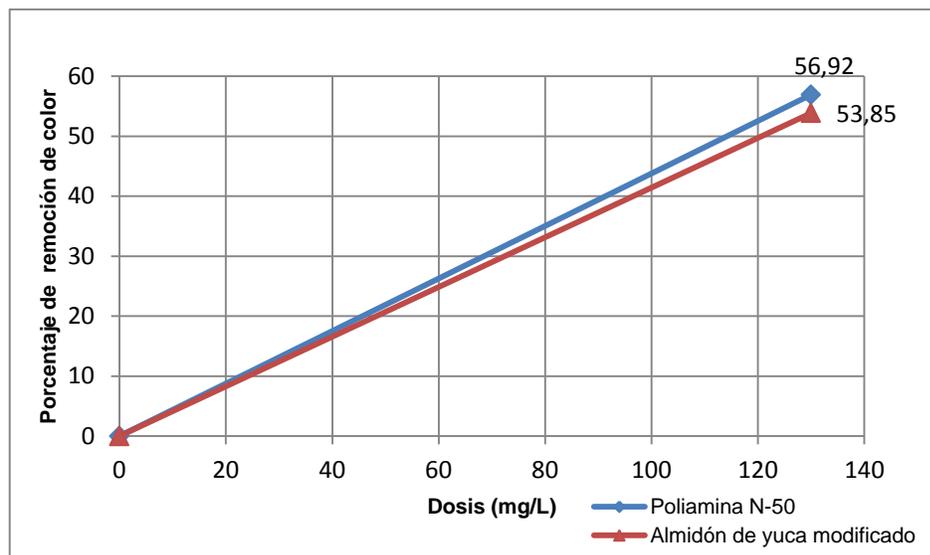
Fuente: elaboración propia.

Tabla XLII. **Modelo matemático para el porcentaje de remoción de turbiedad de dos coadyuvantes de coagulación en mezclas con cloruro férrico, en una proporción 90:10, en función de la dosis aplicada**

Color	Coadyuvante de coagulación	Modelo matemático	R ²
	Poliamina N-50	$\%Rt = 0,8301d$	1
	Almidón de yuca modificado	$\%Rt = 0,8149d - 2 \cdot 10^{-14}$	1

Fuente: elaboración propia.

Figura 20. **Porcentaje de remoción de color de dos coadyuvantes de coagulación en mezclas con cloruro férrico, en una proporción 95:5, en función de la dosis aplicada**



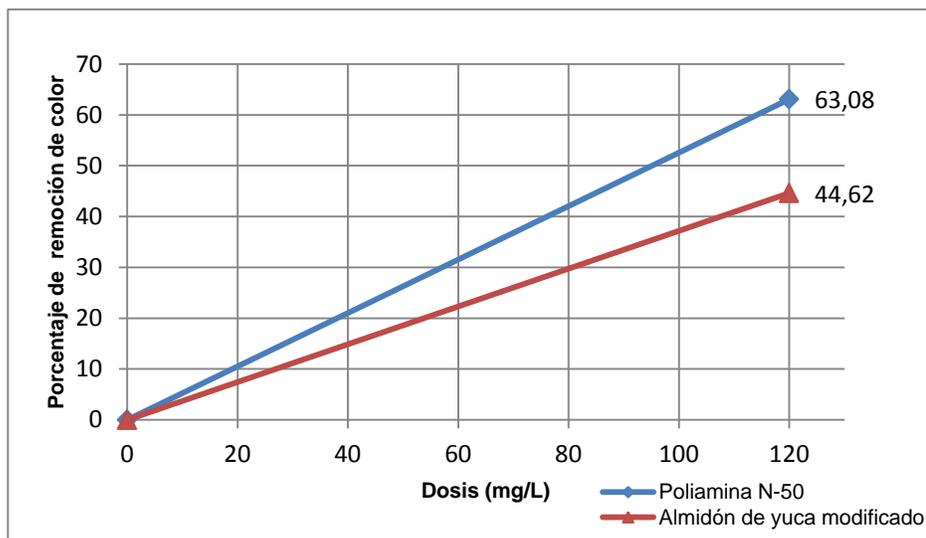
Fuente: elaboración propia.

Tabla XLIII. **Modelo matemático para el porcentaje de remoción de color de dos coadyuvantes de coagulación en mezclas con cloruro férrico, en una proporción 95:5, en función de la dosis aplicada**

Color	Coadyuvante de coagulación	Modelo matemático	R ²
	Poliamina N-50	%Rc = 0,4378d	1
	Almidón de yuca modificado	%Rc = 0,4142d	1

Fuente: elaboración propia.

Figura 21. **Porcentaje de remoción de color de dos coadyuvantes de coagulación en mezclas con cloruro férrico, en una proporción 90:10, en función de la dosis aplicada**



Fuente: elaboración propia.

Tabla XLIV. **Modelo matemático para el porcentaje de remoción de color de dos coadyuvantes de coagulación en mezclas con cloruro férrico, en una proporción 90:10, en función de la dosis aplicada**

Color	Coadyuvante de coagulación	Modelo matemático	R ²
	Poliamina N-50	$\%Rc = 0,5257d + 8 \cdot 10^{-15}$	1
	Almidón de yuca modificado	$\%Rc = 0,3718d$	1

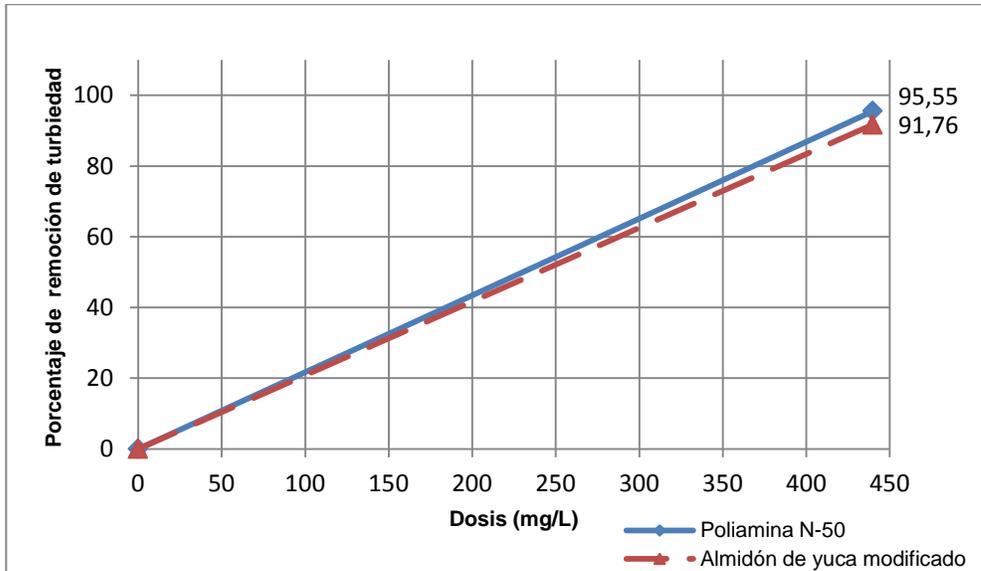
Fuente: elaboración propia.

Tabla XLV. **Porcentajes de remoción de turbiedad y color obtenidos con dos coadyuvantes de coagulación en mezclas con sulfato de aluminio, en dos proporciones diferentes**

Proporción de mezcla	Dosis óptima promedio (mg/L)	Coadyuvante de coagulación			
		Poliamina N-50		Almidón de yuca modificado	
		Porcentaje remoción de turbiedad	Porcentaje remoción de color	Porcentaje remoción de turbiedad	Porcentaje remoción de color
95:5	440	95,55	32,50	91,76	25
90:10	420	96,29	35,00	89,23	25

Fuente: elaboración propia.

Figura 22. **Porcentaje de remoción de turbiedad de dos coadyuvantes de coagulación en mezclas con sulfato de aluminio, en una proporción 95:5, en función de la dosis aplicada**



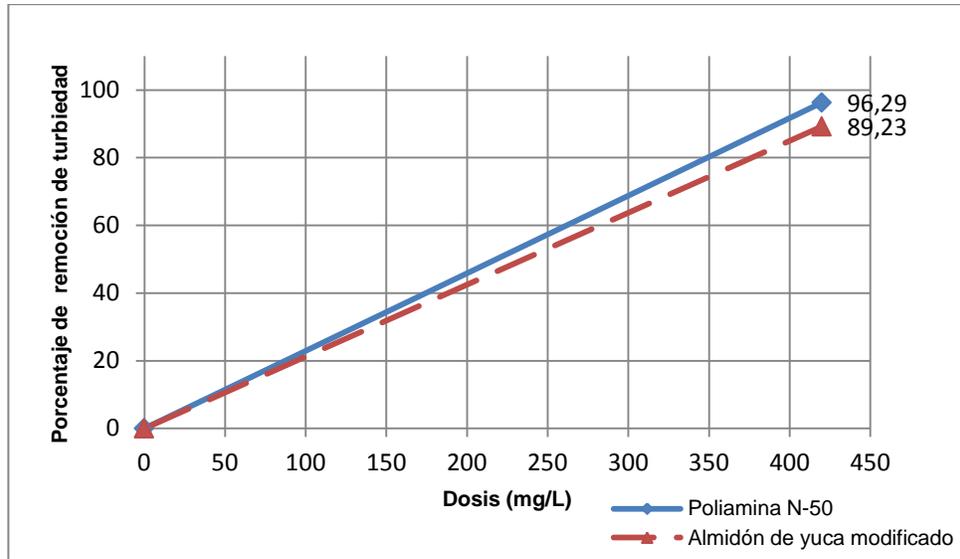
Fuente: elaboración propia.

Tabla XLVI. **Modelo matemático para el porcentaje de remoción de turbiedad de dos coadyuvantes de coagulación en mezclas con sulfato de aluminio, en una proporción 95:5, en función de la dosis aplicada**

Color	Coadyuvante de coagulación	Modelo matemático	R ²
	Poliamina N-50	%Rt = 0,2172d	1
	Almidón de yuca modificado	%Rt = 0,2085d	1

Fuente: elaboración propia.

Figura 23. **Porcentaje de remoción de turbiedad de dos coadyuvantes de coagulación en mezclas con sulfato de aluminio, en una proporción 90:10, en función de la dosis aplicada**



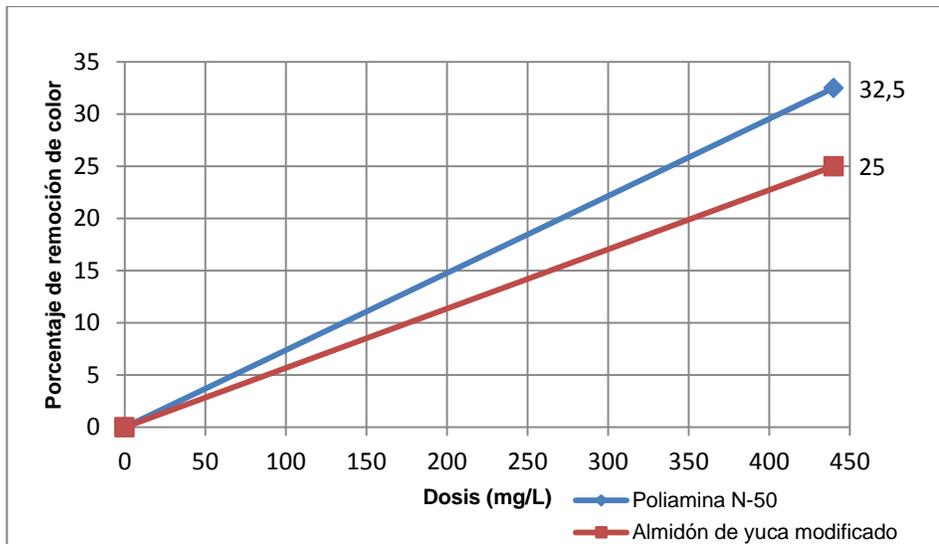
Fuente: elaboración propia.

Tabla XLVII. **Modelo matemático para el porcentaje de remoción de turbiedad de dos coadyuvantes de coagulación en mezclas con sulfato de aluminio, en una proporción 90:10, en función de la dosis aplicada**

Color	Coadyuvante de coagulación	Modelo matemático	R ²
	Poliamina N-50	$\%R_t = 0,2293d$	1
	Almidón de yuca modificado	$\%R_t = 0,2125d$	1

Fuente: elaboración propia.

Figura 24. **Porcentaje de remoción de color de dos coadyuvantes de coagulación en mezclas con sulfato de aluminio, en una proporción 95:5, en función de la dosis aplicada**



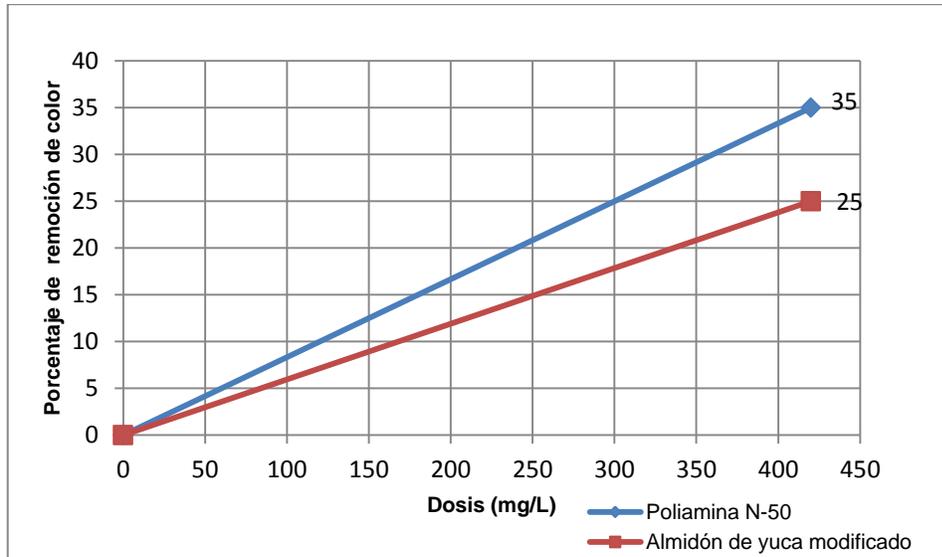
Fuente: elaboración propia.

Tabla XLVIII. **Modelo matemático para el porcentaje de remoción de color de dos coadyuvantes de coagulación en mezclas con sulfato de aluminio, en una proporción 95:5, en función de la dosis aplicada**

Color	Coadyuvante de coagulación	Modelo matemático	R ²
	Poliamina N-50	%Rc = 0,0739d	1
	Almidón de yuca modificado	%Rc = 0,0568d	1

Fuente: elaboración propia.

Figura 25. **Porcentaje de remoción de color de dos coadyuvantes de coagulación en mezclas con sulfato de aluminio, en una proporción 90:10, en función de la dosis aplicada**



Fuente: elaboración propia.

Tabla XLIX. **Modelo matemático para el porcentaje de remoción de color de dos coadyuvantes de coagulación en mezclas con sulfato de aluminio, en una proporción 90:10, en función de la dosis aplicada**

Color	Coadyuvante de coagulación	Modelo matemático	R ²
	Poliamina N-50	%Rc = 0,0833d	1
	Almidón de yuca modificado	%Rc = 0,0595d	1

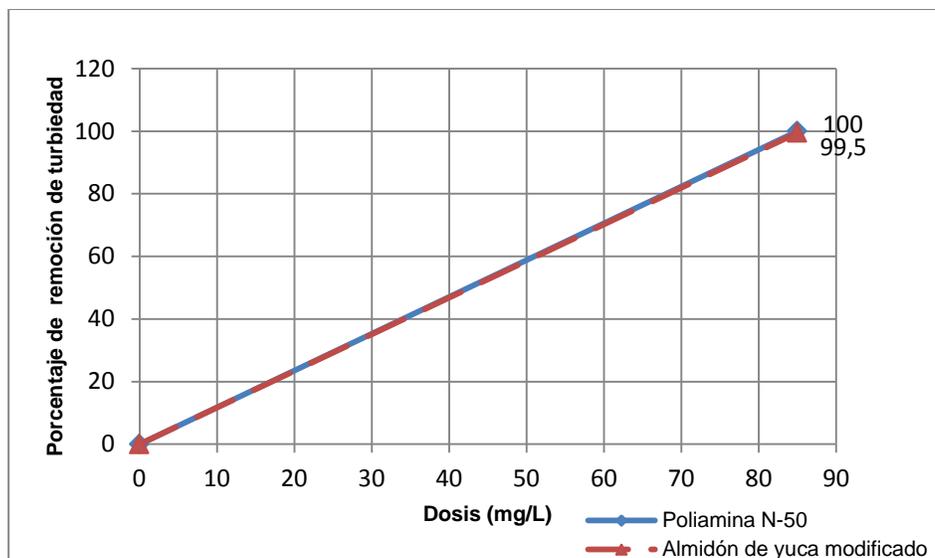
Fuente: elaboración propia.

Tabla L. **Porcentajes de remoción de turbiedad y color obtenidos con dos coadyuvantes de coagulación en mezclas con clorhidróxido de aluminio, en dos proporciones diferentes**

Proporción de mezcla	Dosis óptima promedio (mg/L)	Coadyuvante de coagulación			
		Poliamina N-50		Almidón de yuca modificado	
		Porcentaje remoción de turbiedad	Porcentaje remoción de color	Porcentaje remoción de turbiedad	Porcentaje remoción de color
95:5	85	100,00	100,00	99,50	97,75
90:10	50	100,00	100,00	100,00	100,00

Fuente: elaboración propia.

Figura 26. **Porcentaje de remoción de turbiedad de dos coadyuvantes de coagulación en mezclas con clorhidróxido de aluminio, en una proporción 95:5, en función de la dosis aplicada**



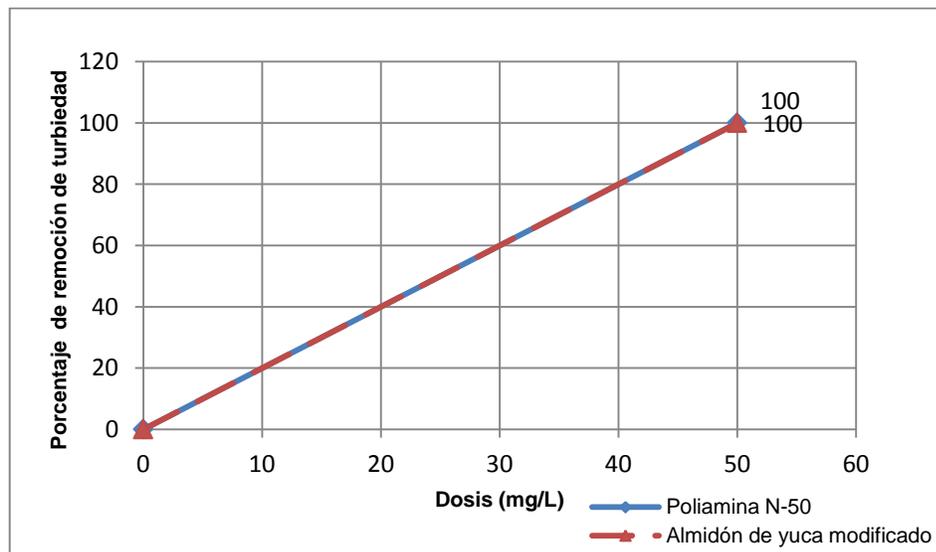
Fuente: elaboración propia.

Tabla LI. **Modelo matemático para el porcentaje de remoción de turbiedad de dos coadyuvantes de coagulación en mezclas con clorhidróxido de aluminio, en una proporción 95:5, en función de la dosis aplicada**

Color	Coadyuvante de coagulación	Modelo matemático	R ²
	Poliamina N-50	%Rt = 1,1765d	1
	Almidón de yuca modificado	%Rt = 1,1706d	1

Fuente: elaboración propia.

Figura 27. **Porcentaje de remoción de turbiedad de dos coadyuvantes de coagulación en mezclas con clorhidróxido de aluminio, en una proporción 90:10, en función de la dosis aplicada**



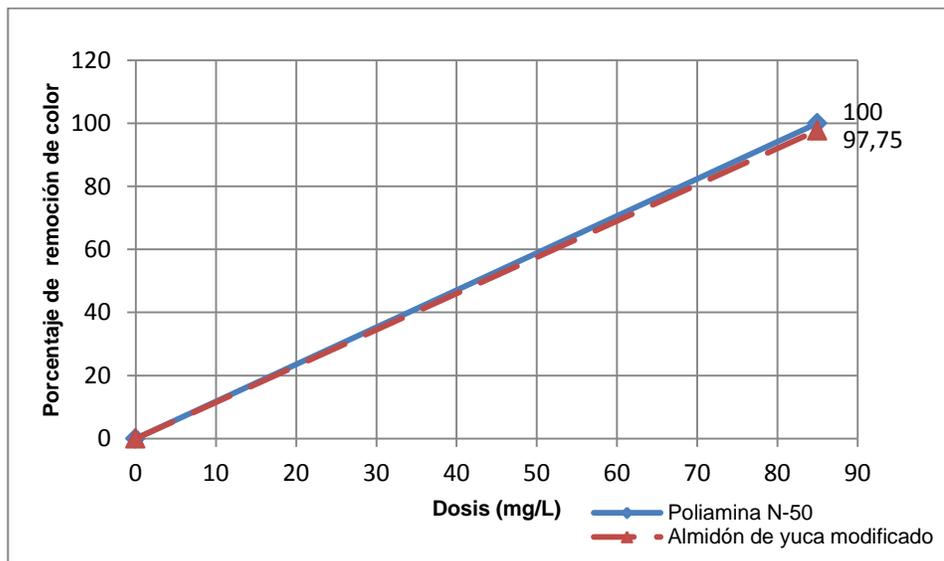
Fuente: elaboración propia.

Tabla LII. **Modelo matemático para el porcentaje de remoción de turbiedad de dos coadyuvantes de coagulación en mezclas con clorhidróxido de aluminio, en una proporción 90:10, en función de la dosis aplicada**

Color	Coadyuvante de coagulación	Modelo matemático	R ²
	Poliamina N-50	%Rt = 2d	1
	Almidón de yuca modificado	%Rt = 2d	1

Fuente: elaboración propia.

Figura 28. **Porcentaje de remoción de color de dos coadyuvantes de coagulación en mezclas con clorhidróxido de aluminio, en una proporción 95:5, en función de la dosis aplicada**



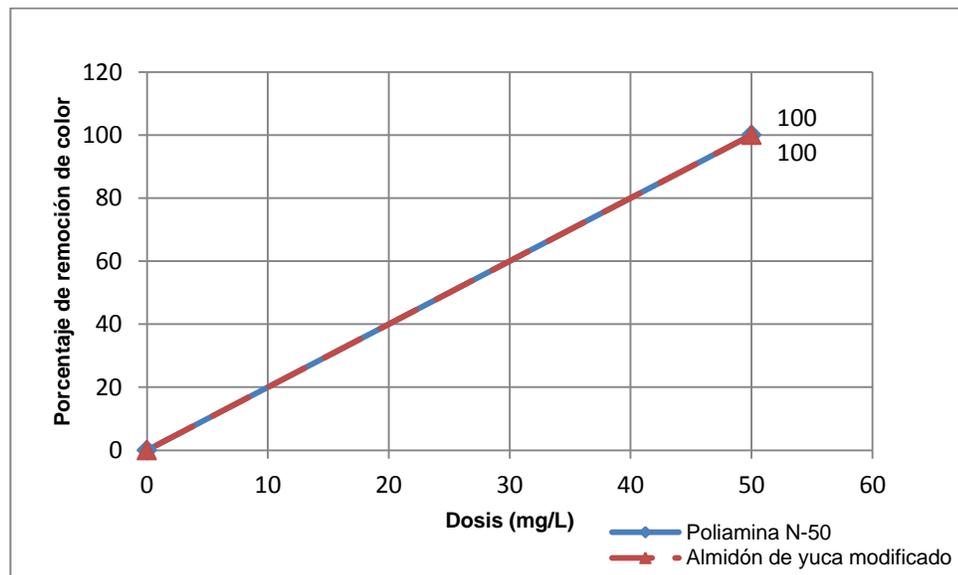
Fuente: elaboración propia.

Tabla LIII. **Modelo matemático para el porcentaje de remoción de color de dos coadyuvantes de coagulación en mezclas con clorhidróxido de aluminio, en una proporción 95:5, en función de la dosis aplicada**

Color	Coadyuvante de coagulación	Modelo matemático	R ²
	Poliamina N-50	%Rc = 1,1765d	1
	Almidón de yuca modificado	%Rc = 1,15d	1

Fuente: elaboración propia.

Figura 29. **Porcentaje de remoción de color de dos coadyuvantes de coagulación en mezclas con clorhidróxido de aluminio, en una proporción 90:10, en función de la dosis aplicada**



Fuente: elaboración propia.

Tabla LIV. **Modelo matemático para el porcentaje de remoción de color de dos coadyuvantes de coagulación en mezclas con clorhidróxido de aluminio, en una proporción 90:10, en función de la dosis aplicada**

Color	Coadyuvante de coagulación	Modelo matemático	R²
	Poliamina N-50	$\%Rc = 2d$	1
	Almidón de yuca modificado	$\%Rc = 2d$	1

Fuente: elaboración propia.

5. INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS

Este informe final del proyecto desarrollado como ejercicio profesional supervisado evaluó el rendimiento, expresado como porcentaje de remoción de turbiedad y color, del almidón de yuca (*Manihot esculenta*) modificado con hidróxido de sodio en mezclas con diferentes coagulantes inorgánicos, como coadyuvante de coagulación, en comparación con la poliamina N-50 en el proceso de clarificación del agua del río Villalobos.

Para modificar el almidón de yuca con hidróxido de sodio, se preparó una suspensión de almidón al 1 % y se agregó lentamente hidróxido de sodio hasta lograr la concentración deseada. Se trabajó con almidón de yuca modificado porque al modificar químicamente la estructura del almidón por la adición de hidróxido de sodio, aumenta la viscosidad de la solución y su tiempo de vida útil; ya que la adición de una base fuerte inhibe el crecimiento bacteriano en la solución de almidón.

Se eligieron tres coagulantes inorgánicos para elaborar las mezclas con los coadyuvantes de coagulación por estudiar, estos son: cloruro férrico, sulfato de aluminio y clorhidróxido de aluminio; porque estos coagulantes son los que generalmente se utilizan para el tratamiento de efluentes industriales. Las proporciones de mezcla de los coagulantes inorgánicos y los coadyuvantes de coagulación que se decidieron evaluar son: 95 % de coagulante inorgánico y 5 % de coadyuvante, 90 % de coagulante inorgánico y 10 % de coadyuvante; ya que son las proporciones más rentables para poder comercializar un coagulante y no incrementar significativamente el costo.

Los coadyuvantes de coagulación se utilizan porque ayudan a obtener mejores resultados de clarificación y las dosis requeridas son menores al aumentar la proporción de coadyuvante en la mezcla. Las mezclas de coagulantes inorgánicos con almidón de yuca modificado realizadas son estables, no se presenta la formación de precipitados o varias fases en la misma mezcla y se aprecia una mínima cantidad de insolubles propia del almidón de yuca, esto se evidencia en el apéndice 3, donde se encuentran las mezclas diluidas al 10 % para ser aplicadas durante las pruebas de jarras.

La muestra de agua por tratar fue tomada en el Km. 13 hacia Villa Nueva, en el río Villalobos. Esta agua está compuesta por arcillas, así como desechos industriales y aguas domésticas provenientes de las colonias aledañas a su curso. Se realizaron muestreos periódicos constantes, para trabajar con agua con las mismas condiciones que se encuentra en el río y evitar la descomposición de la misma. El rango de turbiedad del agua del río Villalobos se mantuvo entre 23,3 – 75 NTU y el rango de color fue de 0 – 80 PCU.

Por medio de pruebas de jarras realizadas a nivel laboratorio, se encontraron las dosis óptimas de las mezclas de coagulantes inorgánicos con la poliamina N-50, estos resultados se utilizan como control para luego evaluar las mezclas de coagulantes inorgánicos con almidón de yuca modificado aplicando las dosis óptimas encontradas anteriormente.

Con base en los resultados presentados en la tabla XL, aplicando las mezclas realizadas con cloruro férrico y la poliamina N-50, la dosis óptima promedio es menor al aumentar la cantidad de coadyuvante en la mezcla, siendo 130 mg/L para la mezcla 95:5 y 120 mg/L para la mezcla 90:10. Aplicando estas dosis se obtienen porcentajes de remoción de turbiedad mayores con las mezclas que contienen la poliamina N-50 que en las mezclas

con almidón de yuca modificado, pero los porcentajes de remoción de turbiedad son mayores al 97 % utilizando cualquiera de los dos coadyuvantes.

Al aumentar la cantidad de coadyuvante en las mezclas con cloruro férrico, se obtienen menores porcentajes de remoción de turbiedad empleando las mezclas con almidón de yuca modificado, mientras que utilizando las mezclas con la poliamina N-50 se tienen aproximadamente los mismos porcentajes de remoción de turbiedad.

El análisis de varianza para el porcentaje de remoción de turbiedad obtenido luego de la aplicación de las mezclas con cloruro férrico, presentado en la tabla XXVII, para un valor de F calculado con un 95 % de confianza, muestra que no existe diferencia significativa entre los coadyuvantes de coagulación y la proporción de mezcla, por lo que el porcentaje de remoción de turbiedad no se ve afectado por el tipo de coadyuvante y la proporción utilizada en las mezclas con cloruro férrico.

En cuanto al porcentaje de remoción de color alcanzado aplicando las mezclas con cloruro férrico como coagulante, se obtiene una mayor remoción de color con las mezclas que contienen la poliamina N-50 que en las mezclas con almidón de yuca modificado pero los porcentajes de remoción de color no son mayores al 64 % utilizando cualquiera de los dos coadyuvantes. Al aumentar la cantidad de coadyuvante en las mezclas, se obtienen menores porcentajes de remoción de color con las mezclas que contienen almidón de yuca modificado, con las mezclas que incluyen la poliamina N-50 el comportamiento es inverso, ya que se presentan mayores porcentajes de remoción de color.

El análisis de varianza para el porcentaje de remoción de color aplicando las mezclas con cloruro férrico como coagulante, presentado en la tabla XXIX, para un valor de F calculado con un 95 % de confianza, muestra que no existe diferencia significativa entre la proporción de mezcla, pero sí existe diferencia significativa entre los coadyuvantes de coagulación, por lo que el porcentaje de remoción de color no se ve afectado por la proporción utilizada en las mezclas con cloruro férrico, pero sí lo afecta el tipo de coadyuvante .

Se realizó una prueba de Tukey para confirmar que verdaderamente existía diferencia significativa entre los coadyuvantes de coagulación para la remoción de color y evitar caer en un error tipo I pero esta prueba indicó que los resultados obtenidos en el análisis de varianza son correctos. La diferencia entre el rendimiento de los coadyuvantes de coagulación para la remoción de color en las mezclas con cloruro férrico, se aprecia gráficamente en las figuras 20 y 21; permitiendo comprobar que los coagulantes en tratamiento de aguas sirven para eliminar las partículas en suspensión y no las partículas disueltas, como es el caso del color en el agua.

Los resultados presentados en la tabla XLV, aplicando las mezclas realizadas con sulfato de aluminio y la poliamina N-50, la dosis óptima promedio es menor al aumentar la cantidad de coadyuvante en la mezcla, siendo 440 mg/L para la mezcla 95:5 y 420 mg/L para la mezcla 90:10. Aplicando estas dosis se obtienen porcentajes de remoción de turbiedad mayores con las mezclas que contienen la poliamina N-50 que en las mezclas con almidón de yuca modificado pero los porcentajes de remoción de turbiedad son mayores al 89 % utilizando cualquiera de los dos coadyuvantes.

La razón por la que el valor de la dosis óptima promedio aumenta cuando se emplean las mezclas con sulfato de aluminio, en comparación con las dosis aplicadas de las mezclas con cloruro férrico, es porque el agua que se trató en esa ocasión fue tomada durante un período de canícula, por lo que el contenido de carga contaminante aumentó, además el sulfato de aluminio presenta una menor eficiencia como coagulante que el cloruro férrico o el clohidróxido de aluminio.

Al aumentar la cantidad de coadyuvante en las mezclas con sulfato de aluminio, se obtienen menores porcentajes de remoción de turbiedad empleando las mezclas con almidón de yuca modificado, mientras que utilizando las mezclas con la poliamina N-50 el comportamiento es inverso, ya que se presentan mayores porcentajes de remoción de turbiedad.

El análisis de varianza para el porcentaje de remoción de turbiedad aplicando las mezclas con sulfato de aluminio como coagulante, presentado en la tabla XXXII, para un valor de F calculado con un 95 % de confianza, muestra que no existe diferencia significativa entre la proporción de mezcla, pero sí existe diferencia significativa entre los coadyuvantes de coagulación, por lo que el porcentaje de remoción de turbiedad no se ve afectado por la proporción utilizada en las mezclas con sulfato de aluminio pero sí lo afecta el tipo de coadyuvante .

Se realizó una prueba de Tukey para confirmar que verdaderamente existía diferencia significativa entre los coadyuvantes de coagulación para la remoción de turbiedad y evitar caer en un error tipo I pero esta prueba indicó que los resultados obtenidos en el análisis de varianza son correctos.

En cuanto al porcentaje de remoción de color alcanzado aplicando las mezclas con sulfato de aluminio como coagulante, se obtiene una mayor remoción de color con las mezclas que contienen la poliamina N-50 que en las mezclas con almidón de yuca modificado pero los porcentajes de remoción de color no son mayores al 25 % utilizando cualquiera de los dos coadyuvantes. De acuerdo con estos resultados, se tiene un porcentaje alto de remoción de turbiedad y un bajo porcentaje de remoción de color, comprobando así que los coagulantes en tratamiento de aguas sirven para eliminar las partículas en suspensión y no las partículas disueltas, como es el caso del color en el agua.

Al aumentar la cantidad de coadyuvante en las mezclas con sulfato de aluminio, se obtienen los mismos porcentajes de remoción de color con las mezclas que contienen almidón de yuca modificado, mientras que con las mezclas que incluyen la poliamina N-50 se obtienen mayores porcentajes de remoción de color.

El análisis de varianza para el porcentaje de remoción de color aplicando las mezclas con sulfato de aluminio como coagulante, presentado en la tabla XXXV, para un valor de F calculado con un 95 % de confianza, muestra que no existe diferencia significativa entre los coadyuvantes de coagulación y la proporción de mezcla, por lo que el porcentaje de remoción de color no se ve afectado por el tipo de coadyuvante y la proporción utilizada en las mezclas con sulfato de aluminio.

De acuerdo con los resultados presentados en la tabla L, aplicando las mezclas realizadas con clorhidróxido de aluminio y la poliamina N-50, la dosis óptima promedio es menor al aumentar la cantidad de coadyuvante en la mezcla, siendo 85 mg/L para la mezcla 95:5 y 50 mg/L para la mezcla 90:10. Aplicando estas dosis se obtienen, aproximadamente, los mismos porcentajes

de remoción de turbiedad con las mezclas que contienen la poliamina N-50 y con las mezclas con almidón de yuca modificado, los porcentajes de remoción de turbiedad son mayores al 99 % utilizando cualquiera de los dos coadyuvantes, permitiendo una total remoción de la carga contaminante.

El análisis de varianza para el porcentaje de remoción de turbiedad aplicando las mezclas con clorhidróxido de aluminio como coagulante, presentado en la tabla XXXVII, para un valor de F calculado con un 95 % de confianza, muestra que no existe diferencia significativa entre los coadyuvantes de coagulación y la proporción de mezcla, por lo que el porcentaje de remoción de turbiedad no se ve afectado por el tipo de coadyuvante y la proporción utilizada en las mezclas con clorhidróxido de aluminio.

En cuanto al porcentaje de remoción de color alcanzado aplicando las mezclas con clorhidróxido de aluminio como coagulante, se obtienen aproximadamente los mismos porcentajes de remoción de color con las mezclas que contienen la poliamina N-50 y con las mezclas con almidón de yuca modificado, alcanzando valores de porcentajes de remoción de color mayores al 97 % utilizando cualquiera de los dos coadyuvantes.

Aumentar la cantidad de coadyuvante en las mezclas con clorhidróxido de aluminio permite obtener mayores porcentajes de remoción de color y turbiedad, tanto utilizando como coadyuvante almidón de yuca modificado como la poliamina N-50, llegando a alcanzar un 100 % de remoción de carga contaminante.

El análisis de varianza para el porcentaje de remoción de color aplicando las mezclas con clorhidróxido de aluminio como coagulante, presentado en la tabla XXXIX, para un valor de F calculado con un 95 % de confianza, muestra

que no existe diferencia significativa entre los coadyuvantes de coagulación y la proporción de mezcla, por lo que el porcentaje de remoción de color no se ve afectado por el tipo de coadyuvante y la proporción utilizada en las mezclas con clorhidróxido de aluminio.

Las proporciones de mezcla de coagulantes inorgánicos con almidón de yuca modificado, que permiten obtener mayores porcentajes de remoción de turbiedad y color son: la proporción 95:5 en las mezclas de almidón de yuca modificado con cloruro férrico y sulfato de aluminio y la proporción 90:10 en la mezcla de almidón de yuca modificado con clorhidróxido de aluminio.

En las mezclas de almidón de yuca modificado con clorhidróxido de aluminio parece haber mejor sinergia, ya que presenta el comportamiento esperado al utilizar un coadyuvante de coagulación, permitiendo alcanzar mayores porcentajes de remoción de turbiedad y color al incrementar la cantidad de coadyuvante. Con estas mezclas se alcanzaron los mayores porcentajes de remoción de carga contaminante, tanto de turbiedad como color en el agua, esto puede deberse a la gran capacidad coagulante del clorhidróxido de aluminio por ser una sal polimerizada y eso la hace mejor que cualquier sal común de hierro o de aluminio.

Del apéndice 4 al 6 se aprecian los resultados óptimos de clarificación con cada una de las mezclas de coagulantes inorgánicos y los coadyuvantes de coagulación estudiados, tomados de una corrida al azar.

En general, el almidón de yuca modificado con hidróxido de sodio al emplearse como coadyuvante de coagulación en mezclas con coagulantes inorgánicos para el tratamiento de aguas residuales, no presenta una remoción de turbiedad y color superior en comparación con la poliamina N-50. Para un

mismo consumo estos dos coadyuvantes estudiados tienen un funcionamiento similar y las diferencias que pudieran existir entre ellos, para la remoción de turbiedad y color en una muestra de agua residual representativa, no son significativas si se mezcla el almidón de yuca con un coagulante inorgánico altamente eficiente; además, el almidón de yuca modificado tiene una toxicidad nula comparado con la poliamina N-50.

CONCLUSIONES

1. Las mezclas de coagulantes inorgánicos con almidón de yuca modificado son estables porque no se presenta la formación de precipitados o varias fases en la misma mezcla, se aprecia una mínima cantidad de insolubles propia del almidón de yuca.
2. Las mezclas de cloruro férrico, sulfato de aluminio y clorhidróxido de aluminio con la poliamina N-50 tienen el siguiente comportamiento: al aumentar la proporción de poliamina en la mezcla, la dosis óptima promedio requerida es menor.
3. No existe diferencia significativa entre los coadyuvantes de coagulación y la proporción de mezcla para los porcentajes de remoción de turbiedad obtenidos con las mezclas de cloruro férrico y clorhidróxido de aluminio. Con las mezclas con sulfato de aluminio no existe diferencia significativa entre la proporción de mezcla pero sí existe diferencia significativa entre los coadyuvantes de coagulación, para los porcentajes de remoción de turbiedad.
4. No existe diferencia significativa entre los coadyuvantes de coagulación y la proporción de mezcla para los porcentajes de remoción de color obtenidos con las mezclas de sulfato de aluminio y clorhidróxido de aluminio. Con las mezclas con cloruro férrico no existe diferencia significativa entre la proporción de mezcla pero sí existe diferencia significativa entre los coadyuvantes de coagulación, para los porcentajes de remoción de color.

5. Las proporciones de mezcla de coagulantes inorgánicos con almidón de yuca modificado, que permiten obtener mayores porcentajes de remoción de turbiedad y color son: la proporción 95:5 en las mezclas de almidón de yuca modificado con cloruro férrico y sulfato de aluminio y la proporción 90:10 en la mezcla de almidón de yuca modificado con clorhidróxido de aluminio.
6. En las mezclas de almidón de yuca modificado con clorhidróxido de aluminio parece haber mejor sinergia, ya que con estas mezclas se alcanzaron los mayores porcentajes de remoción de turbiedad y color en comparación con las mezclas de almidón de yuca modificado con cloruro férrico y sulfato de aluminio.
7. Al aplicar la misma dosis, el almidón de yuca modificado y la poliamina N-50 como coadyuvantes de coagulación poseen un funcionamiento similar y las diferencias que pudieran existir entre ellos, para la remoción de turbiedad y color en una muestra de agua residual representativa, no son significativas si se mezcla el almidón de yuca con un coagulante inorgánico altamente eficiente.

RECOMENDACIONES

1. Modificar el almidón de yuca con diferentes concentraciones de hidróxido de sodio y realizar mezclas con coagulantes inorgánicos, para evaluar si la cantidad de hidróxido de sodio en el coadyuvante es una variable importante para aumentar su eficiencia y comparar los resultados con este estudio.
2. Evaluar otros métodos de modificación química o física para el almidón de yuca, para aumentar su eficiencia como coadyuvante de coagulación y permitir que alcance mejores resultados que la poliamina N-50.
3. Realizar una comparación económica entre el almidón de yuca modificado con hidróxido de sodio y la poliamina N-50 en mezclas con coagulantes inorgánicos y evaluar su rentabilidad.

BIBLIOGRAFÍA

1. AGUILAR, M. I. *Tratamiento físico-químico de aguas residuales, coagulación-floculación*. España: Universidad de Murcia, 2002. 137 p. ISBN: 84-8371-308-X.
2. AMERICAN WATER WORKS ASSOCIATION (Nueva York, EE. UU.). *Agua, su calidad y tratamiento*. Verrey, Jack (trad.). 2ª edición. México: UTEHA, 1968. 564 p.
3. ANDÍA CÁRDENAS, Yolanda. *Tratamiento de agua, coagulación y floculación*. Lima: SEDAPAL, 2000. 44 p.
4. BIBLIOTECA VIRTUAL DE DESARROLLO SOSTENIBLE Y SALUD AMBIENTAL. *Capítulo 4, el almidón como auxiliar*. [en línea]. <http://www.bvsde.paho.org/bvsacd/cd68/025022/cap4.pdf>. [Consulta: 7 de noviembre de 2014].
5. DEVORE, Jay. *Probabilidad y estadística para ingeniería y ciencias*. 7ª edición. México: Cengage Learning, 2008. 722 p.
6. FRETES, Francisco. *Mandioca una opción industrial*. Paraguay: USAID, 2010. 54 p.
7. GARCÍA, Axel. *Caracterización de 25 cultivares de yuca (Manihot spp.) colectados en Guatemala; en el Centro de Agricultura Tropical Bulbuxyá, CATBUL, San Miguel Panán, Suchitepéquez*. Trabajo

de graduación, Facultad de Agronomía, Universidad de San Carlos de Guatemala, 1991. 83 p.

8. GRIJALVA, Claudia Fabiola. *Análisis comparativo de un polímero coagulante catiónico vrs. sulfato de aluminio en la clarificación de agua en una planta de elaboración de bebidas carbonatadas*. Trabajo de graduación, Facultad de Ingeniería. Universidad de San Carlos de Guatemala, 2004. 69 p.
9. IBARRA, Marcio. “Producción, procesamiento, comercialización y utilización de la yuca en Guatemala”. En: SCOTT, G. J. (ed). *Desarrollo de productos de raíces y tubérculos*. Perú: CIP, 1992, Volumen II - América Latina. 375 p. ISBN: 92-9060-162-0.
10. INE. *Encuesta nacional agropecuaria 2013*. Guatemala: Gobierno de Guatemala, 2014. 50 p.
11. LEIVA, L. *Empleo del gel de almidón de productos regionales como coadyuvante en el tratamiento de aguas*. Información tecnológica, Vol 8, No. 2, 1997. 7 p.
12. MARTINEZ MORÁN, Eddy R. *El uso de la fécula de maíz en el proceso de coagulación del agua cuando se utiliza sulfato de aluminio*. Guatemala: Estudio especial, ERIS – USAC, 1987. 102 p.
13. MEJÍA, Juan Manuel. *Utilización de la semilla de la Moringa Oleifera como coagulante natural*. Guatemala: Estudio especial, ERIS – USAC, 1986. 65 p.

14. PEÑARANDA, Oscar. *Revisión de la modificación química del almidón con ácidos orgánicos*. Revista Ingeniería e investigación. Colombia: Universidad Nacional de Colombia, 2008, Volumen 28, No. 3. 6 p.
15. PÉREZ, Francisco; URREA, Mario. *Tema 6 Coagulación y floculación* [en línea]. Universidad Politécnica de Cartagena. http://ocw.bib.upct.es/pluginfile.php/6019/mod_resource/content/1/Tema_06_COAGULACION_Y_FLOCULACION.pdf. [Consulta: 15 de abril de 2015].
16. Revista AIDIS de ingeniería y ciencias ambientales: investigación, desarrollo y práctica. *Desarrollo y aplicación de un nuevo coadyuvante-coagulante orgánico en el proceso de coagulación-floculación del lixiviado de un relleno sanitario*. México: editorial Revista AIDIS, 2008, Volumen 1, Núm. 4. ISBN: 0718-378X.
17. RIVERA POMES, Carlos Humberto. *El uso de la harina de papa (Solanum Tuberosum) como alternativa de ayuda en el proceso de coagulación del agua cuando se usa sulfato de aluminio*. Guatemala: Estudio especial, ERIS – USAC, 1987. 30 p.
18. RODRÍGUEZ M., J. P. *Evaluación del proceso de la coagulación para el diseño de una planta potabilizadora*. Colombia: 2007. 10 p.
19. SIERRA RAMÍREZ, Carlos Alberto. *Calidad del agua, evaluación y diagnóstico*. López, Leonardo (ed.). 1ª edición. Colombia: Ediciones de la U, 2011. 457 p. ISBN: 978-958-8692-06-7.

20. SOLÍS, Rudy. *Mezclas con potencial coagulante para clarificar aguas superficiales*. México: 2012. 13 p.

APÉNDICES

Apéndice 1. Punto de muestreo del Río Villalobos



Fuente: elaboración propia.

Apéndice 2. Coadyuvantes de coagulación



2 = solución de almidón de yuca al 1 % modificado con hidróxido de sodio

3 = solución de almidón de yuca al 1 % (sin modificar)



Poliamina N-50 concentrada

Fuente: elaboración propia en Laboratorio de Representaciones Químicas, S. A.

Apéndice 3. **Mezclas de coagulantes utilizados para el proceso de clarificación**

	
Mezcla de cloruro férrico + poliamina N-50 95:5 preparada al 10 %	Mezcla de cloruro férrico + almidón de yuca modificado 95:5 preparada al 10 %
	
Mezcla de cloruro férrico + poliamina N-50 90:10 preparada al 10 %	Mezcla de cloruro férrico + almidón de yuca modificado 90:10 preparada al 10 %

Continuación del apéndice 3.

	
<p>Mezcla de sulfato de aluminio + poliamina N-50 95:5 preparada al 10 %</p>	<p>Mezcla de sulfato de aluminio + almidón de yuca modificado 95:5 preparada al 10 %</p>
	
<p>Mezcla de sulfato de aluminio + poliamina N-50 90:10 preparada al 10 %</p>	<p>Mezcla de sulfato de aluminio + almidón de yuca modificado 90:10 preparada al 10 %</p>

Continuación del apéndice 3.

	
Mezcla de clorhidróxido de aluminio + poliamina N-50 95:5 preparada al 10 %	Mezcla de clorhidróxido de aluminio + almidón de yuca modificado 95:5 preparada al 10 %
	
Mezcla de clorhidróxido de aluminio + poliamina N-50 90:10 preparada al 10 %	Mezcla de clorhidróxido de aluminio + almidón de yuca modificado 90:10 preparada al 10 %

Fuente: elaboración propia en Laboratorio de Representaciones Químicas, S. A.

Apéndice 4. **Resultados óptimos de pruebas de clarificación de las mezclas con cloruro férrico**

Agua cruda	
	
Turbiedad inicial	Color inicial
42,9 NTU	70 PCU

Agua tratada con 125 mg/L de cloruro férrico + N-50 95:5		Agua tratada con 125 mg/L de cloruro férrico + almidón de yuca modificado 95:5	
			
Turbiedad final	Color final	Turbiedad final	Color final
0,13 NTU	20 PCU	0,5 NTU	30 PCU
Agua tratada con 100 mg/L de cloruro férrico + N-50 90:10		Agua tratada con 100 mg/L de cloruro férrico + almidón de yuca modificado 90:10	

Continuación del apéndice 4.

			
Turbiedad final	Color final	Turbiedad final	Color final
0,20 NTU	10 PCU	3,04 NTU	30 PCU

Fuente: elaboración propia en Laboratorio de Representaciones Químicas, S. A.

Apéndice 5. Resultados óptimos de pruebas de clarificación de las mezclas con sulfato de aluminio

Agua cruda	
	
Turbiedad inicial	Color inicial
75 NTU	80 PCU

Continuación del apéndice 5.

<p>Agua tratada con 450 mg/L de sulfato de aluminio + N-50 95:5</p>		<p>Agua tratada con 450 mg/L de sulfato de aluminio + almidón de yuca modificado 95:5</p>	
			
Turbiedad final	Color final	Turbiedad final	Color final
1,98 NTU	50 PCU	5,42 NTU	70 PCU
<p>Agua tratada con 400 mg/L de sulfato de aluminio + N-50 90:10</p>		<p>Agua tratada con 400 mg/L de sulfato de aluminio + almidón de yuca modificado 90:10</p>	
			
Turbiedad final	Color final	Turbiedad final	Color final
1,51 NTU	60 PCU	11,8 NTU	70 PCU

Fuente: elaboración propia en Laboratorio de Representaciones Químicas, S. A.

Apéndice 6. **Resultados óptimos de pruebas de clarificación de las mezclas con clorhidróxido de aluminio**

Agua cruda	
	
Turbiedad inicial	Color inicial
23,3 NTU	20 PCU

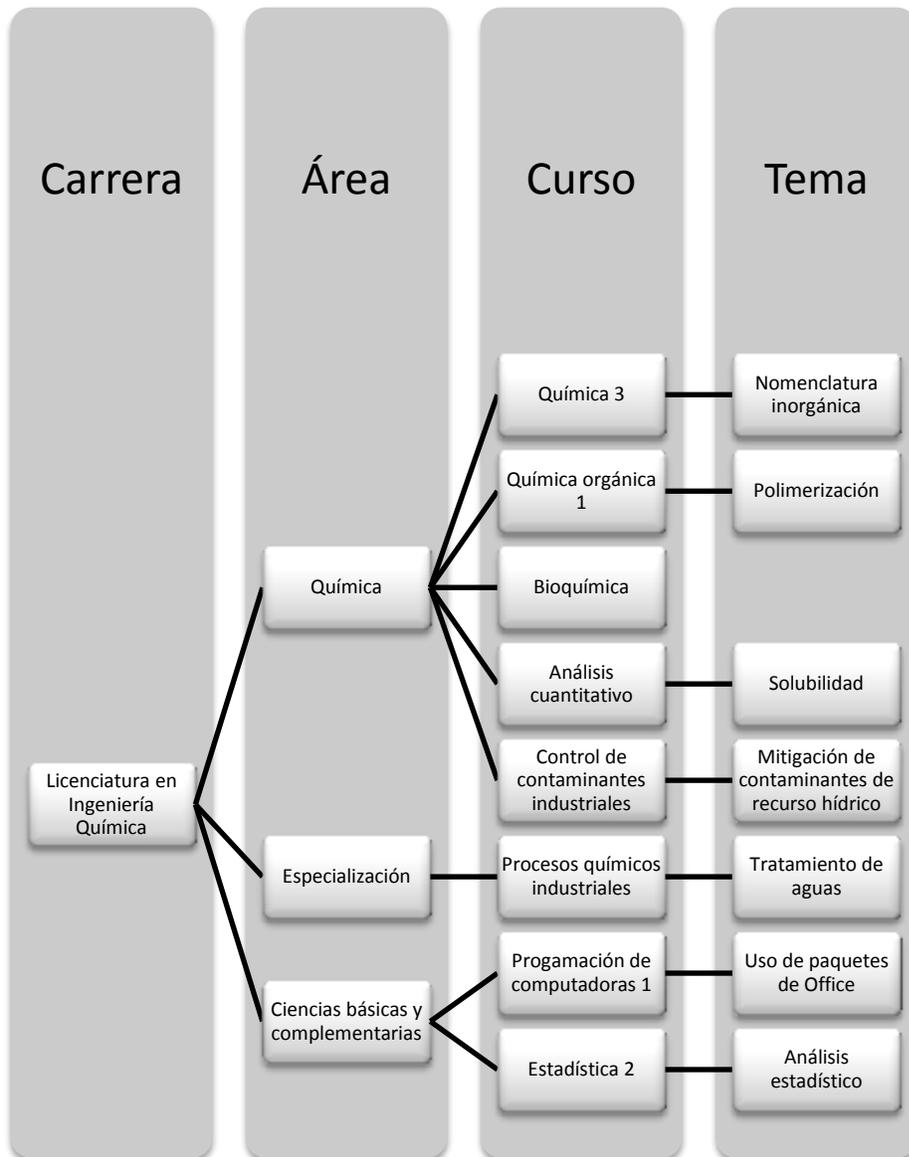
Agua tratada con 125 mg/L de clorhidróxido de aluminio + N-50 95:5		Agua tratada con 125 mg/L de clorhidróxido de aluminio + almidón de yuca modificado 95:5	
			
Turbiedad final	Color final	Turbiedad final	Color final
0 NTU	0 PCU	0 NTU	0 PCU
Agua tratada con 50 mg/L de clorhidróxido de aluminio + N-50 90:10		Agua tratada con 50 mg/L de clorhidróxido de aluminio + almidón de yuca modificado 90:10	

Continuación del apéndice 6.

			
Turbiedad final	Color final	Turbiedad final	Color final
0 NTU	0 PCU	0 NTU	0 PCU

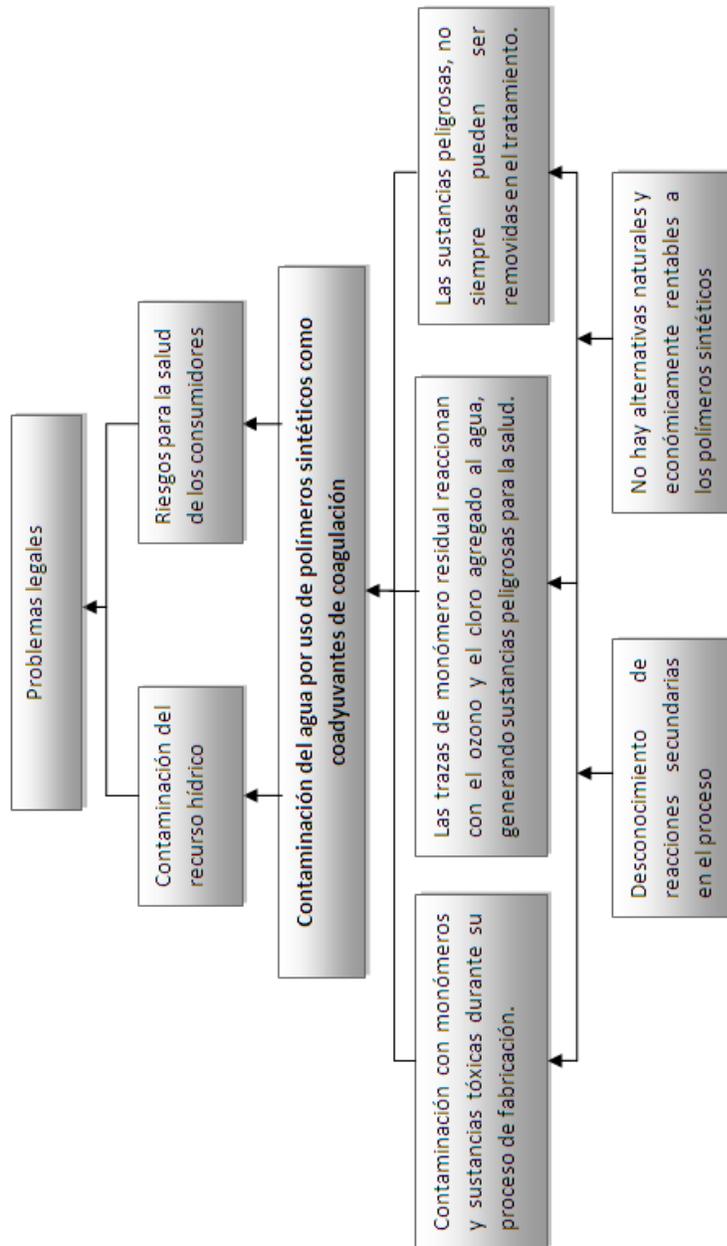
Fuente: elaboración propia en Laboratorio de Representaciones Químicas, S. A.

Apéndice 7. **Tabla de requisitos académicos**



Fuente: elaboración propia.

Apéndice 8. Árbol de problemas



Fuente: elaboración propia.