

EVALUACION DE LA FACTIBILIDAD DE TRATAMIENTO QUIMICO AL AGUA  
RESIDUAL PROVENIENTE DE LAS RALLANDERIAS DE YUCA EN LA  
POBLACIÓN DE MONDOMO (CAUCA)



JHEISON HERNAN LOPEZ PAZ  
JOSÉ ANUAR TROCHEZ CHECA

UNIVERSIDAD DEL CAUCA  
FACULTAD DE INGENIERIA CIVIL  
PROGRAMA DE INGENIERIA AMBIENTAL  
GRUPO DE INVESTIGACIÓN EN INGENIERÍA AMBIENTAL - GIIA  
POPAYAN  
2005

EVALUACION DE LA FACTIBILIDAD DE TRATAMIENTO QUIMICO AL AGUA  
RESIDUAL PROVENIENTE DE LAS RALLANDERIAS DE YUCA EN LA  
POBLACIÓN DE MONDOMO (CAUCA)

The seal of the Universidad del Cauca is a large, ornate emblem. It features a central shield with a torch, surrounded by a decorative border of leaves and scrolls. The Latin motto "POSTERIS LUMEN MORITVRIS EDAT" is inscribed around the shield. At the bottom, a banner contains the year "1927" and the text "UNIVERSIDAD DEL CAUCA".

JHEISON HERNAN LOPEZ PAZ  
JOSÉ ANUAR TROCHEZ CHECA

Tesis para optar al título de Ingeniero Ambiental

Director

Paulo Mauricio Espinosa Echeverri  
Ingeniero Químico, MSc.

Departamento de Ingeniería Ambiental y Sanitaria

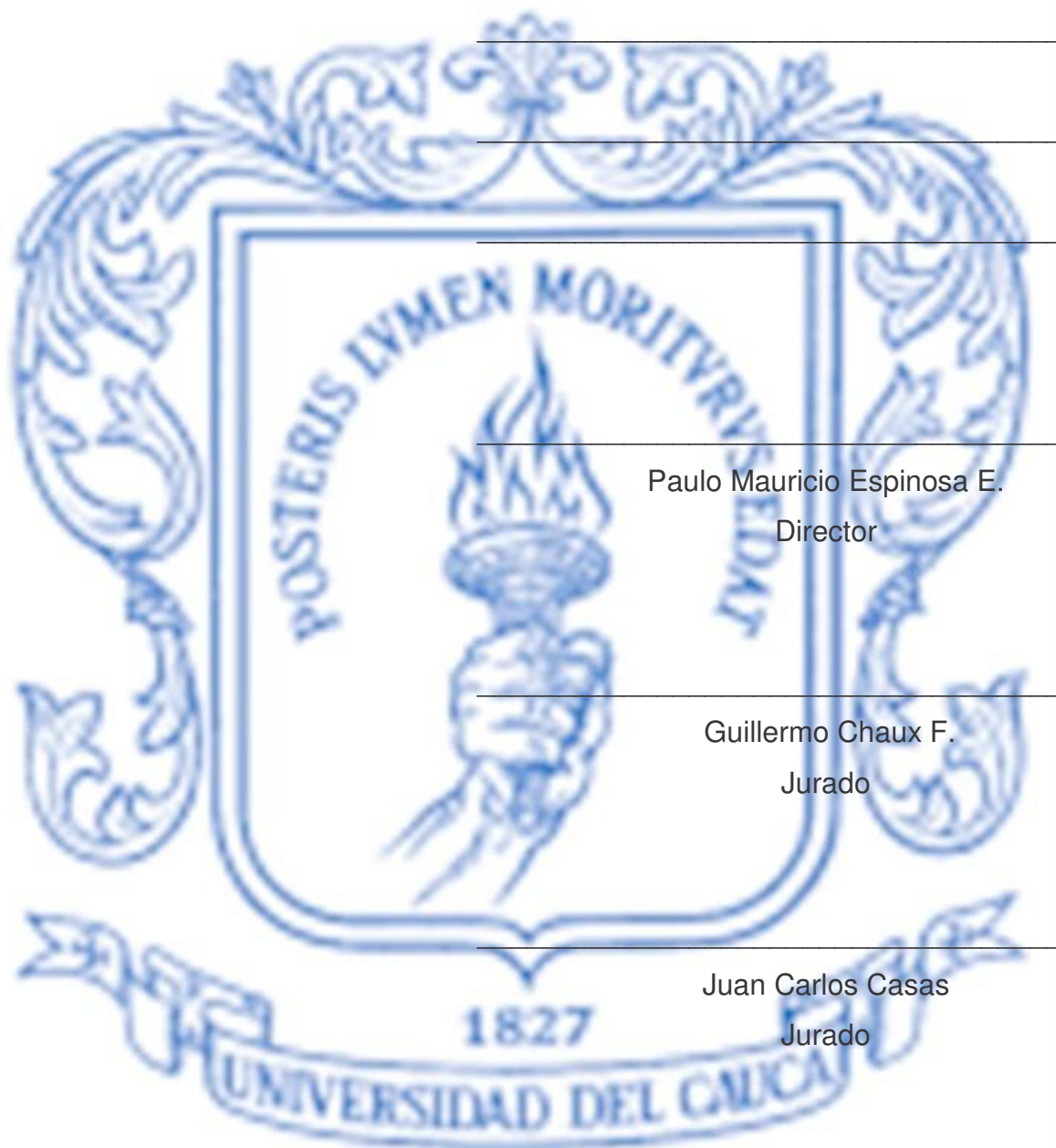
UNIVERSIDAD DEL CAUCA  
FACULTAD DE INGENIERIA CIVIL

PROGRAMA DE INGENIERIA AMBIENTAL

GRUPO DE INVESTIGACIÓN EN INGENIERÍA AMBIENTAL - GIIA

POPAYAN

2005



Popayán, Diciembre de 2.005



A nuestras familias y a todas las personas que de una u otra forma nos han apoyado en el transcurso de nuestras vidas.

## AGRADECIMIENTOS

La realización de este trabajo de investigación fue posible gracias al apoyo económico del Convenio Universidad del Cauca – Corporación Autónoma Regional del Cauca 602/2.004.

Los autores expresan sus más sinceros agradecimientos a:

Ingeniero Javier Fernández, docente departamento de Ingeniería Ambiental y Sanitaria, Universidad del Cauca.

Ingeniero Carlos Cesar Cabezas, docente departamento de Ingeniería Ambiental y Sanitaria, Universidad del Cauca.

Ingeniero Guillermo Chaux, docente departamento de Ingeniería Ambiental y Sanitaria, Universidad del Cauca.

Ingeniero Mauricio Aguirre, división del recurso Agua, Corporación Autónoma Regional del Cauca, CRC.

Señor Uver Vergara, propietario rallería Santa Bárbara, Mondomo (Cauca), por facilitarnos las instalaciones de su empresa y prestarnos la ayuda necesaria para realizar el trabajo de campo

Productos derivados de la sal (PRODESAL), por vincularse con la investigación facilitando los productos químicos objeto de este estudio

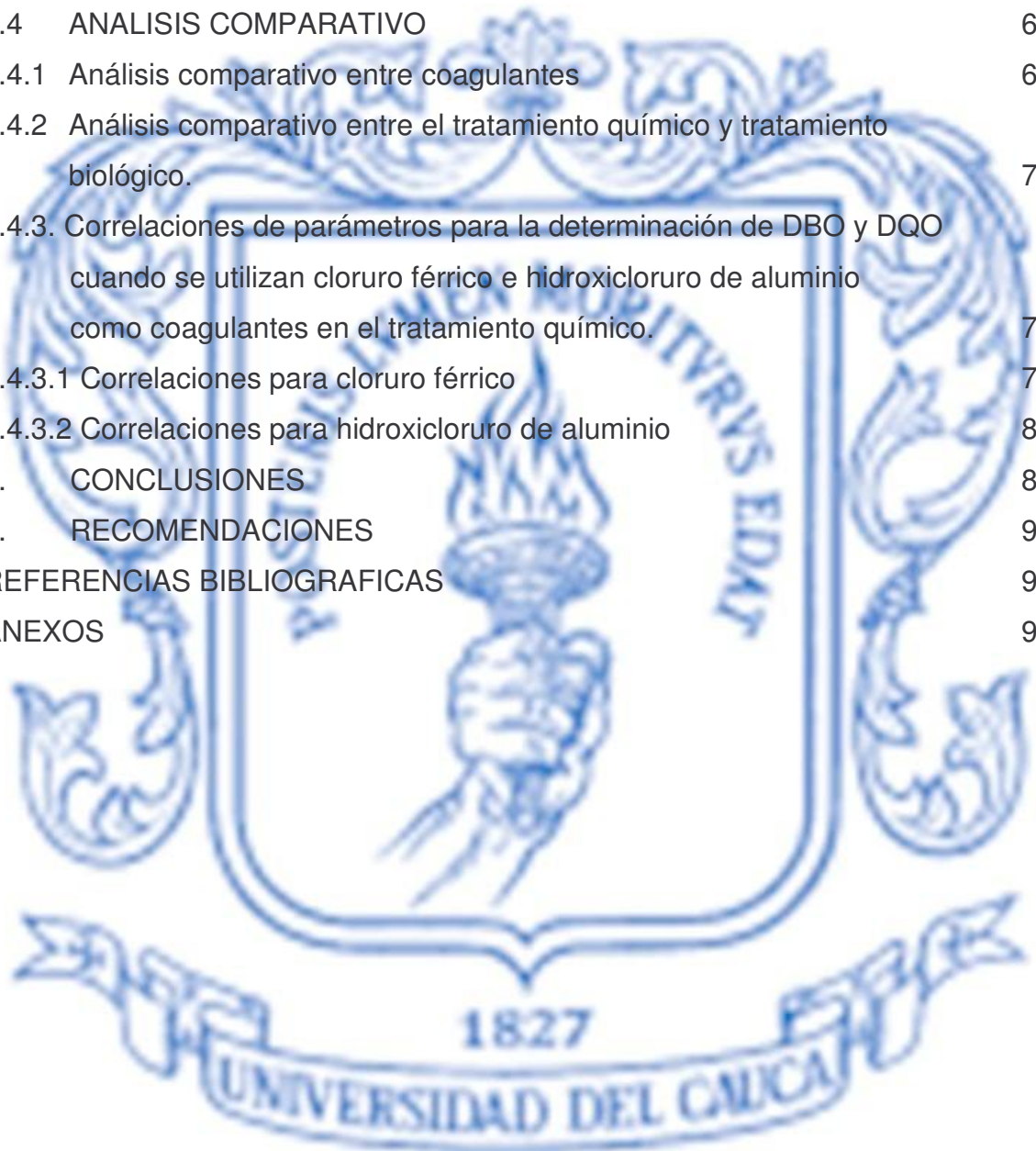
Al director de investigación, Paulo Mauricio Espinosa E., por su constante apoyo y sus valiosas orientaciones.

## CONTENIDO

	Pág.
LISTA DE TABLAS	ix
LISTA DE FIGURAS	xii
LISTA DE ANEXOS	xv
LISTA DE FOTOGRAFÍAS (Disponible en medio magnético)	xvi
1. RESUMEN	1
2. INTRODUCCIÓN	3
3. DESCRIPCIÓN DEL PROYECTO	5
3.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN, SU JUSTIFICACIÓN Y MARCO TEORICO	5
3.1.1 Planteamiento del problema de investigación	5
3.1.2 Justificación	6
3.1.3 Marco teórico	7
4. OBJETIVOS	13
4.1 OBJETIVO GENERAL	13
4.2 OBJETIVOS ESPECIFICOS	13
5. METODOLOGIA	15
5.1 RECOLECCIÓN DE MUESTRAS	15
5.2 ETAPA 1. DETERMINACIÓN DE PARÁMETROS DE COAGULACIÓN QUÍMICA	16
5.3 ETAPA 2. EVALUACIÓN DEL TRATAMIENTO CON CLORURO FÉRRICO	17
5.4 ETAPA 3. EVALUACIÓN DEL TRATAMIENTO CON POLICLORURO DE ALUMINIO, PAC	18
5.5 ETAPA 4. ANÁLISIS COMPARATIVO Y PROCESAMIENTO DE DATOS OBTENIDOS	19
6. DESARROLLO DE LOS OBJETIVOS PROPUESTOS	22

	Pág.
6.1 ETAPA 1. DETERMINACIÓN DE LOS PARÁMETROS DE COAGULACIÓN	22
6.1.1 Determinación de parámetros de tratabilidad utilizando cloruro férrico como coagulante.	22
6.1.2 Determinación de parámetros de tratabilidad utilizando Hidroxicloruro de aluminio (PAC) como coagulante.	25
6.2 ETAPA 2. EVALUACIÓN DEL TRATAMIENTO CON CLORURO FÉRRICO	29
6.3 ETAPA 3. EVALUACIÓN DEL TRATAMIENTO CON HIDROXICLORURO DE ALUMINIO (PAC)	34
7. ANÁLISIS DE RESULTADOS	38
7.1 ESTUDIO DE TRATABILIDAD UTILIZANDO CLORURO FERRICO COMO COAGULANTE.	39
7.1.1 Etapa 1. Parámetros de tratabilidad	39
7.1.1.1 Determinación de dosis óptima	39
7.1.1.2 Determinación del gradiente y tiempo de mezcla lenta	40
7.1.1.3 Determinación del tiempo de sedimentación	42
7.1.2 Etapa2. Tratamiento con cloruro férrico	45
7.1.3 Análisis de costos	49
7.2 ESTUDIO DE TRATABILIDAD UTILIZANDO HIDROXICLORURO DE ALUMINIO COMO COAGULANTE.	50
7.2.1 Etapa 1. Parámetros de tratabilidad	50
7.2.1.1 Determinación de dosis óptima	50
7.2.1.2 Determinación del gradiente y tiempo de mezcla lenta	51
7.2.1.3 Determinación del tiempo de sedimentación	53
7.2.2 Etapa 3. Tratamiento con Hidroxicloruro de aluminio	56
7.2.3 Análisis de costos	59

	Pág.	
7.3	DIAGRAMAS DE COAGULACIÓN	60
7.4	ANÁLISIS COMPARATIVO	66
7.4.1	Análisis comparativo entre coagulantes	66
7.4.2	Análisis comparativo entre el tratamiento químico y tratamiento biológico.	71
7.4.3.	Correlaciones de parámetros para la determinación de DBO y DQO cuando se utilizan cloruro férrico e hidroxiclورو de aluminio como coagulantes en el tratamiento químico.	73
7.4.3.1	Correlaciones para cloruro férrico	73
7.4.3.2	Correlaciones para hidroxiclورو de aluminio	80
8.	CONCLUSIONES	86
9.	RECOMENDACIONES	92
	REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS	95
	ANEXOS	98





## LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla 6.1. Parámetros iniciales de la muestra, 19 y 20 de abril	23
Tabla 6.2. Parámetros iniciales de la muestra, 25 y 26 de abril	26
Tabla 6.3. Parámetros de tratabilidad del cloruro férrico	29
Tabla 6.4. Parámetros iniciales de la muestra, 28 de abril, 19 de mayo y 1 de junio.	30
Tabla 6.5. Parámetros iniciales de la muestra, 2 y 17 de mayo	34
Tabla 6.6. Parámetros de tratabilidad óptimos cuando se utiliza Hidroxicloruro de aluminio como coagulante	35
Tabla 7.1. Valores promedio de días y horas laboradas al mes en la rallandería Santa Bárbara	49
Tabla 7.2. Consolidado $\text{FeCl}_3$ y PAC	66
Tabla 7.3. Descripción general del filtro anaerobio – Santa Bárbara	71
Tabla 8.1. Parámetros de tratabilidad $\text{FeCl}_3$	86
Tabla 8.2. Parámetros de tratabilidad PAC	86
Tabla 9.1. Parámetros de tratabilidad $\text{FeCl}_3$	93
Tabla 9.2. Parámetros de tratabilidad PAC	94
Tabla B1. Ficha técnica del Hidroxicloruro de Aluminio	100
Tabla B2. Ficha técnica del cloruro férrico	100
Tabla B3. Ficha técnica de equipos	101
Tabla D1. Aforo de caudal rallandería Santa Bárbara	103
Tabla E1. Resultados de la determinación de dosis óptima de Cloruro Férrico	104
Tabla E2. Resultados determinación de gradientes y tiempo de mezcla lenta – $\text{FeCl}_3$	105
Tabla E3. Porcentaje de remoción de turbiedad y color según gradientes y tiempo de mezcla lenta – $\text{FeCl}_3$	105

	Pág.
Tabla E4. Determinación de tiempo de sedimentación – FeCl <sub>3</sub>	106
Tabla E5. Determinación de la velocidad de sedimentación crítica	107
Tabla E6. Comportamiento del FeCl <sub>3</sub> teniendo en cuenta las variables pH y dosis de coagulante (rango amplio de pH) – FeCl <sub>3</sub>	107
Tabla E6.1 Eficiencia de Remoción de DQO para FeCl <sub>3</sub> .	109
Tabla E7. Comportamiento del FeCl <sub>3</sub> teniendo en cuenta las variables pH y dosis de coagulante (estrechando el rango de pH).	109
Tabla E7.1. Eficiencia de Remoción DBO y DQO utilizando FeCl <sub>3</sub> (Estrechando rango de pH)	111
Tabla E8. Determinación de eficiencias de remoción de DQO y DBO utilizando FeCl <sub>3</sub> como coagulante, por medio de correlaciones (rango estrecho de pH).	111
Tabla F1. Resultados de la determinación de dosis óptima de hidroxiclورو de aluminio.	113
Tabla F2. Resultados determinación de gradientes y tiempo de mezcla lenta - PAC	114
Tabla F3. Porcentajes de remoción de color y turbiedad obtenidos en la determinación de gradientes y tiempo de mezcla lenta – PAC	114
Tabla F4. Determinación de tiempo de sedimentación utilizando PAC.	115
Tabla F5. Determinación velocidad de sedimentación crítica.	116
Tabla F6. Comportamiento del PAC teniendo en cuenta las variables pH y Dosis.	116
Tabla F6.1. Eficiencia de remoción de DQO utilizando PAC.	118
Tabla F7. Comportamiento del PAC teniendo en cuenta las variables pH y dosis de coagulante (estrechando el rango de pH).	119

Tabla F7.1. Eficiencia de Remoción DBO y DQO utilizando PAC (Estrechando rango de pH)	120
Tabla F8. Determinación de eficiencias de remoción de DQO y DBO utilizando PAC como coagulante, por medio de correlaciones (rango estrecho de pH).	121
Tabla G1. Objetivo de las pruebas de jarras.	123
Tabla H1. Eficiencias de remoción del filtro anaerobio rallandería Santa Bárbara	125
Tabla I1. Comportamiento del almidón en presencia del ión cloruro	126

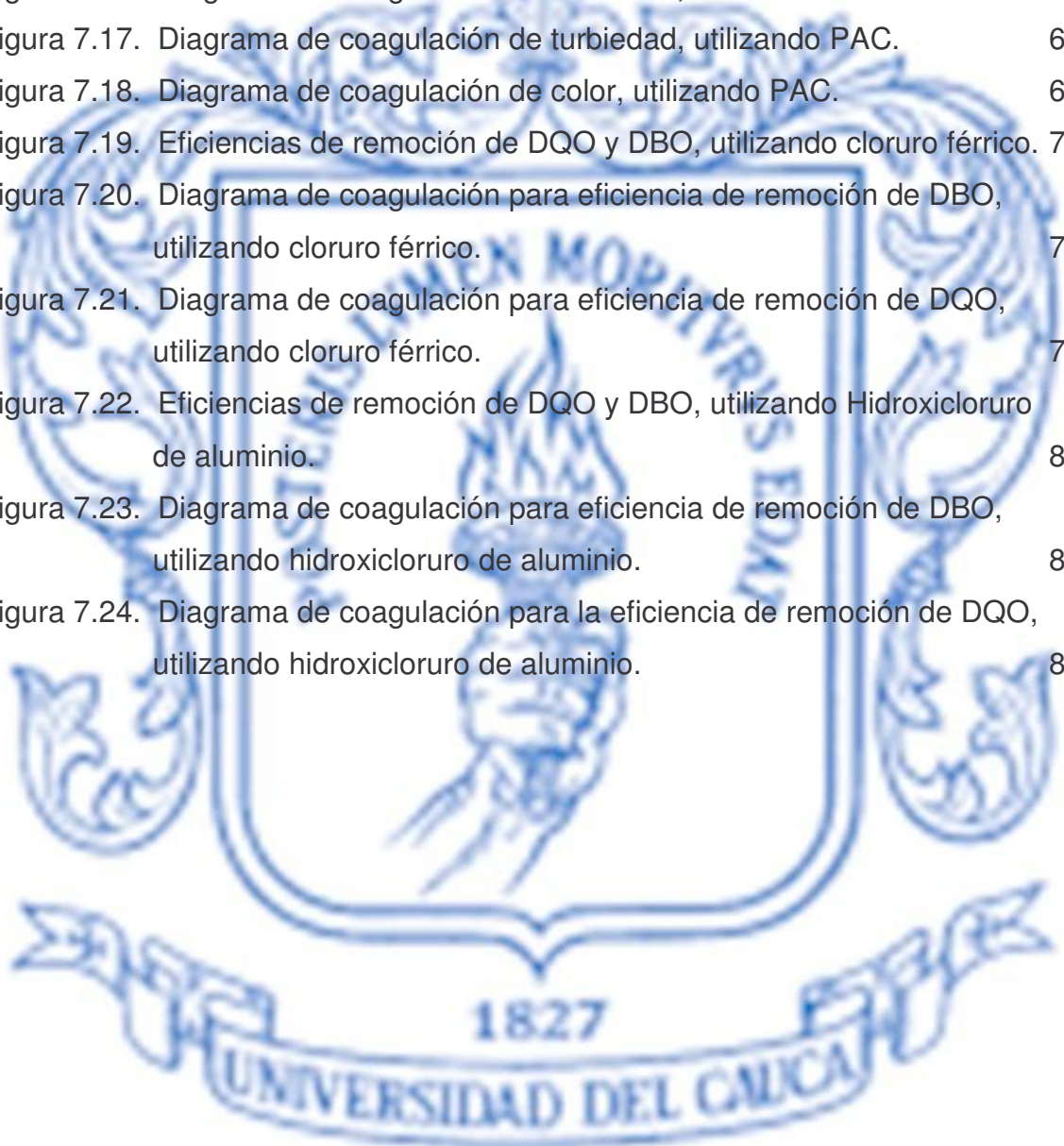


## LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 3.1. Diagrama de flujo del proceso de extracción de almidón agrio de yuca de la rallandería Santa Bárbara	11
Figura 6.1. Determinación de dosis óptima de cloruro férrico	23
Figura 6.2. Determinación de gradiente y tiempo de floculación óptimos para el cloruro férrico	24
Figura 6.3. Determinación del tiempo de sedimentación para el cloruro férrico	25
Figura 6.4. Determinación de dosis óptima de hidroxiclорuro de aluminio	26
Figura 6.5. Determinación de gradiente y tiempo de floculación para el hidroxiclорuro de aluminio	27
Figura 6.6. Determinación del tiempo de sedimentación para el hidroxiclорuro de aluminio	28
Figura 6.7. Comportamiento del cloruro férrico teniendo en cuenta las variables pH y dosis de coagulante, trabajando con un rango amplio de pH	32
Figura 6.8. Comportamiento del cloruro férrico teniendo en cuenta las variables pH y dosis de coagulante, estrechando el rango de pH	33
Figura 6.9. Comportamiento del PAC teniendo en cuenta las variables pH y dosis de coagulante, trabajando con un rango amplio de pH	36
Figura 6.10. Comportamiento del hidroxiclорuro de aluminio teniendo en cuenta las variables pH y dosis de coagulante, estrechando el rango de pH.	37
Figura 7.1. Eficiencias de remoción de color y turbiedad, obtenidas en la determinación de la dosis óptima de Cloruro Férrico.	39
Figura 7.2. Eficiencias de remoción de color y turbiedad, obtenidas en la determinación de gradiente y tiempo de floculación óptimos para el cloruro férrico.	41

Figura 7.3. Eficiencias de remoción de color y turbiedad, obtenidas en la determinación del tiempo de sedimentación para el cloruro férrico	42
Figura 7.4. Velocidad de sedimentación versus fracción remanente de turbiedad.	43
Figura 7.5. Remoción de turbiedad versus velocidad de sedimentación.	44
Figura 7.6. Eficiencias de remoción del cloruro férrico, teniendo en cuenta las variables pH y dosis de coagulante, trabajando con un rango amplio de pH.	46
Figura 7.7. Eficiencias de remoción del Cloruro Férrico, teniendo en cuenta las variables pH y dosis de coagulante, estrechando el rango de pH	48
Figura 7.8. Eficiencias de remoción de color y turbiedad, obtenidas en la determinación de dosis óptima de hidroxiclورو de aluminio.	50
Figura 7.9. Eficiencias de remoción de color y turbiedad, obtenidas en la determinación de gradiente y tiempo de floculación para el hidroxiclورو de aluminio.	52
Figura 7.10. Eficiencias de remoción de color y turbiedad, obtenidas en la determinación del tiempo de sedimentación para el Hidroxiclورو de aluminio.	53
Figura 7.11. Velocidad de sedimentación versus fracción remanente de turbiedad.	54
Figura 7.12. Remoción de turbiedad versus velocidad de sedimentación.	55
Figura 7.13. Eficiencias de remoción del hidroxiclورو de aluminio, teniendo en cuenta las variables pH y dosis de coagulante, trabajando con un rango amplio de pH inicial.	57
Figura 7.14. Eficiencias de remoción del hidroxiclورو de aluminio, teniendo en cuenta las variables pH y dosis de coagulante, estrechando el rango de pH inicial.	58

Figura 7.15. Diagrama de coagulación de color, utilizando cloruro férrico.	61
Figura 7.16. Diagrama de coagulación de turbiedad, utilizando cloruro férrico.	62
Figura 7.17. Diagrama de coagulación de turbiedad, utilizando PAC.	64
Figura 7.18. Diagrama de coagulación de color, utilizando PAC.	65
Figura 7.19. Eficiencias de remoción de DQO y DBO, utilizando cloruro férrico.	76
Figura 7.20. Diagrama de coagulación para eficiencia de remoción de DBO, utilizando cloruro férrico.	78
Figura 7.21. Diagrama de coagulación para eficiencia de remoción de DQO, utilizando cloruro férrico.	79
Figura 7.22. Eficiencias de remoción de DQO y DBO, utilizando Hidroxicloruro de aluminio.	82
Figura 7.23. Diagrama de coagulación para eficiencia de remoción de DBO, utilizando hidroxiclорuro de aluminio.	84
Figura 7.24. Diagrama de coagulación para la eficiencia de remoción de DQO, utilizando hidroxiclорuro de aluminio.	85



## LISTA DE ANEXOS

	Pág.
ANEXO A. ESQUEMA DEL PROCESO DE EXTRACCIÓN DE ALMIDÓN AGRIO DE YUCA RALLANDERÍA SANTA BÁRBARA	99
ANEXO B. FICHAS TECNICAS DE REACTIVOS Y EQUIPOS UTILIZADOS	100
ANEXO C. MODELO DE TABLA DE RECOLECCIÓN DE DATOS DE LABORATORIO	102
ANEXO D. DETERMINACION DE CAUDAL	103
ANEXO E. ESTUDIOS REALIZADOS UTILIZANDO CLORURO FERRICO COMO COAGULANTE	104
ANEXO F. ESTUDIOS REALIZADOS UTILIZANDO HIDROXICLORURO DE ALUMINIO (PAC) COMO COAGULANTE.	113
ANEXO G. OBJETIVO DE LAS PRUEBAS DE JARRAS	123
ANEXO H. EFICIENCIAS OBTENIDAS EN EL ESTUDIO DEL FILTRO ANAEROBIO (RALLANDERÍA SANTA BÁRBARA)	125
ANEXO I. PRUEBA DE LABORATORIO COMPORTAMIENTO DEL ALMIDÓN EN PRESENCIA DEL IÓN CLORURO.	126
ANEXO J. FOTOGRAFÍAS	127



## LISTA DE FOTOGRAFÍAS

	Pág.
Fotografía J.1. Almacenamiento de la raíz	127
Fotografía J.2. Descascarillado de la raíz	127
Fotografía J.3. Tamizado del almidón.	128
Fotografía J.4. Canales de sedimentación.	128
Fotografía J.5. Tanques de fermentación.	129
Fotografía J.6. Secado del almidón.	129
Fotografía J.7. Canal de sedimentación de mancha.	130
Fotografía J.8. Muestreo a la salida del canal de sedimentación de mancha.	130
Fotografía J.9. Almacenamiento de afrecho.	131
Fotografía J.10. Secado del afrecho.	131
Fotografía J.11. Montaje prueba de jarras.	132
Fotografía J.12. Prueba de DBO.	132
Fotografía J.13. Equipo floculador.	133





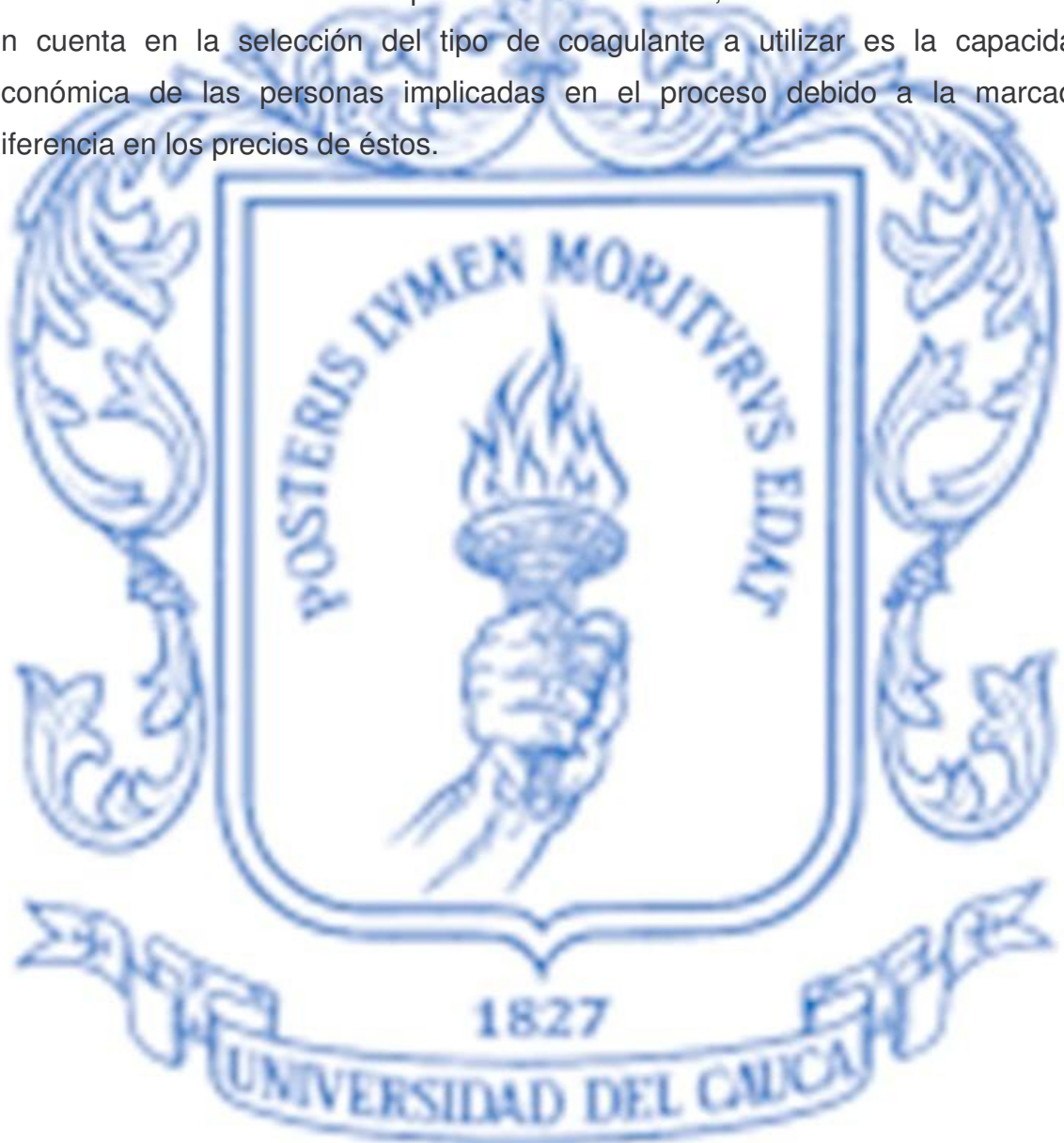
## 1. RESUMEN

La presente investigación se realizó con el fin de evaluar la factibilidad de la utilización del proceso de coagulación química para la remoción de la materia orgánica presente en el agua residual producida en el proceso de obtención del almidón agrio de yuca en la rallandería Santa Bárbara ubicada en el corregimiento de Mondomo (Cauca).

Para este propósito, se diseñó una metodología que permitió determinar los parámetros más relevantes en lo concerniente al proceso de coagulación química cuando se utilizan como coagulantes cloruro férrico e hidroxiclورو de aluminio. Una primera etapa consistió en determinar los parámetros de tratabilidad, tales como, dosis óptima, gradiente y tiempo de mezcla lenta, y tiempo de sedimentación. En las etapas posteriores, se estudió el comportamiento de los coagulantes utilizados cuando se varían los parámetros de pH y dosis. En una etapa final, se hace un análisis comparativo entre los resultados obtenidos utilizando los coagulantes objeto de estudio, además, de los resultados obtenidos en un proceso de tratamiento biológico (filtro anaerobio) ya implementado.

De acuerdo con los resultados obtenidos, el hidroxiclورو de aluminio presenta mayores eficiencias de remoción en turbiedad (97%), color (99%), DBO (69%) y DQO (53%), en comparación con las remociones obtenidas con el cloruro férrico que son de 87.11% en turbiedad, 89.53% en color, 36.36% en DBO y 29.62% en DQO. En lo concerniente a la comparación con el filtro anaerobio, el cloruro férrico presentó eficiencias de remoción similares a las obtenidas con el filtro en lo que se refiere a los parámetros anteriormente mencionados; a diferencia de los resultados obtenidos con el hidroxiclورو de aluminio, el cual presenta mejores eficiencias de remoción que el filtro anaerobio.

En conclusión, el presente estudio demostró la factibilidad de implementar a escala piloto el tratamiento por coagulación química de las aguas residuales generadas en el proceso de producción del almidón agrio de yuca en las rallanderías ubicadas en el departamento del Cauca; un factor adicional a tener en cuenta en la selección del tipo de coagulante a utilizar es la capacidad económica de las personas implicadas en el proceso debido a la marcada diferencia en los precios de éstos.



## 2. INTRODUCCIÓN

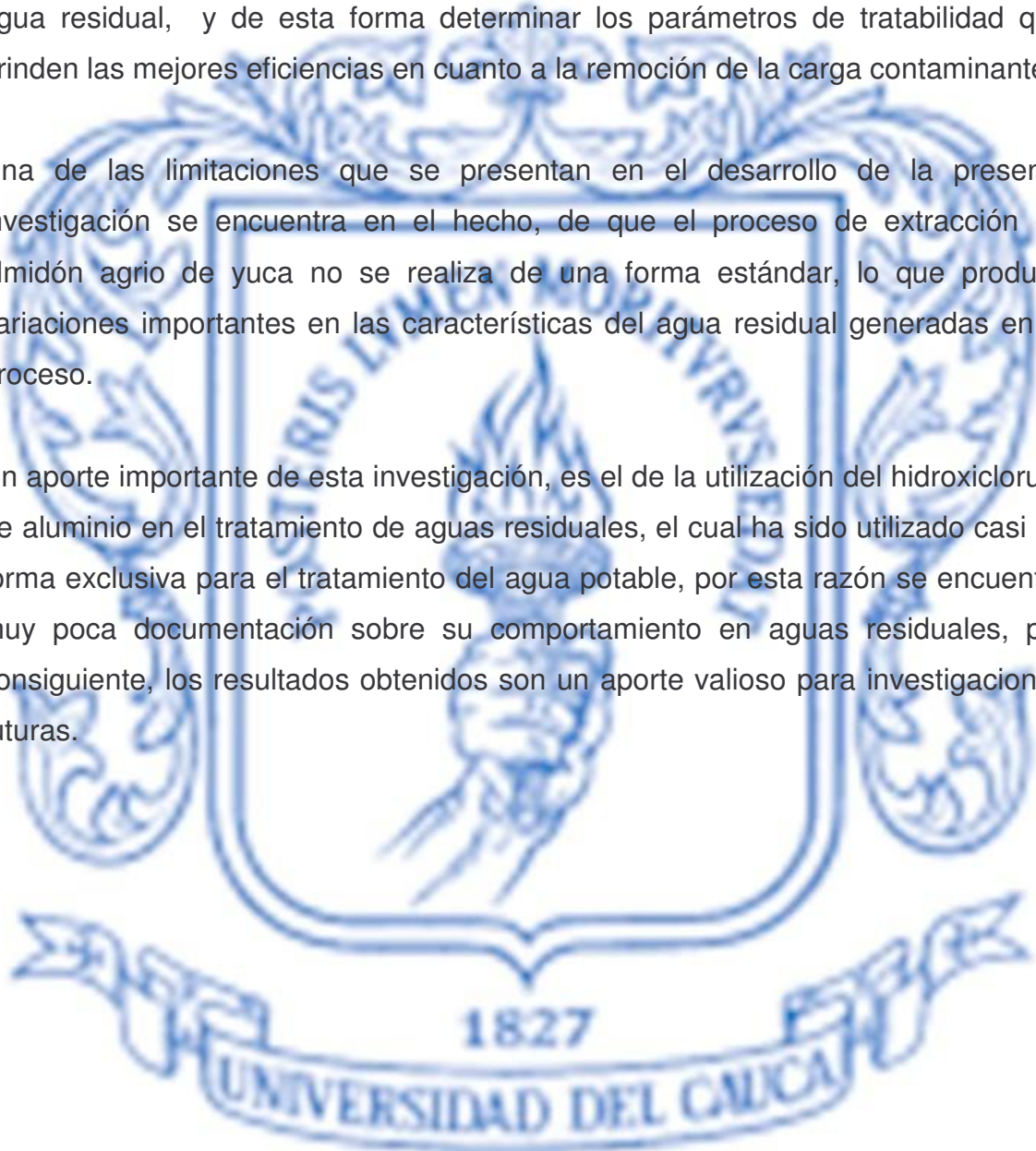
El proceso de extracción de almidón agro en el departamento del Cauca representa el 80 % de la producción nacional (Zakhia, 1996 citado por Gottret), siendo la zona norte del departamento (Mondomo y sus alrededores) la región donde se encuentran concentradas la mayoría de las rallanderías de yuca. Las rallanderías utilizan, en el proceso de extracción del almidón agro, cantidades apreciables de agua, del orden de 20 m<sup>3</sup>/Ton de yuca procesada (Rojas 1999, citado por Torres, et al), lo cual genera volúmenes considerables de agua residual al final de este proceso, las cuales presentan una elevada carga contaminante tanto de materia orgánica como de compuestos cianogénicos, éstas se vierten en los afluentes del río Mondomo, en la mayoría de los casos sin un tratamiento previo, deteriorando significativamente la calidad del agua y perjudicando a las poblaciones ubicadas aguas abajo de los sitios de descarga.

Según las características de las aguas residuales, la topografía y el nivel socioeconómico de la región, es necesario estudiar un sistema de tratamiento para las aguas residuales que sea viable en cuanto a su implementación, operación y mantenimiento, y que a la vez sea eficiente en la remoción de la carga contaminante; además, teniendo en cuenta que en el pasado se han implementado la tecnologías de tratamiento como filtros anaerobios, que no han brindado los resultados esperados y que por el contrario han aumentado la carga contaminante de las aguas residuales vertidas a los afluentes del río Mondomo, por tal razón, se hace necesario la evaluación de alternativas de tratamiento tales como la coagulación química, para determinar si los resultados que ofrece esta tecnología son los óptimos según las necesidades de la población implicada.

El estudio consistió en evaluar la aplicación de dos coagulantes en el proceso de coagulación química, el cloruro férrico y el hidroxiclорuro de aluminio. En esta evaluación es necesario tener en cuenta las características físico químicas del agua residual, y de esta forma determinar los parámetros de tratabilidad que brinden las mejores eficiencias en cuanto a la remoción de la carga contaminante.

Una de las limitaciones que se presentan en el desarrollo de la presente investigación se encuentra en el hecho, de que el proceso de extracción de almidón agrio de yuca no se realiza de una forma estándar, lo que produce variaciones importantes en las características del agua residual generadas en el proceso.

Un aporte importante de esta investigación, es el de la utilización del hidroxiclорuro de aluminio en el tratamiento de aguas residuales, el cual ha sido utilizado casi en forma exclusiva para el tratamiento del agua potable, por esta razón se encuentra muy poca documentación sobre su comportamiento en aguas residuales, por consiguiente, los resultados obtenidos son un aporte valioso para investigaciones futuras.



### 3. DESCRIPCIÓN DEL PROYECTO

#### 3.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN, SU JUSTIFICACIÓN Y MARCO TEORICO

##### 3.1.1 Planteamiento del problema de investigación

En este proyecto de investigación se realizó la evaluación comparativa de cual coagulante permite obtener una mayor eficiencia en la remoción de la materia orgánica vertida a los afluentes del río Mondomo, expresada como remoción de turbiedad, color, Demanda Bioquímica de Oxígeno ( $DBO_5$ ) y Demanda Química de Oxígeno (DQO), de esta manera determinar si es factible utilizar el proceso de coagulación química para la disminución de la contaminación generada por las rallanderías sobre esté río y sus afluentes. Para lograr este objetivo se estudió el comportamiento de dos coagulantes de tipo químico en las aguas residuales provenientes de las rallanderías.

La realización de este estudio representa un gran aporte, ya que permite conocer si la implementación a escala piloto del proceso de coagulación química para la disminución de la contaminación generada por las aguas residuales provenientes de las rallanderías es factible, además este estudio permitió determinar cuales son los parámetros de tratabilidad del proceso de coagulación química, tales como gradiente y tiempo de mezcla lenta, tiempo de sedimentación, dosis y coagulante a utilizar, que permiten obtener una mayor eficiencia en la remoción de contaminantes.

Al disminuir la contaminación del río Mondomo y sus afluentes, causada por las aguas residuales de las rallanderías vertidas en estos, se logrará mejorar la calidad de sus aguas y por lo tanto mejorar la calidad de vida de las personas que

de forma directa o indirecta obtienen beneficios de la utilización de dichas aguas, además de mejorar la calidad ambiental de la cuenca y así generar procesos de recuperación natural de la flora y fauna propias de estas fuentes de agua.

### 3.1.2 Justificación

La producción de almidón agrio en Colombia se centra principalmente en el departamento del Cauca, el cual representa aproximadamente el 80 % de la producción nacional, siendo en la zona norte del departamento (Mondomo y sus alrededores) donde se encuentran ubicadas la mayoría de las rallanderías de yuca (Zakhia, 1996 citado por Gottret). En el Cauca se encuentran aproximadamente 210 rallanderías, que producen en promedio 273 toneladas de almidón semanales, de las cuales 7 (3.4%) cuentan con un sistema de tratamiento de sus aguas residuales (Gottret, 1997); esto implica que se producen grandes cantidades de aguas residuales que son vertidos en las diferentes redes hídricas del departamento sin ningún tipo de tratamiento.

El proceso de obtención de almidón en las rallanderías, se basa en la dilución del almidón en el agua, el cual se extrae por sedimentación primaria. La cantidad de agua utilizada en el proceso de extracción es variable y del orden de 20 m<sup>3</sup>/ton de yuca procesada y se generan residuos con una DQO del orden 2500 – 5500 mg/L, representando una carga contaminante de 15.5 ton/día de DQO y 3.5 ton/día de DBO (Rojas 1999, citado por Torres, et al).

Para la depuración de aguas residuales existen dos líneas fundamentales: la fisicoquímica y la biológica. Debido a las características de estas aguas se pueden implementar varios tipos de tratamiento biológico como filtros anaerobios, lagunas de oxidación, entre otros, y tratamiento químico (coagulación) ya que dichos procesos remueven grandes cantidades de materia orgánica, sólidos

suspendidos, DBO y DQO. Para la implementación de los tratamientos biológicos es necesario contar con grandes extensiones de terreno e inversiones iniciales elevadas en comparación con el tratamiento químico el cual requiere de una inversión inicial menor, es de puesta en marcha rápida, permite ajustes de capacidad y operación intermitente (Rigola, 1999), por estas razones se considera la implementación del tratamiento químico en el tratamiento de las aguas residuales, ya que la topografía de la región no permite la consecución de grandes áreas y los costos de inversión inicial son menores, además, con el tratamiento químico se logra remover un 55% de la DBO, un 80% a un 90% de color y sólidos suspendidos (CEPIS, 2004).

En la implementación del tratamiento por coagulación química, como sistema de depuración de aguas residuales, se hace necesario determinar los parámetros de tratabilidad tales como dosis óptima, gradiente y tiempo de mezcla lenta, tiempo de sedimentación, ya que de estos depende la efectividad del tratamiento de dichas aguas. La determinación de los parámetros de tratabilidad permite conocer el comportamiento de la muestra de agua cuando es sometida a distintas condiciones de tratamiento dando como resultado la configuración en la cual se tienen los mejores resultados de las características fisicoquímicas finales del agua.

### 3.1.3 Marco teórico

La coagulación química es una tecnología que se utiliza tanto para sistemas de tratamiento de agua para consumo humano, como para el tratamiento de aguas residuales, se basa en la adición de sustancias que a través de un mecanismo fisicoquímico permiten la aglomeración de las partículas de diámetro menor a 0.001 mm. El agregado de esas partículas produce partículas mayores, cuyo diámetro varía entre 0.001 mm y 5 mm aproximadamente (Maldonado, 2.005),

denominados flóculos que son fácilmente eliminados por medio de la decantación (sedimentación).

El proceso de coagulación química presenta tres etapas, las cuales se describen a continuación:

Coagulación o mezcla rápida: es la primera etapa del tratamiento, esta consiste en la adición de un producto químico con el fin de desestabilizar las partículas coloidales; su energía de agitación expresada como gradiente de mezcla rápida es alta ya que se debe asegurar una interacción total entre el coagulante y las partículas que se encuentran en la muestra. Debido a su alto requerimiento en la energía de agitación, no necesita de un tiempo de coagulación demasiado largo, ya que se puede generar la ruptura del floculo formado, dicho tiempo varía generalmente entre uno y dos minutos.

Floculación o mezcla lenta: después de desestabilizar las partículas coloidales, es necesario promover su interacción para la formación de partículas de mayor tamaño y facilitar su eliminación por procesos físicos como la sedimentación. En la floculación, la energía de agitación es menor en comparación con la etapa de coagulación, ya que se puede afectar la integridad del floculo formado y dificultar su eliminación. Al igual que en la etapa anterior, la floculación presenta dos variables de tratamiento, las cuales son el gradiente y tiempo de mezcla lenta, estas variables presentan diferencias dependiendo del producto químico a utilizar, debido a los requerimientos de energía de cada uno de ellos.

Sedimentación: la sedimentación es la etapa final del proceso de coagulación química, consiste en la eliminación de los floculos formados en la etapa anterior por medio de la fuerza de gravedad.



Existen varias sustancias que se utilizan para coagular y por tal razón reciben el nombre genérico de coagulantes. Estos funcionan a partir de un mecanismo de hidrólisis y creación de estructuras fisicoquímicas, en donde los compuestos que se van desarrollando por el proceso se cubren de cargas eléctricas que atraen las cargas de otras partículas más pequeñas que se van acumulando formando las partículas mayores ya descritas. Este mecanismo, de ningún modo es privativo de una sola sustancia, sino, de una gama de ellas, las cuales presentan los mecanismos mencionados y que pueden ser utilizadas con ese fin. Entre los coagulantes químicos más utilizados se encuentran las sales de aluminio y las sales de hierro.

El cloruro férrico es el coagulante más utilizado en el tratamiento de aguas residuales domésticas, aguas negras y residuos industriales, presentando una remoción que varía entre el 80 y 90% de la materia total en suspensión y una eliminación de aproximadamente el 60% de la materia orgánica natural (Crozes, et al, 1.994).

El policloruro de aluminio (PAC) es un producto que se comercializa en forma líquida. Su nombre policloruro hace referencia a su verdadera composición química, ya que en realidad no se trata de un compuesto de fórmula definida, sino más bien de una mezcla de polímeros o agregados de polímeros de hidróxido de cloruro de aluminio con fórmula  $Al_n(OH)_mCl_{(3n-m)}$  con  $0 < m < 3n$ .

El PAC contiene concentraciones variables de cloruro de aluminio, y esta concentración es expresada por convención como porcentaje en peso de Al. El rango de esa concentración va de 2.5% a 13 % (CEPIS, 2.004), su denominación depende de la concentración porcentual de cloruro de aluminio, el polímero utilizado en la presente investigación, es el denominado hidroxiclорuro de aluminio.

Cabe anotar que a diferencia del cloruro férrico, el PAC únicamente se ha utilizado en la clarificación de aguas para consumo humano, las cuales presentan unas características muy favorables que facilitan el proceso de coagulación-floculación debido a que factores como pH, color, turbiedad, demanda bioquímica de oxígeno (DBO), demanda química de oxígeno (DQO) y oxígeno disuelto (OD), no son tan críticos como los que se presentan en las aguas residuales.

Otros reactivos empleados en el tratamiento químico son el sulfato de aluminio o alumbre, el sulfato ferroso con cal, el sulfato férrico y el cloruro férrico con o sin cal (Departamento de Sanidad del Estado de Nueva York, 1999).

Dentro de la floculación química, el gradiente y tiempo de mezcla lenta, tienen una gran importancia puesto que el número de colisiones entre partículas esta directamente relacionado con dicho gradiente, periodos largos tienden a aumentar la rotura del flóculo y producir características pobres de sedimentación, por el contrario, periodos cortos pueden no ser suficientes para una formación completa del flóculo (Romero, 1995).

Entre los parámetros utilizados en la evaluación de la calidad del agua se encuentran parámetros físicos tales como sabor, olor, color y turbiedad; parámetros químicos tales como pH, dureza, alcalinidad, coloides, metales y gases disueltos; y parámetros indicativos de contaminación orgánica y biológica como DBO, DQO, carbono orgánico total (COT) (Rigola, 1999).

La relación entre los valores de la DQO y la DBO es un indicativo de la biodegradabilidad de la materia contaminante. En aguas residuales un valor de la relación DBO/DQO menor que 0.2 se interpreta como un vertido de tipo inorgánico y si es mayor que 0.6 como orgánico (RIGOLA, 1999, 37).

## Extracción de almidón agro de yuca

El proceso de extracción del almidón agro de yuca se realiza mediante las siguientes actividades, que en su orden son lavado, rallado, tamizado, sedimentación, fermentación y secado. En la figura 3.1, se presenta el diagrama de flujo del proceso de extracción de almidón agro de yuca de la rallandería Santa Bárbara, además de la disposición de los subproductos generados.

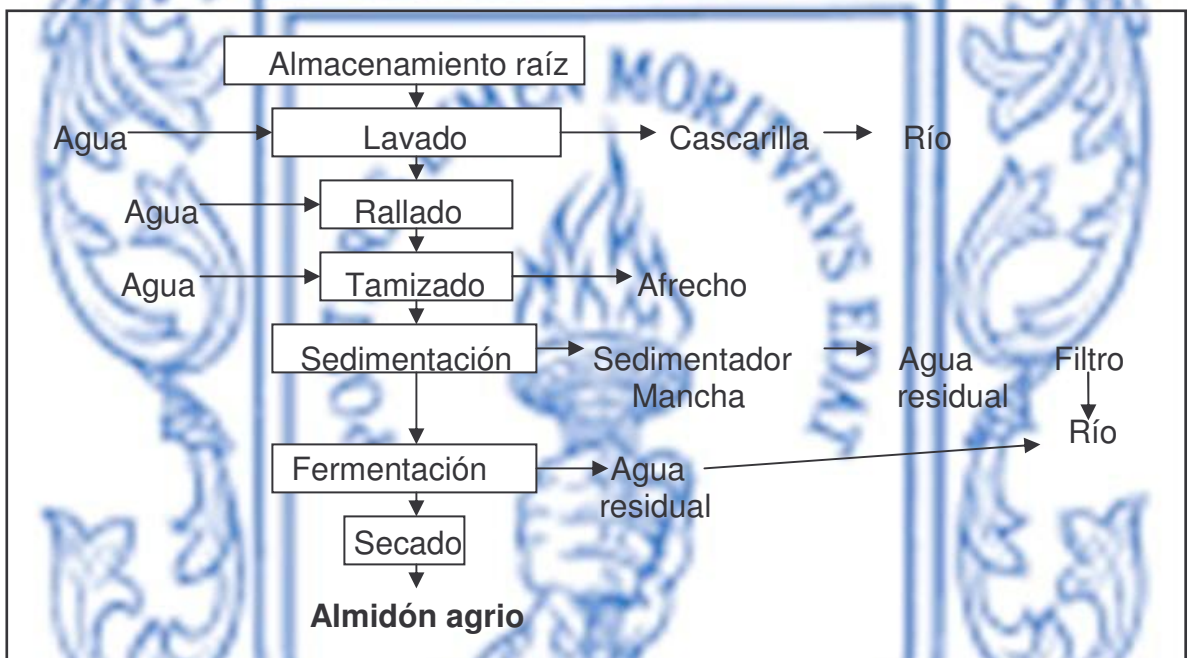


Figura 3.1. Diagrama de flujo del proceso de extracción de almidón agro de yuca de la rallandería Santa Bárbara.

La mayor parte de la raíz utilizada proviene del eje cafetero; las variedades de yuca utilizadas en la rallandería Santa Bárbara son las denominadas Chirosa e Ica, siendo ésta última la más utilizada en dicha rallandería por su mayor contenido de almidón (Alarcón y Dufour, 1998).

La primera operación es el lavado, que consiste en la remoción de la tierra e impurezas, así como la cascarilla de la raíz, esto se realiza en forma mecánica; el agua residual generada en este proceso se vierte directamente a los afluentes del río Mondomo. La operación siguiente al lavado, es el rallado que se realiza en forma mecánica, tiene como objetivo el aumentar la superficie de contacto y liberar el almidón contenido en la yuca. Posteriormente, se realiza la operación de tamizado o colado, que es donde se disuelve el almidón en agua y de esta forma separarlo del afrecho o pulpa de la raíz.

En la fase de sedimentación, el agua proveniente del tamizado, se lleva a unos canales con el fin de sedimentar el almidón disuelto para luego ser llevado a los tanques de fermentación. El proceso de fermentación, es el que le proporciona el carácter agrio al almidón, dicho proceso presenta una duración promedio de 8 semanas para la rallandería Santa Bárbara. La etapa final, es el secado del almidón que se realiza extendiendo el almidón al aire libre a temperatura ambiente.

Dentro del proceso de extracción del almidón agrio, se genera además de almidón, dos subproductos que son el afrecho y la mancha, esta última, es un subproducto que contiene almidón de mala calidad que en ocasiones se mezcla con el almidón de óptima calidad y en su mayoría es arrastrada por el agua residual generada en el proceso de sedimentación de almidón, por tal razón se extrae en los sedimentadores de mancha o canales dispuestos a continuación de los canales de sedimentación de almidón. Un porcentaje de estos subproductos es utilizado para el sostenimiento de actividades porcícolas dentro de la rallandería, el porcentaje restante se comercializa.

El esquema de la planta procesadora de almidón agrio de yuca de Santa Bárbara se presenta en el anexo A.

## 4 OBJETIVOS

### 4.1 OBJETIVO GENERAL

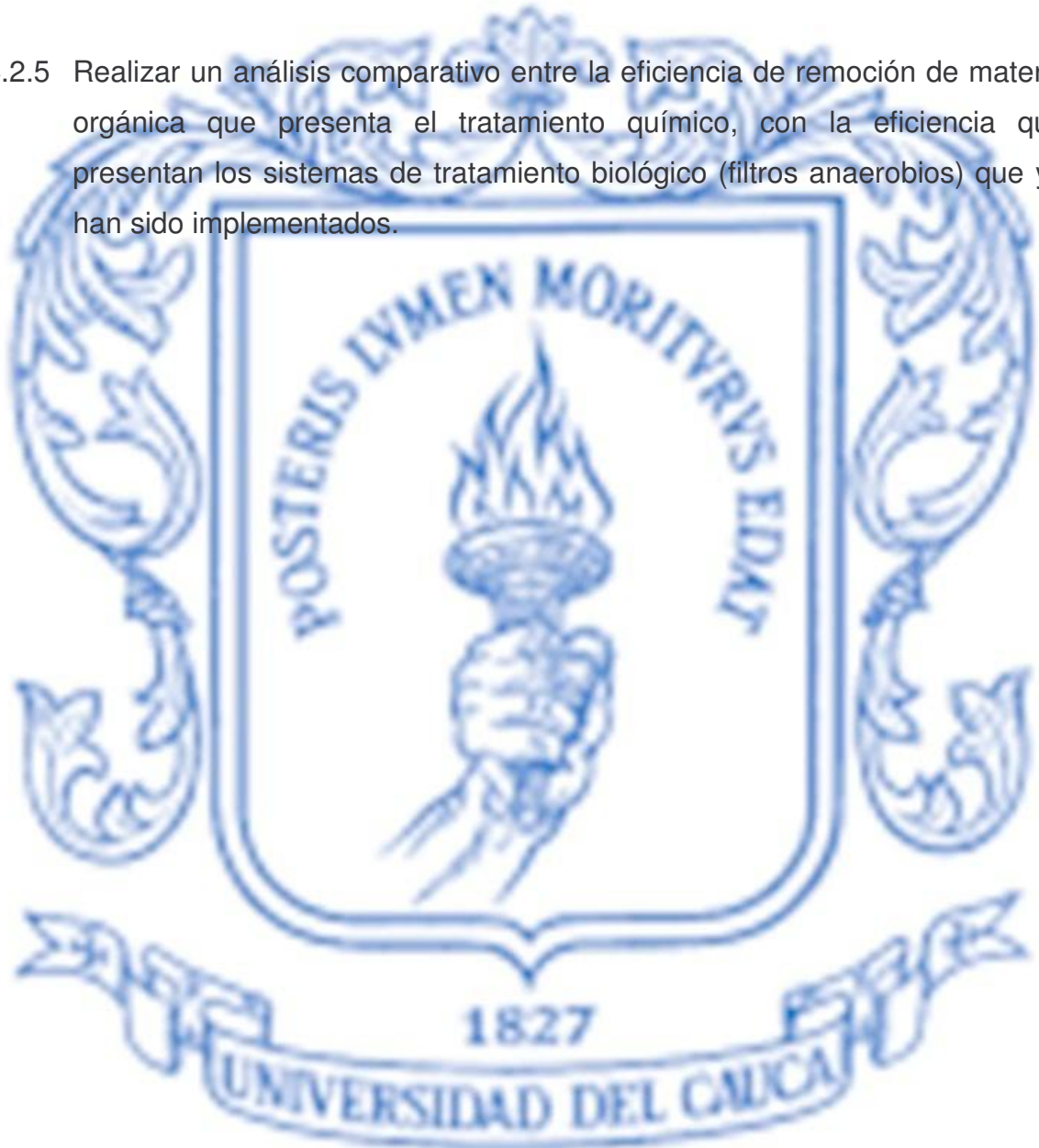
Evaluar la factibilidad del uso del proceso de coagulación química con dos coagulantes para la remoción de la materia orgánica presente en el agua residual de las rallanderías de yuca ubicadas en Mondomo Cauca.

### 4.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- 4.2.1 Realizar los estudios de tratabilidad a las aguas residuales de las rallanderías que se vierten al río Mondomo, con el fin de determinar los diferentes parámetros de la coagulación química (Gradiente y tiempo de mezcla lenta, dosis del coagulante y tiempo de sedimentación) que presenten la mayor remoción de la materia orgánica utilizando dos diferentes tipos de coagulantes.
- 4.2.2 Evaluar el uso de coagulantes como cloruro férrico e hidroxiclورو de aluminio, para satisfacer los requerimientos de remoción de materia orgánica en el tratamiento de las aguas residuales de las rallanderías ubicadas en Mondomo.
- 4.2.3 Determinar el rango de pH y dosis de coagulante que combinados con los parámetros de tratabilidad del agua residual proveniente del proceso de extracción de almidón agrio de yuca en la rallandería Santa Bárbara, generen una optimización del proceso de coagulación química.

4.2.4 Hacer un análisis comparativo entre los coagulantes utilizados para determinar cual de ellos presenta mayor eficiencia en la remoción de materia orgánica.

4.2.5 Realizar un análisis comparativo entre la eficiencia de remoción de materia orgánica que presenta el tratamiento químico, con la eficiencia que presentan los sistemas de tratamiento biológico (filtros anaerobios) que ya han sido implementados.



## 5. METODOLOGÍA

Para la presente investigación se seleccionó como centro de estudio a la rallandería de yuca de Santa Bárbara, ubicada en el corregimiento de Mondomo, siendo esta rallandería representativa en cuanto a producción promedio de las rallanderías de la región, además, la tecnología para extracción del almidón utilizada en ésta se encuentra implementada por la mayoría de las rallanderías ubicadas en este corregimiento.

El proceso investigativo se realizó en cuatro etapas, las cuales son: determinación de parámetros coagulación química para cada uno de los coagulantes (Etapa 1), evaluación del tratamiento con cloruro férrico (Etapa 2), evaluación del tratamiento con hidroxiclорuro de aluminio (Etapa 3), Análisis comparativo y procesamiento de datos obtenidos (Etapa 4).

En la realización de este estudio, se utilizó una dilución del 2 % P/V para cada uno de los coagulantes; el anexo B contiene las fichas técnicas de los coagulantes y equipos utilizados en la presente investigación.

El punto inicial de las primeras tres etapas requiere de una recolección de muestras significativas del agua residual generada en la rallandería, dicho proceso se describe a continuación:

### 5.1 RECOLECCIÓN DE MUESTRAS

Cada muestreo se efectuó de la siguiente manera. Primero, se procedió a recoger muestras compuestas de las aguas residuales que salen del canal de sedimentación de mancha, garantizando una muestra representativa y confiable para el análisis, se almacenaron en recipientes plásticos (volumen entre 20 y 30

litros) limpios, herméticos y rotulados, una vez aseguradas se transportaron al laboratorio donde se refrigeraron a cuatro grados centígrados (4°C, por un periodo máximo de 2 días); por último se determinaron los parámetros fisicoquímicos iniciales (Color aparente, turbiedad, pH, Temperatura).

## 5.2 ETAPA 1: DETERMINACIÓN DE PARÁMETROS DE COAGULACIÓN QUÍMICA

Se determinaron los parámetros de coagulación (pH, tiempo y gradiente de mezcla lenta, tiempo de sedimentación) para cada uno de los coagulantes a utilizar (PAC y cloruro férrico). El trabajo de laboratorio correspondiente a esta etapa, se realizó al día siguiente de la recolección de muestra.

### 5.2.1 Determinación de dosis óptima

Se fijaron las dosis del coagulante a estudiar (cloruro férrico o PAC) y se procedió a realizar la prueba de jarras adicionando el coagulante al mismo tiempo en cada jarra y teniendo en cuenta los siguientes parámetros de tratamiento, gradiente de agitación de mezcla rápida  $630 \text{ s}^{-1}$  aproximadamente, tiempo de mezcla rápida 1 minuto, gradiente de agitación de mezcla lenta próximo a  $22 \text{ s}^{-1}$ , tiempo de mezcla lenta 20 minutos y un tiempo de sedimentación de 15 minutos, estos parámetros se seleccionaron con referencia a lo expuesto en el marco teórico (sección 3.1.3). Al finalizar las diferentes pruebas de jarras se determinaron y evaluaron las características finales de cada una de las jarras, y con esto datos se seleccionaron la dosis de coagulante en donde se obtuvieron los mejores resultados de remoción de turbiedad y color.



### 5.2.2 Determinación de gradiente y tiempo de mezcla lenta

Los gradientes de mezcla lenta a evaluar establecidos fueron 4.5, 13, 22.0 y 35.0  $s^{-1}$ , así como tiempos de mezcla lenta de 5, 10, 15, 20, 25 y 30 minutos. Para cada uno de los gradientes de mezcla lenta se realizó una prueba de jarras, asignando a cada jarra de la prueba uno de los tiempos de agitación antes mencionados. Utilizando la dosis óptima, determinada según lo indicado en la sección 5.2.1, se adicionó el coagulante al mismo tiempo en cada jarra, para un gradiente de mezcla rápida de 630  $s^{-1}$  y un tiempo de mezcla rápida de 1 minuto. En lo concerniente al tiempo de sedimentación se estableció un periodo de 15 minutos. Al finalizar la prueba se determinó y evaluó las características finales de cada una de las jarras, seleccionando el gradiente y tiempo de mezcla lenta en donde se obtuvieron los mejores resultados de remoción de turbiedad y color, dicha configuración corresponde al gradiente y tiempo de mezcla lenta óptimos.

### 5.2.3 Determinación tiempo de sedimentación

En lo que respecta a los tiempos de sedimentación a evaluar, se trabajó con 10, 15, 20, 25, 30 y 35 minutos, asignando un tiempo a cada una de las jarras. Utilizando la dosis óptima, gradiente y tiempo de mezcla lenta determinados con anterioridad, se adicionó el coagulante al mismo tiempo en cada jarra. Al finalizar la prueba se midieron el pH, la turbiedad y el color. Con los resultados obtenidos se estableció el valor óptimo para este parámetro.

## 5.3 ETAPA 2: EVALUACIÓN DEL TRATAMIENTO CON CLORURO FÉRRICO

Después de recolectada la muestra como lo indica la sección 5.1, se determinaron las características físico químicas del agua residual (DBO inicial, DQO, pH, turbiedad y color). Con el equipo floculador ya preparado, se establecieron los

valores de pH y dosis de coagulante a evaluar, se adicionó ácido o base, según el requerimiento de pH del ensayo (Ácido Clorhídrico o Hidróxido de Sodio). La prueba consistió en fijar un valor de pH y adicionar las diferentes dosis de coagulante en cada jarra. Al terminar la prueba de jarras, se midieron los parámetros finales pH, turbiedad y color, con los resultados obtenidos se determinó cual de las jarras tuvo la mejor eficiencia de remoción para realizarle las pruebas de DBO y DQO.

Este procedimiento se realiza en primera instancia para un rango amplio de pH, posteriormente, se seleccionan los valores de pH en el cual se obtienen las mejores eficiencias de remoción de turbiedad y color, con el fin de realizar de nuevo el procedimiento descrito en esta sección, pero con un rango de pH más estrecho.

#### 5.4 ETAPA 3: EVALUACIÓN DEL TRATAMIENTO CON POLICLORURO DE ALUMINIO, PAC

Después de recolectada la muestra como lo indica la sección 5.1, se determinaron las características físico químicas iniciales del agua residual (DBO, DQO, pH, turbiedad y color). Con el equipo floculador ya preparado, se establecieron los valores de pH y dosis de coagulante a evaluar, se adicionó ácido o base, según el requerimiento de pH del ensayo (Ácido Clorhídrico o Hidróxido de Sodio). La prueba consistió en fijar el valor de pH y adicionar las diferentes dosis de coagulante en cada jarra. Al terminar la prueba de jarras, se midieron los parámetros finales de pH, turbiedad y color, con los resultados obtenidos se determinó cual de las jarras presentó la mejor eficiencia de remoción para realizarle las pruebas de DBO y DQO.

Este procedimiento se realiza en primera instancia para un rango amplio de pH, posteriormente, se seleccionan los valores de pH en el cual se obtienen las mejores eficiencias de remoción de turbiedad y color, con el fin de realizar de nuevo el procedimiento descrito en esta sección, pero con un rango de pH más estrecho.

Aunque las pruebas de DBO y DQO son los parámetros de calidad de aguas más importantes a tener en cuenta en el presente estudio, dichas pruebas solo se realizaron al mejor resultado de cada prueba de jarras en las etapas correspondientes al análisis de los coagulantes (etapas 2 y 3), debido a limitaciones en los recursos presupuestales, además, de no contar con la capacidad operativa suficiente para realizar estas pruebas en cada una de las jarras, teniendo en cuenta el elevado número de pruebas de jarras realizado en la investigación.

En el transcurso de cada una de las tres etapas anteriores, se recolectaron los datos obtenidos para su posterior análisis en la etapa 4.

#### 5.5 ETAPA 4: ANÁLISIS COMPARATIVO Y PROCESAMIENTO DE DATOS OBTENIDOS

Los datos obtenidos se registraron en tablas diseñadas (ver anexo C), con éstos se elaboró el diagrama de coagulación para cada coagulante (cloruro férrico y PAC), con el fin de determinar el rango de pH y las dosis donde se presenta la mayor remoción de la materia orgánica.

### 5.5.1 Elaboración diagramas de coagulación

Para la elaboración de los diagramas de coagulación, tanto para el cloruro férrico como para el hidroxiclорuro de aluminio, se realizó el siguiente procedimiento:

Para los resultados obtenidos en las etapas 2 y 3, se unificaron los datos obtenidos (rango amplio y estrecho de pH) en lo concerniente al pH final, color y turbiedad. Se determinaron las eficiencias de remoción (color y turbiedad), correspondientes a las parejas de dosis y pH final, estos resultados de eficiencias de remoción obtenidas, tanto de color como de turbiedad para cada uno de los coagulantes en estudio, se graficaron de la siguiente manera, en el eje de las abscisas, se colocan los valores correspondientes a pH final y en el eje de la ordenadas, el valor de dosis de coagulante en mg/L, al punto obtenido entre el cruce de dosis de coagulante y pH final, se le asigna el valor de la eficiencia de remoción de turbiedad o color, según sea el caso. Teniendo la nube de puntos, correspondiente a las diferentes eficiencias, se procedió a unir los puntos de igual eficiencia de remoción por medio de interpolación.

### 5.5.2 Análisis comparativo

Se realizó un análisis comparativo entre los resultados obtenidos con cada uno de los coagulantes utilizados, así como con los resultados reportados del filtro anaerobio ya implementado; los puntos de análisis a tener en cuenta fueron eficiencia de remoción del coagulante, cantidad de coagulante utilizado y la viabilidad de implementación para una planta piloto en lo que se refiere a costo y facilidad en la manipulación.

### 5.5.3 Correlaciones

Debido a que los parámetros de evaluación de calidad de aguas como la demanda bioquímica de oxígeno (DBO) y la demanda química de oxígeno (DQO) solo se efectúan a las muestras tratadas que presentan los mejores resultados de remoción de color y turbiedad, se hace necesario efectuar correlaciones entre parámetros con el fin de incrementar el número de datos de DBO y DQO.

Las correlaciones se efectúan utilizando el programa Polymath versión 5.1, mediante un proceso iterativo de combinación de cada uno de los parámetros de evaluación de calidad de aguas, dejando como variables dependientes los parámetros de DBO o DQO, según sea el caso, y como variables independientes los parámetros de turbiedad, color y pH. La selección de la correlación se realiza teniendo en cuenta el ajuste ( $r^2$ ) que presenta cada una de las ecuaciones obtenidas.

Finalmente con los datos proporcionados por las correlaciones se procedió a realizar los diagramas de coagulación en la forma descrita en el numeral 5.5.1.



## 6. DESARROLLO DE LOS OBJETIVOS PROPUESTOS

### 6.1 ETAPA 1: DETERMINACIÓN DE LOS PARÁMETROS DE COAGULACIÓN

A continuación se presentan los datos recolectados en las salidas de campo a la rallería Santa Bárbara realizadas los días 19 y 25 de abril de 2.005, y los datos recolectados mediante un trabajo realizado en laboratorio los días 20 y 26 de abril del mismo año. El trabajo de laboratorio en esta etapa tiene como objetivo principal la determinación de los parámetros de tratabilidad del agua residual con cloruro férrico e hidroxiclورو de aluminio.

El trabajo de laboratorio realizado permitió la determinación de los parámetros de tratabilidad tales como la dosis, gradiente y tiempo de mezcla lenta, tiempo de sedimentación tanto del cloruro férrico como de hidroxiclورو de aluminio en donde se obtienen los mejores resultados de remoción de la mancha generada en el proceso de extracción de almidón en la rallería Santa Bárbara, la cual opera con un caudal promedio de 0.98 L/s (ver anexo D).

6.1.1 Determinación de parámetros de tratabilidad utilizando cloruro férrico como coagulante.

La tabla 6.1 presenta los parámetros iniciales de la muestra correspondiente a los días de muestreo y trabajo de laboratorio; los parámetros de turbiedad y color para el día 19 de abril de 2005, no fue necesario determinarlos puesto que en este día no se realizó el trabajo de laboratorio.

Tabla 6.1. Parámetros iniciales de la muestra, 19 y 20 de abril

Fecha	pH	Temperatura	Turbiedad	Color
19 de abril de 2005	6.13	23 °C	-	-
20 de abril de 2005	4.1	23.2 °C	2061 UNT	4500 PtCo

Con la metodología descrita en la sección 5.2, se procedió a determinar los parámetros de tratabilidad utilizando como coagulante una solución de cloruro férrico de concentración 2 % P/V. Los resultados obtenidos en la determinación de dosis óptima para el cloruro férrico a nivel de laboratorio, se presentan en la figura 6.1 y el anexo E1.

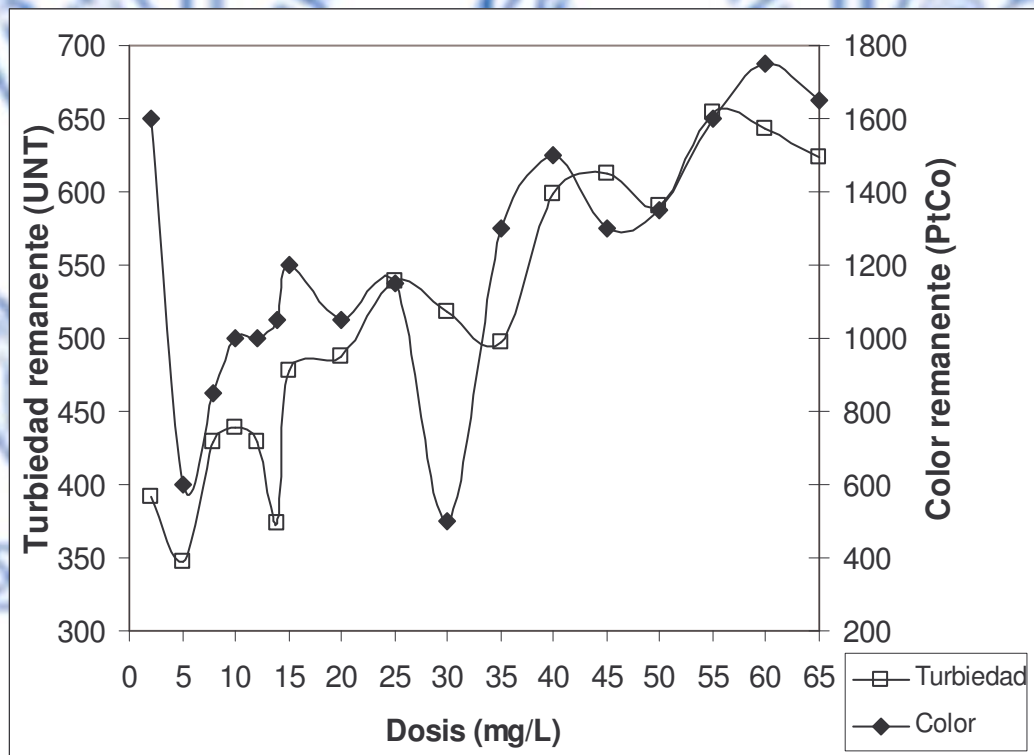


Figura 6.1. Determinación de dosis óptima de cloruro férrico.

Los resultados obtenidos en la determinación del tiempo y gradiente de floculación óptimos para el cloruro férrico se presentan en la figura 6.2 y el anexo E2; la figura 6.2.1 presenta la turbiedad remanente y la figura 6.2.2 el color remanente.

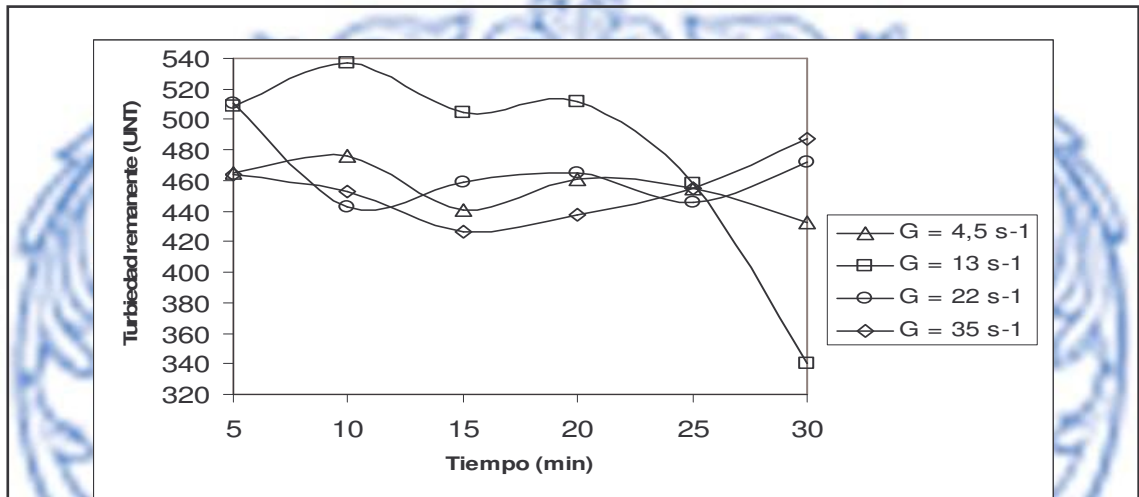


Figura 6.2.1. Turbiedad remanente según el gradiente y tiempo de floculación utilizando cloruro férrico.

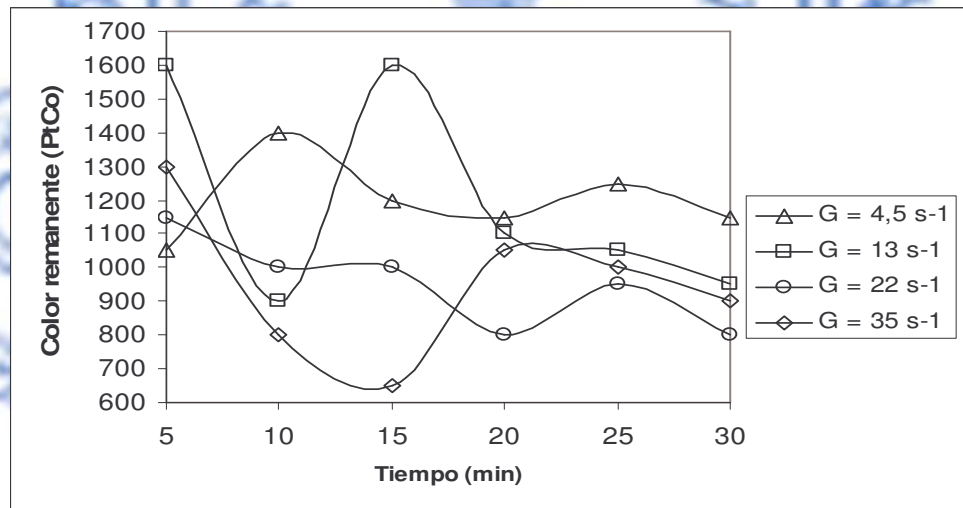


Figura 6.2.2. Color remanente según el gradiente y tiempo de floculación utilizando cloruro férrico.

Figura 6.2. Determinación de gradiente y tiempo de floculación óptimos para el cloruro férrico.



Los resultados obtenidos en la determinación del tiempo de sedimentación se muestran en la figura 6.3 y el anexo E4, en esta figura se relaciona los datos obtenidos para los parámetros de turbiedad y color remanentes.

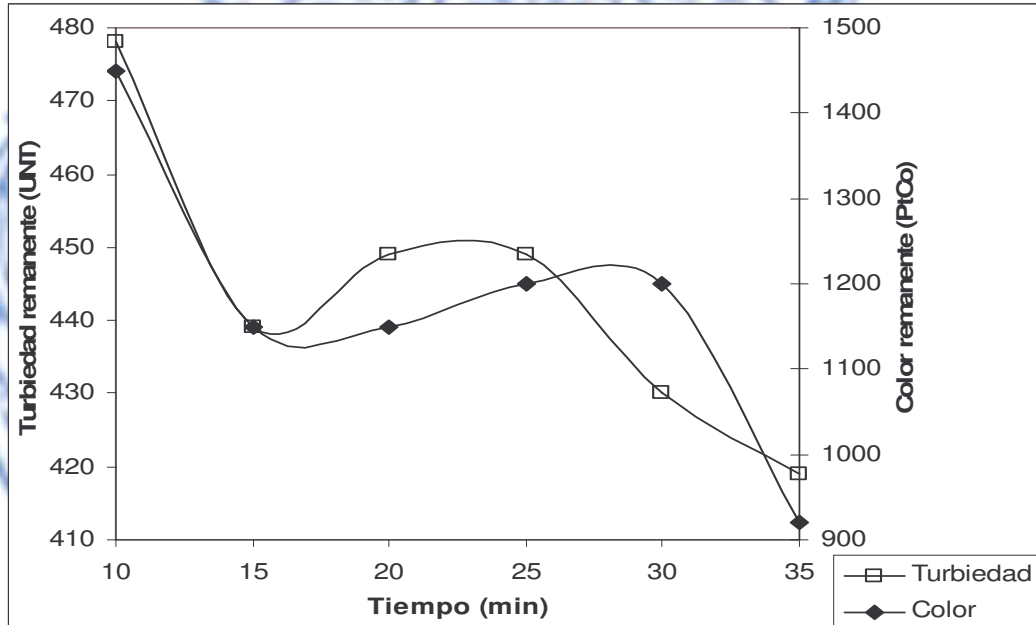


Figura 6.3. Determinación del tiempo de sedimentación para el cloruro férrico.

### 6.1.2 Determinación de parámetros de tratabilidad utilizando hidroxiclорuro de aluminio (PAC) como coagulante.

Con la metodología descrita en la sección 5.2, se procedió a determinar los parámetros de tratabilidad utilizando una solución de hidroxiclорuro de aluminio (PAC) de concentración 2 % P/V de aluminio.

La tabla 6.2 presenta los parámetros iniciales de la muestra recolectada el día 25 de abril y del 26 de abril de 2005, día en que se realizó el trabajo de laboratorio. En la tabla 6.2, los parámetros de turbiedad y color para el día 25 de abril de 2005,

no fue necesario determinarlos puesto que este día no se realizó el trabajo de laboratorio.

Tabla 6.2. Parámetros iniciales de la muestra, 25 y 26 de abril

Fecha	pH	Temperatura	Turbiedad	Color
25 de abril de 2005	6.12	23 °C	-	-
26 de abril de 2005	4.38	23 °C	2360 UNT	5700 PtCo

Los resultados obtenidos en la determinación de dosis óptima utilizando hidroxiclorigenato de aluminio como coagulante a nivel de laboratorio, se presentan en la figura 6.4 y el anexo F1.

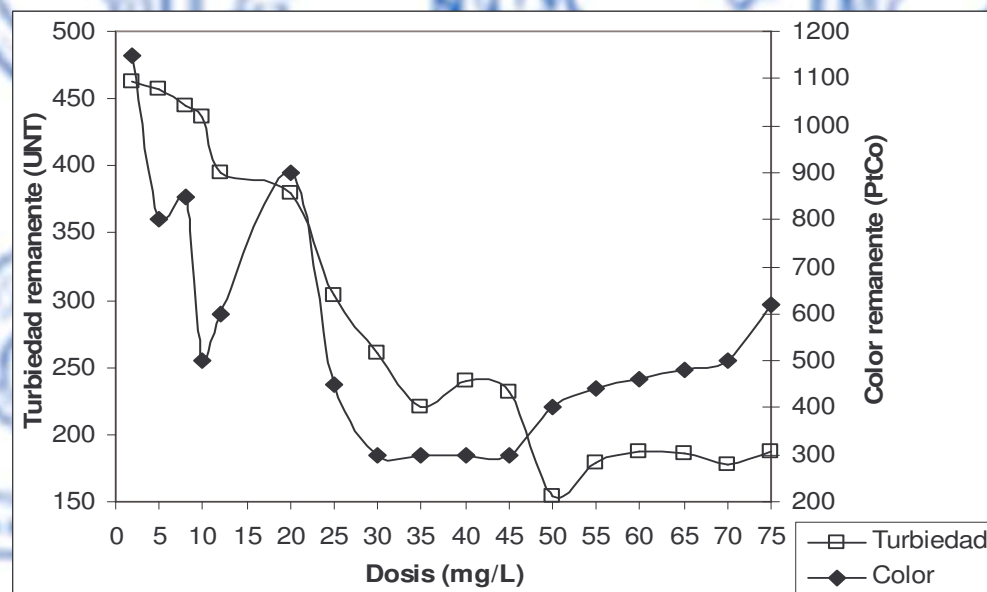


Figura 6.4. Determinación de dosis óptima de hidroxiclorigenato de aluminio.

La figura 6.5 y el anexo F2, muestran los resultados obtenidos en la determinación del tiempo y gradiente de floculación; la figura 6.5.1 presenta la turbiedad remanente y la figura 6.5.2 el color remanente.

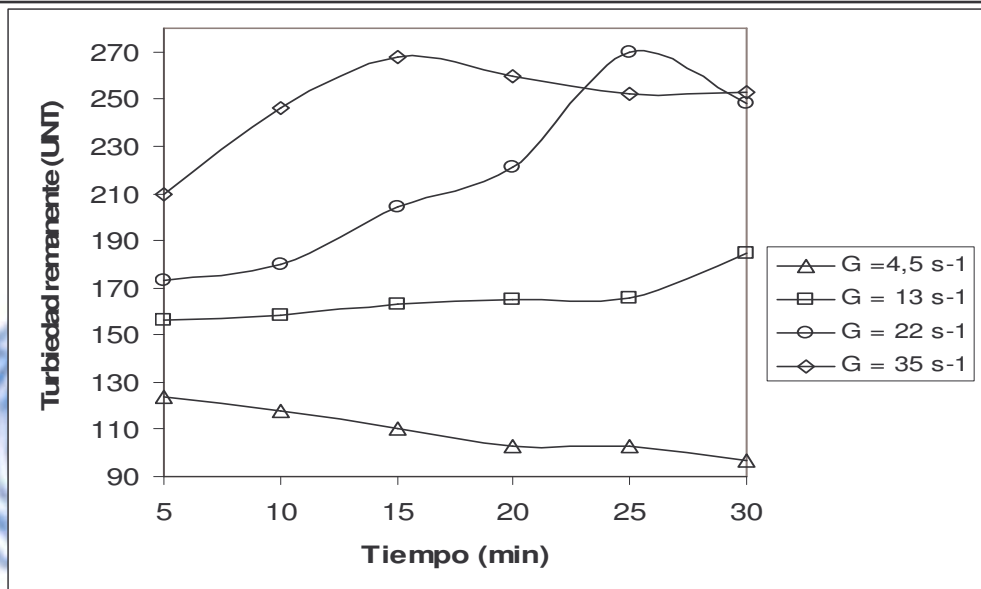


Figura 6.5.1. Turbiedad remanente según el gradiente y tiempo de floculación utilizando hidroxiclорuro de aluminio.

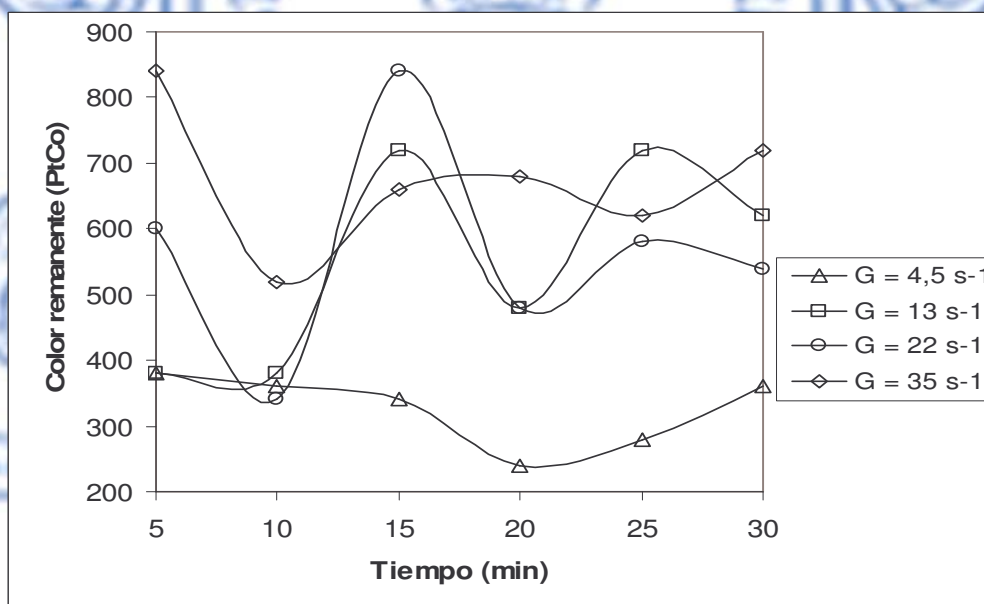


Figura 6.5.2. Color remanente según el gradiente y tiempo de floculación utilizando hidroxiclорuro de aluminio.

Figura 6.5. Determinación de gradiente y tiempo de floculación para el hidroxiclорuro de aluminio.

Los resultados obtenidos en la determinación del tiempo de sedimentación se presentan en la figura 6.6 y el anexo F4.

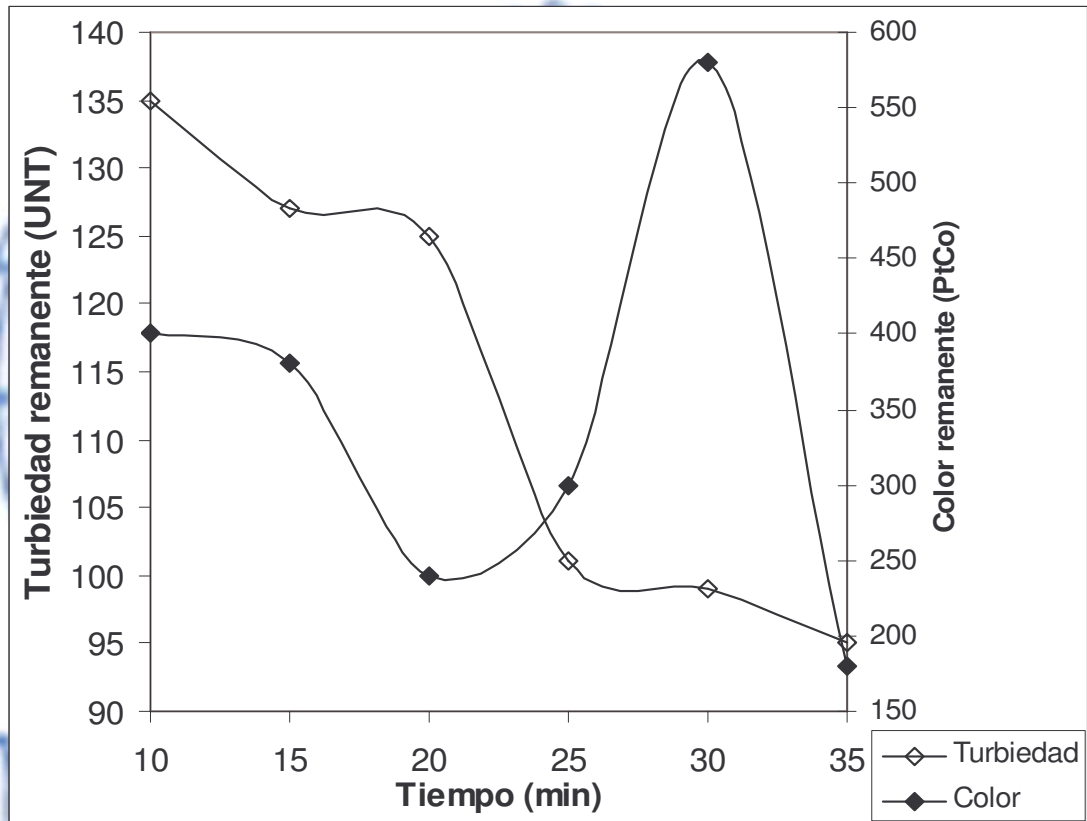


Figura 6.6. Determinación del tiempo de sedimentación para el hidroxicloriguro de aluminio.



## 6.1 ETAPA 2: EVALUACIÓN DEL TRATAMIENTO CON CLORURO FÉRRICO

Una vez identificados los parámetros de tratabilidad óptimos para los coagulantes utilizados en esta investigación, fue necesario identificar el rango de valores de pH y dosis de coagulante que en combinación con los parámetros de tratabilidad ya determinados en la etapa 1 sección 6.1, genere la optimización en el proceso de coagulación – floculación y con esto mejorar los resultados en el tratamiento químico al agua residual de la rallandería Santa Bárbara. Los parámetros óptimos de tratabilidad utilizando cloruro férrico como coagulante empleados en esta etapa, se presentan en la tabla 6.3.

Tabla 6.3. Parámetros de tratabilidad del cloruro férrico

PARÁMETRO	MAGNITUD
Gradiente de agitación de mezcla rápida	630 s <sup>-1</sup>
Tiempo de mezcla rápida	1 minuto
Gradiente de agitación de mezcla lenta	35 s <sup>-1</sup>
Tiempo de mezcla lenta	15 minutos
Tiempo de sedimentación	15 minutos
Concentración de cloruro férrico	2 % P/V

En la tabla 6.4, se presentan los parámetros iniciales de la muestra de los días 28 de abril, 19 de mayo y 1 de junio de 2005. En la tabla 6.4, el parámetro de DBO inicial para los días 28 de abril y 19 mayo de 2005, no se registran ya que esta prueba, como se mencionó en la sección 5.4 de la metodología, solo se realiza para los mejores resultados de remoción obtenidos; dichos resultados corresponden al trabajo realizado en laboratorio para un rango estrecho de pH.

Tabla 6.4. Parámetros iniciales de la muestra, 28 de abril, 19 de mayo y 1 de junio.

Fecha	pH	Temperatura (°C)	Turbiedad (UNT)	Color (PtCo)	DQO (mg O <sub>2</sub> /L)	DBO (mg O <sub>2</sub> /L)
28 /04/2005	5.17	23.2	2017	4300	4730.9	-
19/05/2005	5.97	23.2	2606	7650	10925.2	-
01/06/2005	5.10	23.2	2491	6900	6638.6	3174.6

Teniendo en cuenta la metodología descrita en la sección 5.3, se realizó el trabajo de laboratorio para un rango amplio de pH, variando la dosis de coagulante desde 2 mg/L hasta 7 mg/L de cloruro férrico; los resultados obtenidos se presentan en la figura 6.7 y el anexo E6.

Después de trabajar con un rango amplio de pH, con la metodología descrita en la sección 5.3, se procedió a estrechar dicho rango de pH, partiendo desde un valor de pH de 2.5 hasta un valor de 4.5, manteniendo las dosis de cloruro férrico de 2 mg/L hasta 7 mg/L. Cabe aclarar que inicialmente se planteó para los coagulantes utilizados emplear un rango amplio de pH que iniciara en 3.0 y terminara en 7.0, pero por los resultados obtenidos en las diferentes pruebas de jarras se hizo necesario estudiar pH menores a 3.0 y mayores a 7.0, esto con el fin de observar mejor la tendencia de remoción de dichos coagulantes.

Debido a que los parámetros iniciales y los resultados del trabajo de laboratorio correspondiente a las pruebas de jarras 35 a 39, fueron atípicos en comparación con los parámetros iniciales obtenidos anteriormente, puesto que los valores iniciales para turbiedad en general se encontraban en el rango de 2000 a 2300 UNT y para color en el rango de 4.500 a 5.700 PtCo y los datos iniciales obtenidos para el agua residual utilizada para estas pruebas de jarras fueron de 2.606 UNT

para turbiedad y de 7.650 PtCo para color, por lo anterior se optó por realizar pruebas de jarras adicionales para corroborar dichos resultados, en estas pruebas se conservó la tendencia atípica en los valores iniciales ya que estos fueron, para turbiedad 2491 UNT y para color 6.900 PtCo.

La figura 6.7 y el anexo E6 presentan los resultados obtenidos, cuando se utilizó un rango amplio de pH y se utilizaron dosis de cloruro férrico de 2 mg/L hasta 6 mg/L.

La figura 6.8 y el anexo E7 presentan los resultados promedio obtenidos, cuando se estrecha el rango de pH y se utilizaron dosis de cloruro férrico de 2 mg/L hasta 7 mg/L.



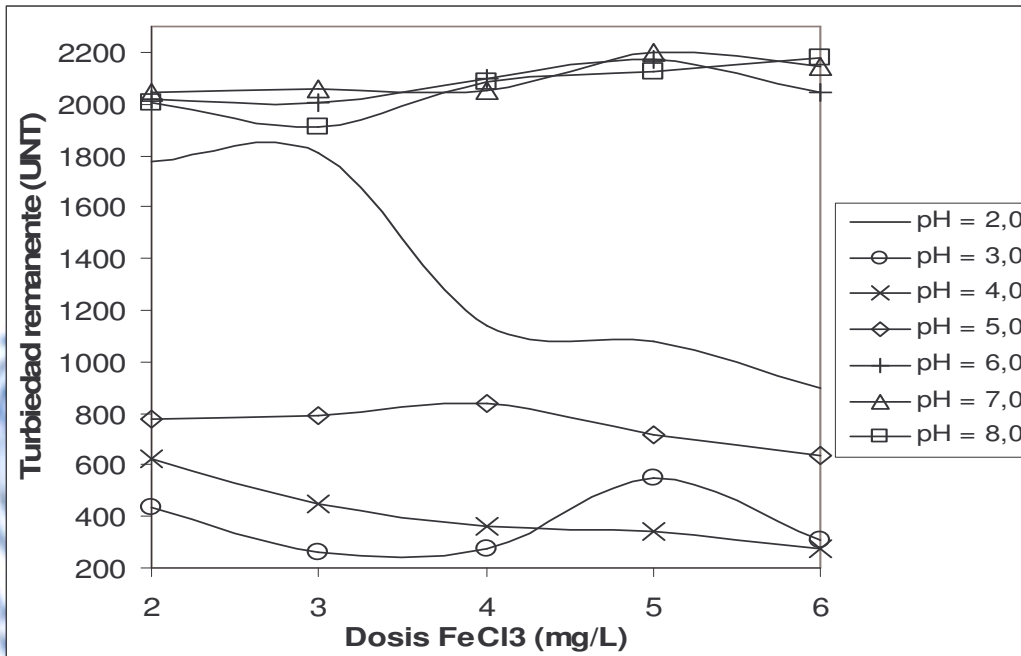


Figura 6.7.1. Turbiedad remanente a pH fijo y dosis variable de cloruro férrico.

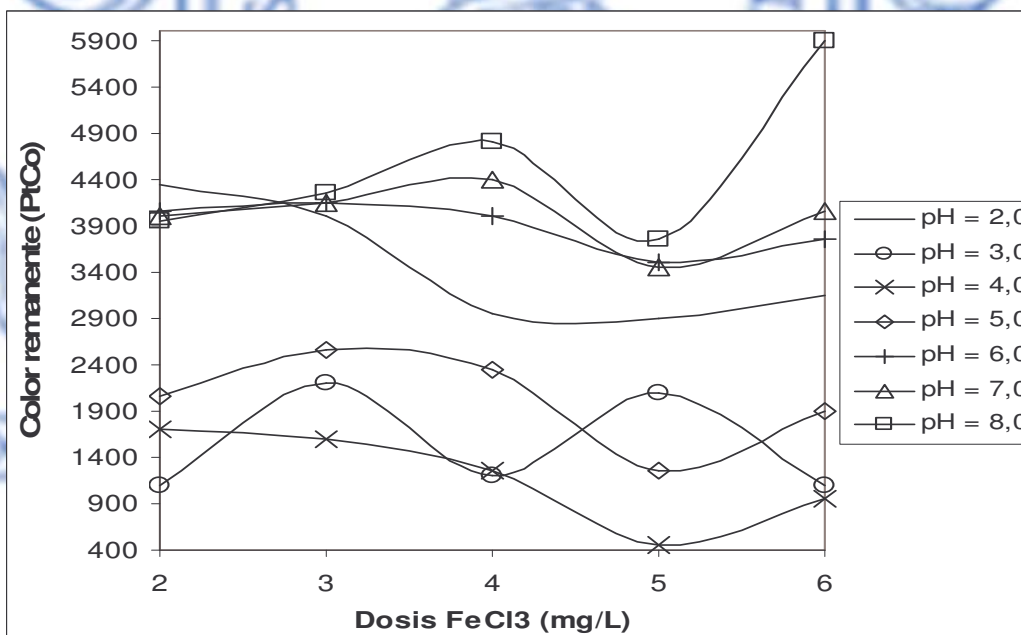


Figura 6.7.2. Color remanente a pH fijo y dosis variable de cloruro férrico.

Figura 6.7. Comportamiento del cloruro férrico teniendo en cuenta las variables pH y dosis de coagulante, trabajando con un rango amplio de pH.



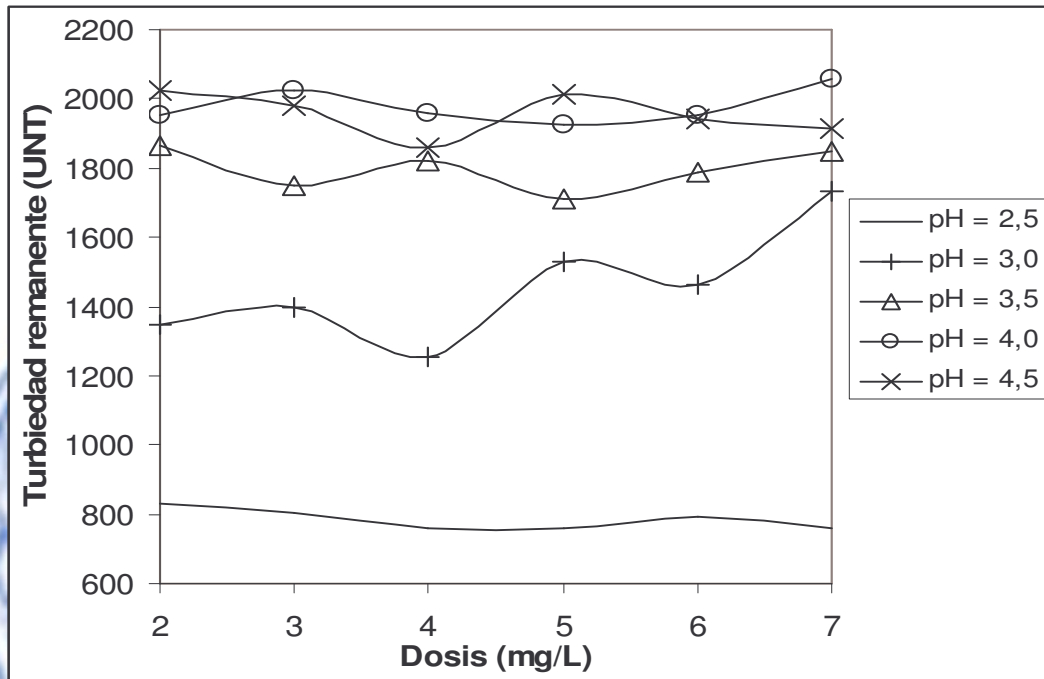


Figura 6.8.1. Turbiedad remanente a pH fijo y dosis variable de cloruro de férrico.

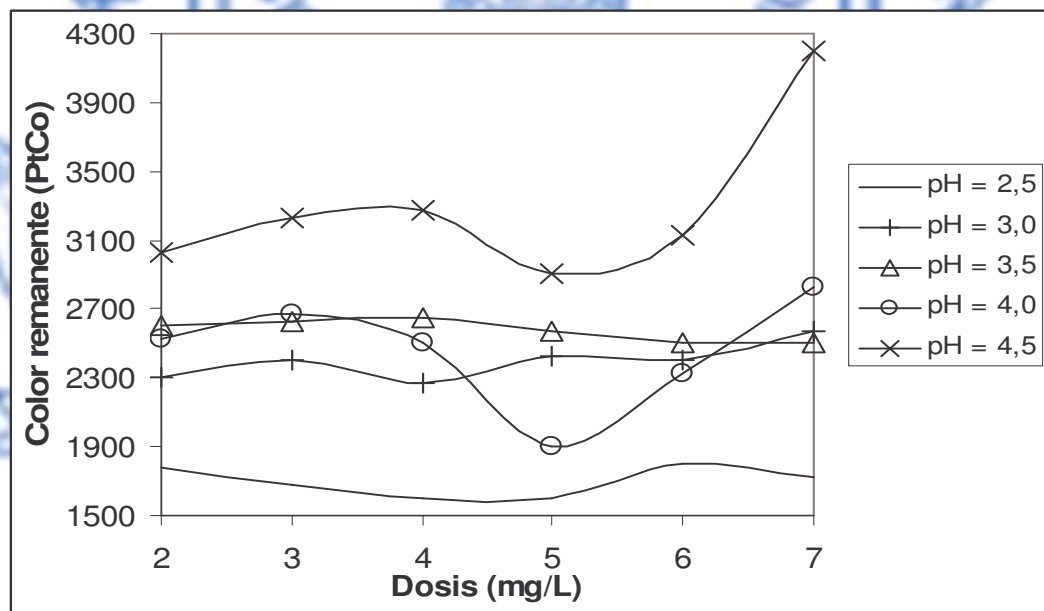


Figura 6.8.2. Color remanente a pH fijo y dosis variable de cloruro de férrico.

Figura 6.8. Comportamiento del cloruro férrico teniendo en cuenta las variables pH y dosis de coagulante, estrechando el rango de pH.

## 6.2 ETAPA 3. EVALUACIÓN DEL TRATAMIENTO CON HIDROXICLORURO DE ALUMINIO (PAC)

Una vez identificados los parámetros de tratabilidad óptimos para el hidroxiclорuro de aluminio, fue necesario identificar el rango de valores de pH y dosis de coagulante que en combinación con los parámetros de tratabilidad ya establecidos genere la optimización en el proceso de coagulación-floculación y con esto mejorar los resultados en el tratamiento químico al agua residual de la rallería Santa Bárbara.

En la tabla 6.5, se presenta los parámetros iniciales de la muestra de los días 2 y 17 de mayo de 2005. El parámetro de DBO para el día 2 mayo de 2005, no se registra ya que esta prueba tal como se mencionó en la sección 5.4, solo se realiza para los mejores resultados de remoción obtenidos; dichos resultados corresponden al trabajo realizado en laboratorio para un rango estrecho de pH.

Tabla 6.5. Parámetros iniciales de la muestra, 2 y 17 de mayo.

Fecha	pH	Temperatura (°C)	Turbiedad (UNT)	Color (PtCo)	DQO (mg O <sub>2</sub> /L)	DBO (mg O <sub>2</sub> /L)
02/05/2005	5.88	23.2	2336	5200	4622.1	-
17/05/2005	4.91	23.2	1788	3500	4209.9	3078.4

Tal como se describe en la sección 5.2 de la metodología, para un rango amplio de pH que inicia en 3.0 y termina en 7.0, se utilizaron dosis de coagulante que varían desde un valor mínimo de 40 mg/L hasta un valor máximo de 65 mg/L de hidroxiclорuro de aluminio; los resultados obtenidos se presentan en la figura 6.9 y el anexo F6.

La tabla 6.6 contiene los parámetros óptimos de tratabilidad determinados en la etapa 1, sección 6.1, cuando se utiliza hidroxiclورو de aluminio, dichos parámetros son los utilizados en la realización de la presente etapa.

Tabla 6.6. Parámetros de tratabilidad óptimos cuando se utiliza hidroxiclورو de aluminio como coagulante.

Parámetro	Magnitud
Gradiente de agitación de mezcla rápida	630 s <sup>-1</sup>
Tiempo de mezcla rápida	1 minuto
Gradiente de agitación de mezcla lenta	4.5 s <sup>-1</sup>
Tiempo de mezcla lenta	20 minutos
Tiempo de sedimentación	25 minutos
Concentración de cloruro férrico	2 % P/V

En la figura 6.9 y el anexo F6 se muestran los resultados obtenidos cuando se utilizó un rango amplio de pH, y se utilizaron dosis de Hidroxiclورو de aluminio de 40 mg/L hasta 65 mg/L.

En la figura 6.10 y el anexo F7 se muestran los resultados obtenidos cuando se estrecha el rango de pH, manteniendo las dosis de hidroxiclورو de aluminio con las que se trabajó con un rango amplio de pH.

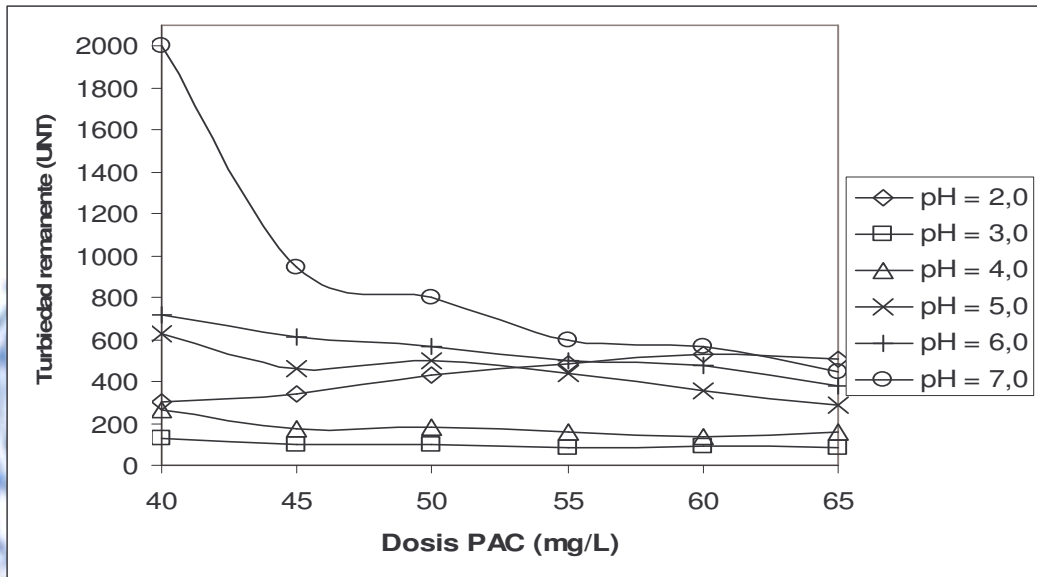


Figura 6.9.1. Turbiedad remanente a pH fijo y dosis variable de hidroxiclورو de aluminio.

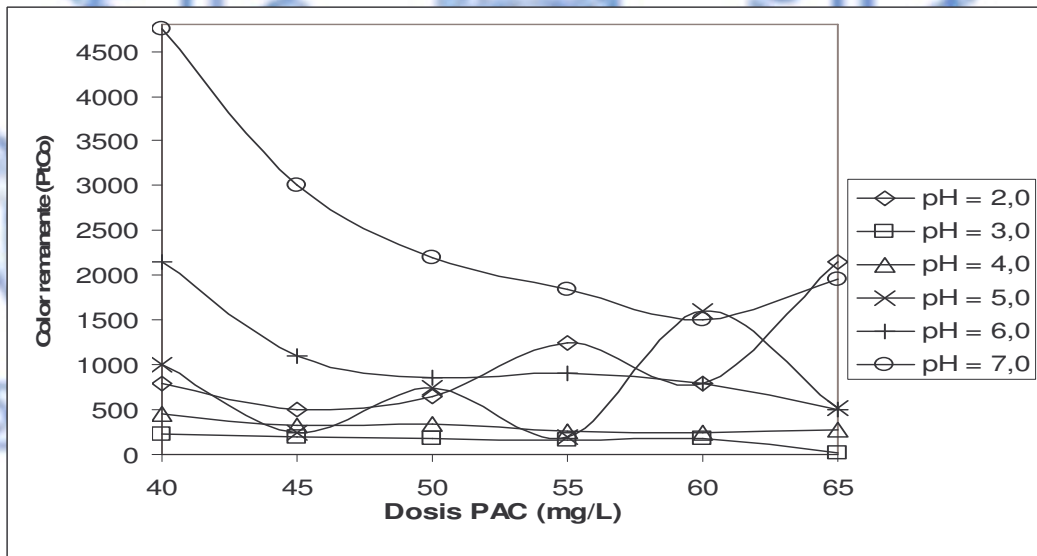


Figura 6.9.2. Color remanente a pH fijo y dosis variable de hidroxiclورو de aluminio.

Figura 6.9. Comportamiento del hidroxiclورو de aluminio teniendo en cuenta las variables pH y dosis de coagulante, trabajando con un rango amplio de pH.

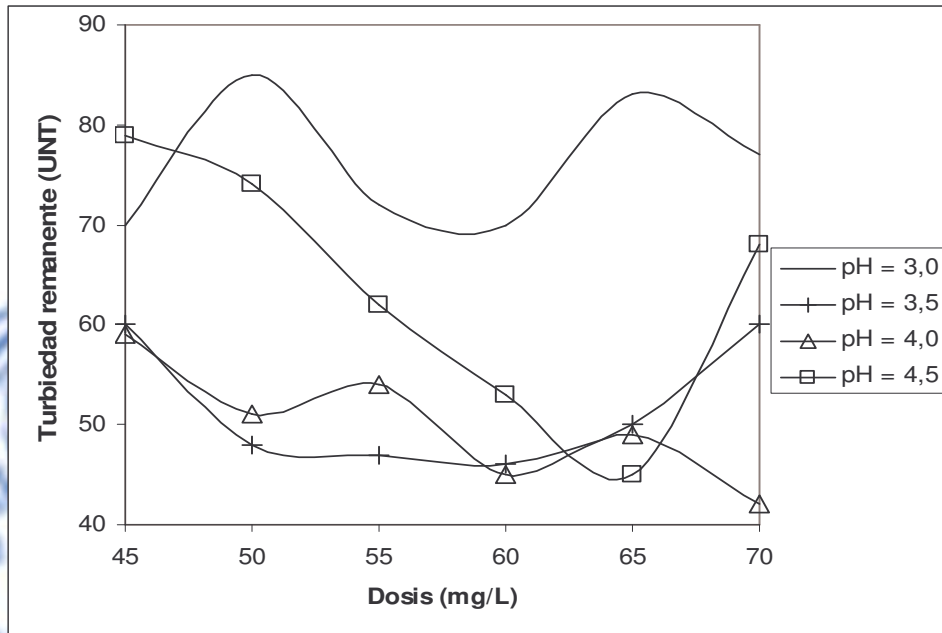


Figura 6.10.1. Turbiedad remanente a pH fijo y dosis variable de hidroxiclورو de aluminio.

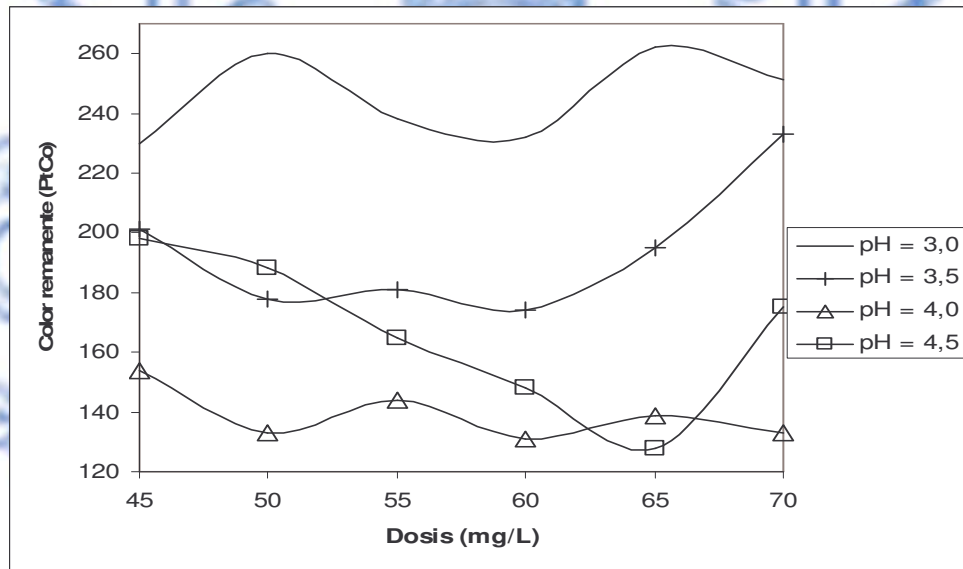


Figura 6.10.2. Color remanente a pH fijo y dosis variable de hidroxiclورو de aluminio.

Figura 6.10. Comportamiento del hidroxiclورو de aluminio teniendo en cuenta las variables pH y dosis de coagulante, estrechando el rango de pH.

## 7. ANÁLISIS DE RESULTADOS

Los parámetros fisicoquímicos del agua residual generada en la rallandería Santa Bárbara se ven afectados por la variedad de yuca y el tiempo transcurrido desde la cosecha hasta el procesamiento de la misma, ya que dependiendo de la variedad de la yuca se tienen diferentes porcentajes en los componentes propios de la raíz como almidón, afrecho, mancha, compuestos cianogénicos, entre otros. Todo lo anterior se encuentra directamente relacionado con las propiedades fisicoquímicas del agua residual, ya que estos componentes de la raíz al encontrarse suspendidos o disueltos, generan las características propias de ésta, haciéndola bastante compleja.

Otra variable que afecta las características del agua residual hace referencia a ciertas etapas del proceso extracción de almidón como lavado, colado y sedimentación en canales, ya que el proceso de extracción de almidón en la rallandería Santa Bárbara no se encuentra estandarizado y se realiza bajo el criterio del operario, el cual se basa en su experiencia empírica para la determinación de cada una de las variables del proceso como tiempos de lavado y colado y cantidad de agua utilizada en cada una de las etapas. El conocimiento que tienen los operarios difiere de uno a otro, hecho que genera en algunas ocasiones procesos incompletos de lavado, variación en las concentraciones del almidón en el colado y pérdida de almidón por diferencias en los tiempos de sedimentación. Por lo tanto, se presentan características fluctuantes tanto en el almidón producido como en el agua residual generada. Principalmente, las variaciones que se presentan en el agua residual hacen referencia a cambios bruscos en las características fisicoquímicas iniciales del agua tales como turbiedad, color, DBO y DQO.

## 7.1 ESTUDIO DE TRATABILIDAD UTILIZANDO CLORURO FERRICO COMO COAGULANTE.

### 7.1.1 Etapa 1. Parámetros de tratabilidad

#### 7.1.1.1 Determinación de dosis óptima

En la figura 7.1, se presentan los resultados obtenidos para las eficiencias de remoción tanto de color como de turbiedad en la determinación de dosis óptima de cloruro férrico.

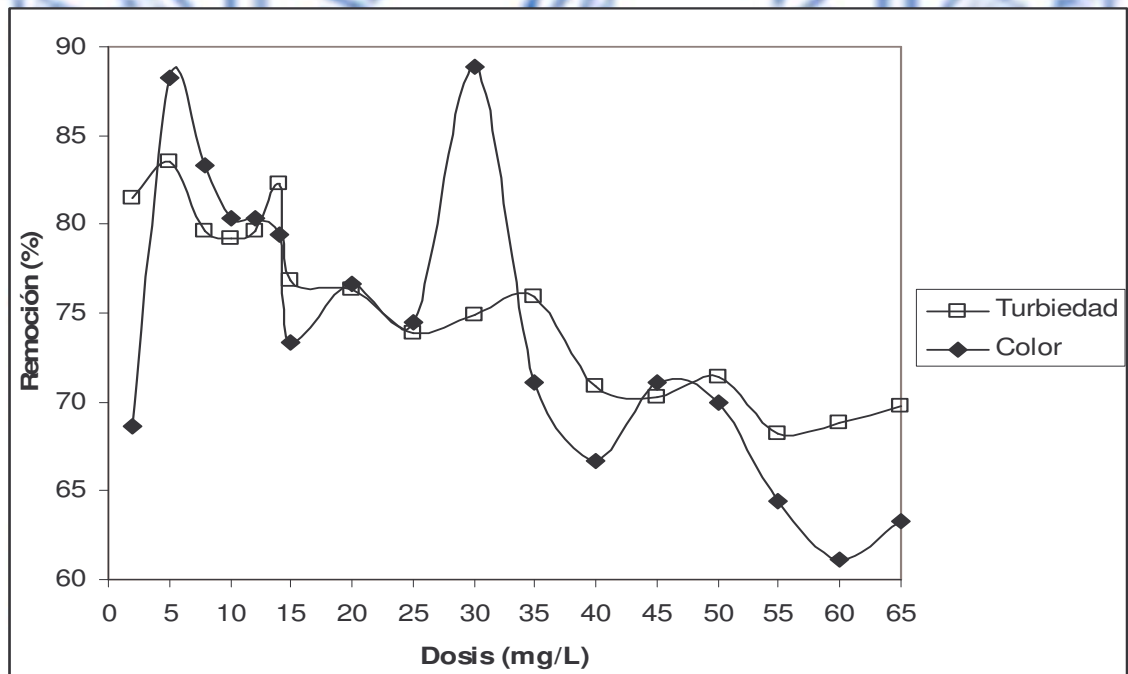


Figura 7.1. Eficiencias de remoción de color y turbiedad, obtenidas en la determinación de la dosis óptima de Cloruro Férrico.

Según lo observado en la figura 7.1 y el anexo E1, se puede determinar que el cloruro férrico presenta el siguiente comportamiento según sus dosis:

a) A dosis menores de 8 mg/L, se presentan buenas eficiencias de remoción de turbiedad y color, siendo la dosis de 5 mg/L en donde se obtienen las mayores eficiencias de remoción de color con un valor de 88.24 % y turbiedad con un 83.54 %.

b) A dosis entre 8 y 15 mg/L empieza a descender sustancialmente la eficiencia de remoción tanto de color como de turbiedad y aparece un color azul tenue. Este color posiblemente aparece por la interacción entre el almidón y el ión cloruro que bajo ciertas condiciones, como pH mayores a 8.0 y a dosis de cloruro mayores a  $5 \times 10^{-4}$  mol/L, se comporta como el ión yoduro, y por lo tanto aparece la coloración azul como en las yodometrías con almidón como indicador. Para corroborar lo anterior se realizó una prueba de laboratorio en la cual se utilizó almidón soluble y se agregaron dosis de  $\text{FeCl}_3$  similares a las que se utilizaron en la presente investigación, en el anexo J se registra las condiciones de la prueba de laboratorio y el número de gotas a las cuales se presenta de forma permanente la coloración azul en la solución.

#### 7.1.1.2 Determinación del gradiente y tiempo de mezcla lenta

La figura 7.2 presenta los resultados obtenidos de las eficiencias de remoción de color y de turbiedad en la determinación del gradiente y tiempo de mezcla lenta óptimos de cloruro férrico.

En la determinación del gradiente y tiempo de mezcla lenta para el cloruro férrico según lo observado en la figura 7.2 y en el anexo E3, se presenta un punto donde se obtienen los mejores resultados de remoción de color con un 87.25 % y una remoción de turbiedad de 79.79 %, dicha configuración corresponde al gradiente



de mezcla lenta de  $35 \text{ s}^{-1}$  y un tiempo de mezcla lenta de 15 minutos, utilizando la dosis óptima de  $5 \text{ mg/L}$ , determinada en la sección 7.1.1.1.

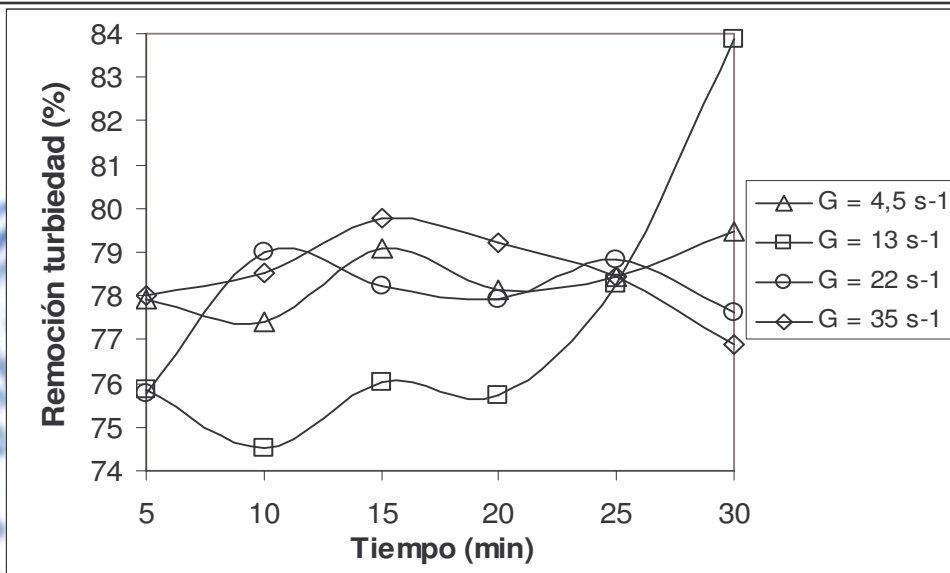


Figura 7.2.1. Eficiencias de remoción de turbiedad según el gradiente y tiempo de floculación.

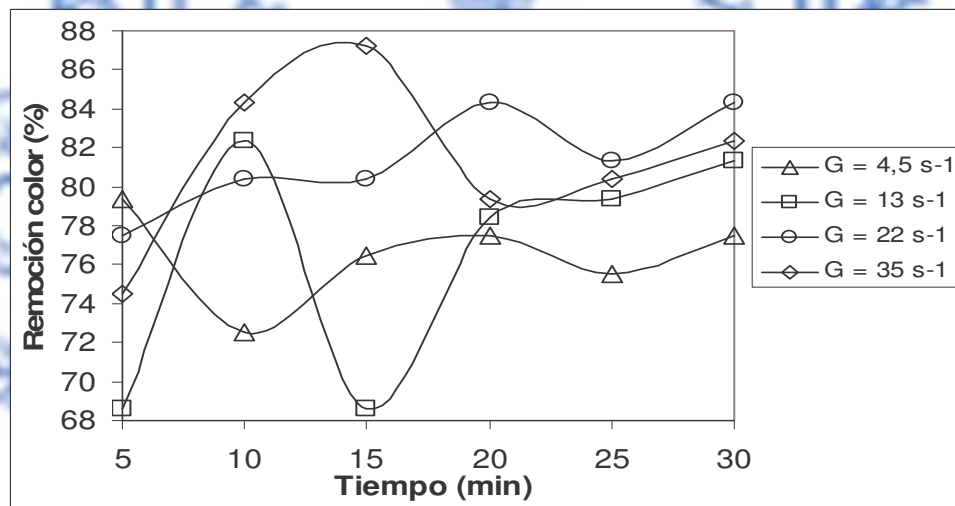


Figura 7.2.2. Eficiencias de remoción de color según el gradiente y tiempo de floculación.

Figura 7.2. Eficiencias de remoción de color y turbiedad, obtenidas en la determinación de gradiente y tiempo de floculación óptimos para el cloruro férrico.

#### 7.4.2.1 Determinación del tiempo de sedimentación

Con los parámetros hallados para el cloruro férrico tales como: dosis óptima, gradiente y tiempo de mezcla lenta, se determina por ultimo el tiempo de sedimentación, la figura 7.3 y el anexo E4 muestran el comportamiento del agua tratada con cloruro férrico según el tiempo de sedimentación.

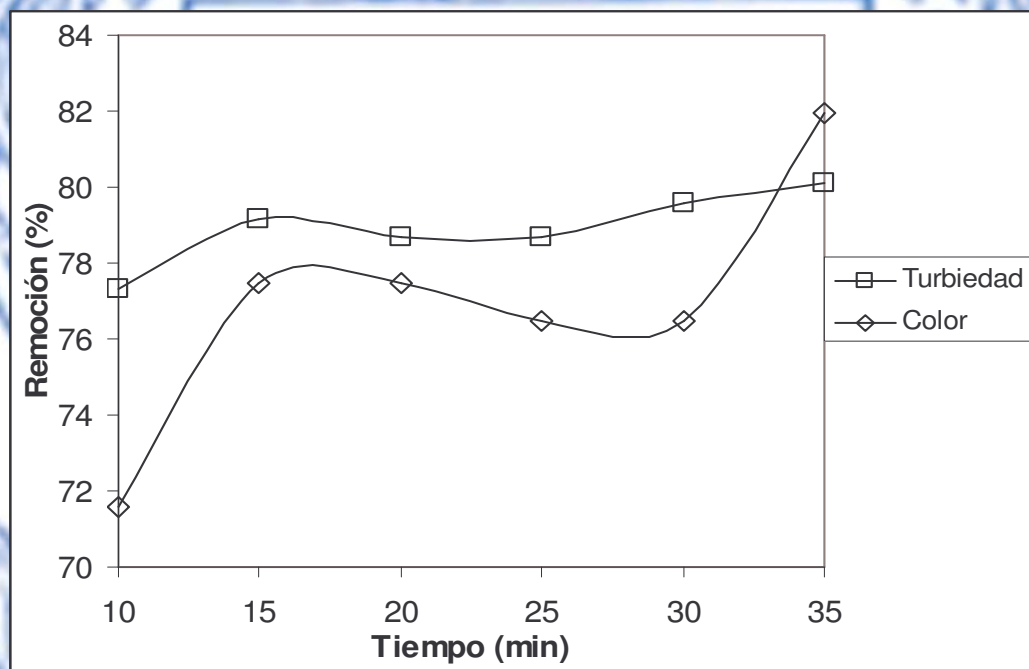


Figura 7.3. Eficiencias de remoción de color y turbiedad, obtenidas en la determinación del tiempo de sedimentación para el cloruro férrico.

Según la figura 7.3, el comportamiento en las eficiencias de remoción tanto de color como de turbiedad en lo que respecta al parámetro de tiempo de sedimentación, presentan el siguiente comportamiento:

- Aunque la mejor eficiencia de remoción de color es 81.96% y de turbiedad es 80.12% se obtuvieron en un tiempo de 35 minutos, se optó por

seleccionar el tiempo de 15 minutos para la sedimentación, el cual presenta una remoción de color de 77.45 % y de turbiedad de 79.17 %; esto debido a que la diferencia en cuanto a las eficiencias de remoción no son muy significativas tanto para color como para turbiedad, dichas diferencias de remoción son de aproximadamente 2 unidades porcentuales, mientras que la diferencia de tiempo entre los puntos de mejores resultados, 15 y 35 minutos, es de 20 minutos.

- b) A mayor tiempo de sedimentación, la eficiencia de remoción tanto de color como de turbiedad mejora sustancialmente, cabe anotar que a mayor tiempo de sedimentación, se presenta una tasa de sedimentación decreciente.

Después de determinar el tiempo de sedimentación, se hace necesario hallar la velocidad de sedimentación y su respectiva velocidad de sedimentación crítica. La figura 7.4 y el anexo E5, presentan los resultados obtenidos de velocidad de sedimentación y fracción remanente de turbiedad.

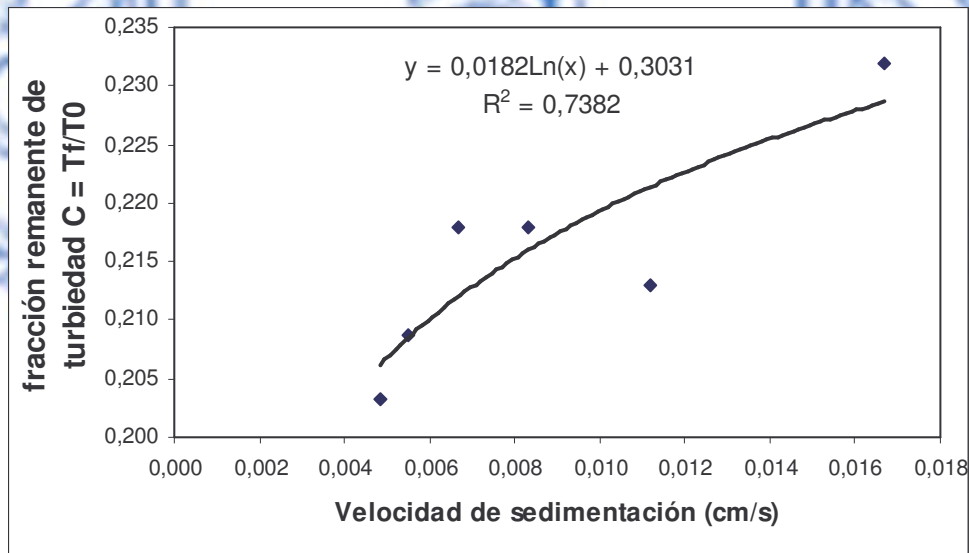


Figura 7.4. Velocidad de sedimentación versus fracción remanente de turbiedad.

La eficiencia de remoción se obtiene mediante la ecuación 7.1.

$$R_T = 1 - (C - C_f) + \frac{\left(\frac{a + V_s}{2}\right)(C - C_f)}{V_s} \quad (7.1)$$

Donde:

$R_T$ : eficiencia remocional.

$C$ : fracción remanente de turbiedad.

$C_f$ : fracción remanente de turbiedad a la menor velocidad de sedimentación.

$a$ : menor velocidad de sedimentación determinada.

$V_s$ : velocidad de sedimentación.

Para aplicar la ecuación 7.1, es necesario seleccionar cargas superficiales que varíen entre 5 y 15  $\text{m}^3/\text{m}^2 \cdot \text{día}$ , y su respectivas equivalencias en  $\text{cm/s}$ ; con la formula de la línea de tendencia presentada en la figura 7.4, se calculan el valor de  $C$  para cada velocidad. Los resultados obtenidos de  $R_T$ ,  $C$  y  $V_s$ , se presentan en el anexo E5 y la figura 7.5.

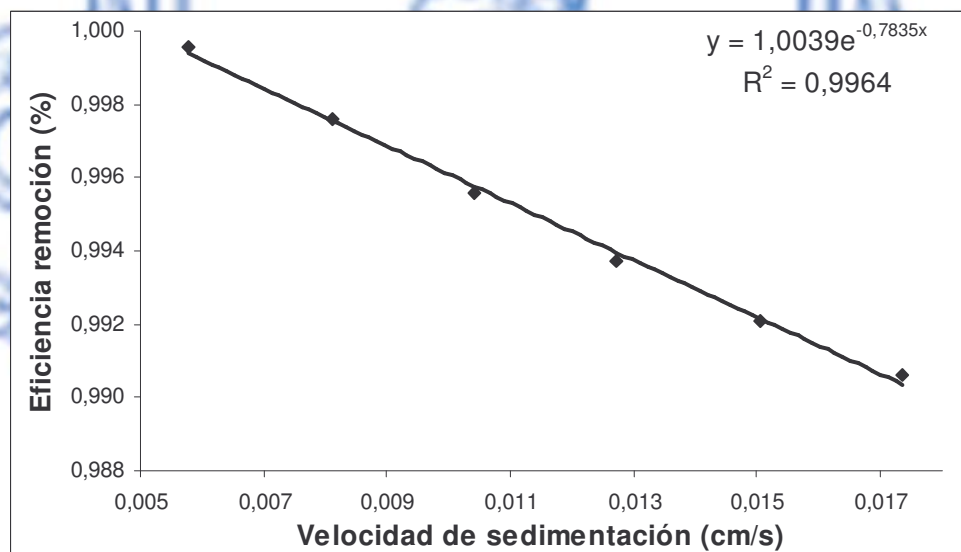


Figura 7.5. Remoción de turbiedad versus velocidad de sedimentación.

Para un porcentaje de remoción de turbiedad deseado, utilizando la ecuación presentada en la figura 7.5, se determina la velocidad de sedimentación, esta velocidad debe dividirse por un factor de seguridad de 1.3 para tener en cuenta el hecho de que el ensayo es efectuado en condiciones ideales.

Para lograr una remoción de turbiedad del 99.5%, se tiene:

$$Y = 1.0039 e^{-0.7835X}$$

Y: Remoción de turbiedad

$$X = (\ln(Y/1.0039)) / -0.7835$$

X: velocidad de sedimentación (cm/s)

$$X = (\ln(0.995/1.0039)) / -0.7835$$

$$X = 0.0113 \text{ cm/s}$$

$$V_{sc} = V_s / 1.3$$

$V_{sc}$ : velocidad de sedimentación crítica

$$V_{sc} = 0.0113 / 1.3$$

$$V_{sc} = 0.0087 \text{ cm/s}$$

#### 7.4.3 Etapa 2. Tratamiento con cloruro férrico

En las pruebas de jarras números 17 a 22 (ver anexo G), se trabajó con cloruro férrico, según lo presentado en la figura 7.6 y el anexo E6, se observa claramente que los resultados obtenidos con este coagulante para el rango de dosis entre 2 y 6 mg/L, presentan las mejores eficiencias de remoción, tanto de turbiedad como de color, para valores de pH comprendidos entre 3,0 y 5,0. Para estos valores de pH se tienen eficiencias de remoción de turbiedad que van desde un 58,50 % hasta 86,56%; y eficiencias de remoción de color desde 40,70% hasta 89,53%.

Para valores de pH inicial mayor que 5.0, se obtuvieron eficiencias de remoción, tanto para color como para turbiedad, muy bajas. Por lo anterior en el siguiente muestreo se procedió a estrechar el rango de pH entre 3.0 y 5.0, cuando se trabaja con cloruro férrico.

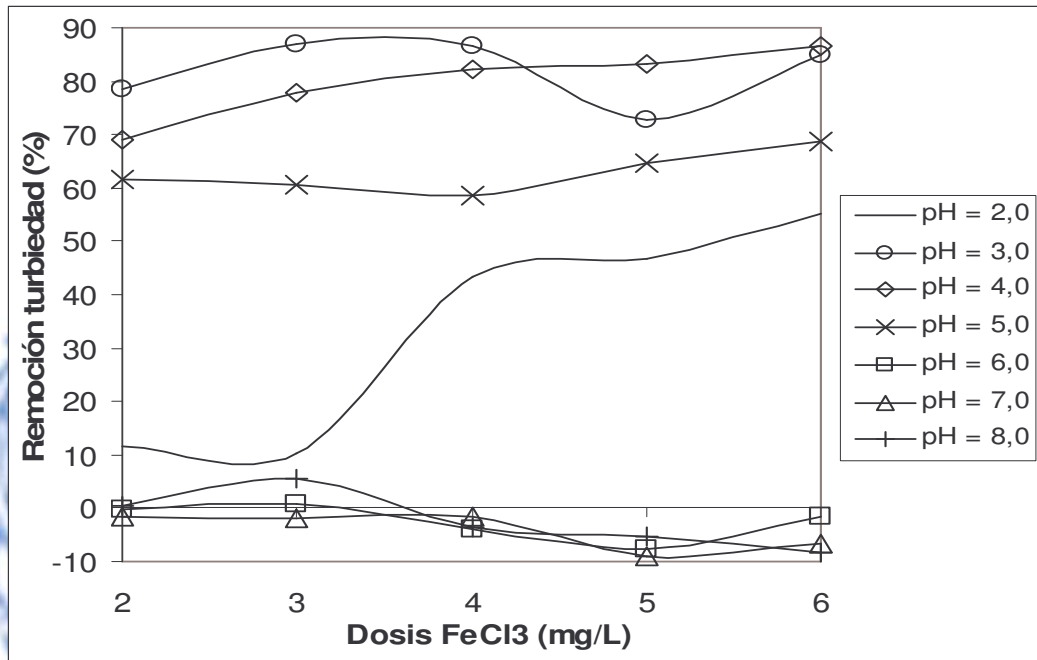


Figura 7.6.1. Eficiencias de remoción de turbiedad a pH fijo y dosis variable.

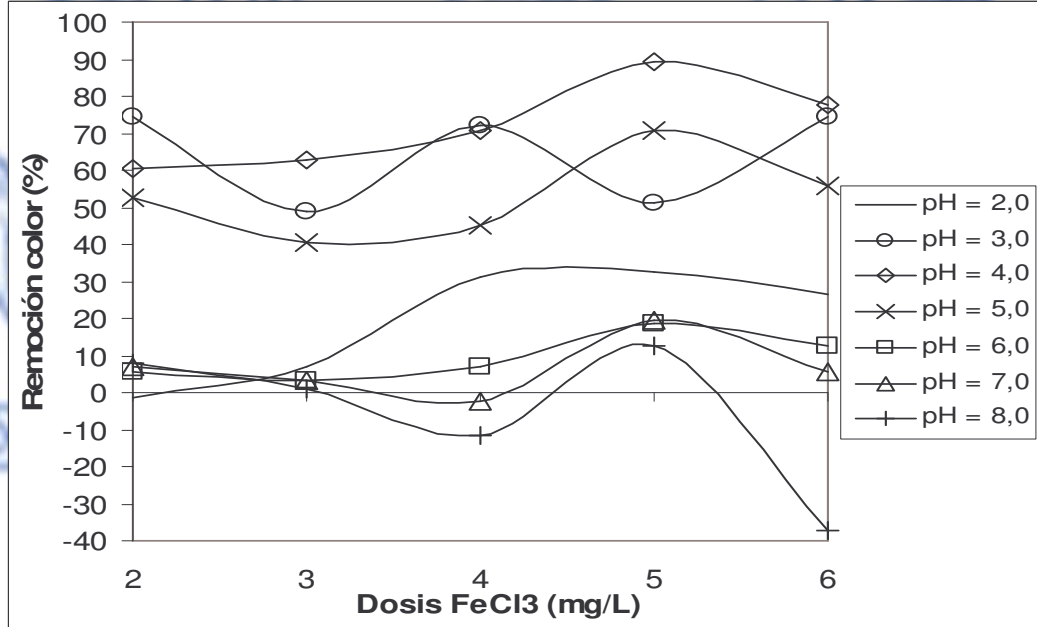


Figura 7.6.2. Eficiencias de remoción de color a pH fijo y dosis variable.

Figura 7.6. Eficiencias de remoción del cloruro férrico, teniendo en cuenta las variables pH y dosis de coagulante, trabajando con un rango amplio de pH.

En las pruebas de jarras 35 a 39, se presentan unos valores para el pH, turbiedad y color inicial atípicos, siendo más elevados de los generalmente se reportaron en las visitas de campo realizadas con anterioridad. Al realizar las pruebas de jarras respectivas se encontraron eficiencias de remoción inferiores a las esperadas, teniendo en cuenta los resultados reportados en las pruebas de jarras realizadas utilizando cloruro férrico, manteniendo los parámetros de tratabilidad ya determinados para este coagulante y estrechando el rango de pH inicial.

Las dosis de coagulante utilizadas varían desde 2 mg/L hasta 7 mg/L, y los valores de pH iniciales utilizados fueron de 2.5, 3.0, 3.5, 4.0, y 4.5.

Después de corroborar los datos, pruebas de jarras números 40 a 44, para lo cual se hizo necesario realizar un muestreo adicional y realizar la respectiva prueba de laboratorio, se observaron que los mejores datos de remoción se presentan con un pH de 2.5 y dosis de 7 mg/L de cloruro férrico, cuya remoción de color es de 80.43% y 67.52% de remoción de turbiedad; por lo tanto, los resultados reportados en las figuras 6.8 y 7.5, y el anexo E7, contienen el promedio de los resultados obtenidos en laboratorio para las pruebas en donde se estrechó el rango de pH inicial utilizando cloruro férrico como coagulante.

Los resultados se pueden observar en la figura 7.7 y el anexo E7, las eficiencias de remoción de turbiedad están alrededor del 25%; solo en la prueba de jarras donde se utilizó un valor de pH de 2.5 se obtuvieron eficiencias considerables que están alrededor del 70 % en turbiedad y entre 75 y 80% para la remoción de color.

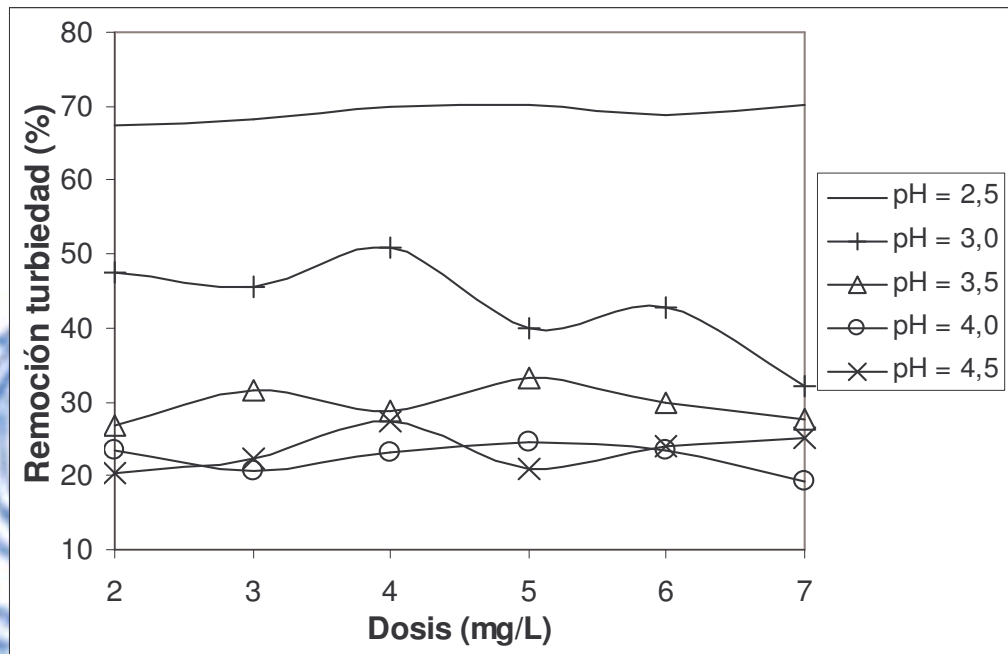


Figura 7.7.1. Eficiencias de remoción de turbiedad a pH fijo y dosis variable.

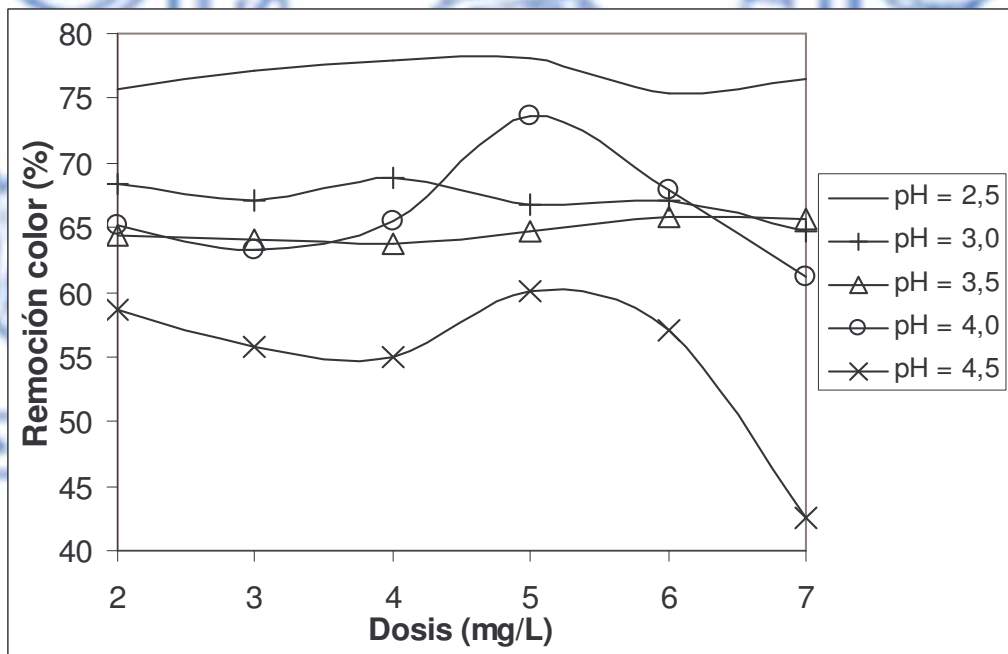


Figura 7.7.2. Eficiencias de remoción de color a pH fijo y dosis variable.

Figura 7.7. Eficiencias de remoción del Cloruro Férrico, teniendo en cuenta las variables pH y dosis de coagulante, estrechando el rango de pH.



#### 7.4.4 Análisis de costos

Teniendo en cuenta que la producción de almidón en la rallería Santa Bárbara es variable y depende de la disponibilidad de yuca, hacer un estimativo de los días laborados es un poco complejo, de esta manera, para efectuar el calculo de costos se utilizan datos promedio, los cuales se presentan en la tabla 7.1; los valores correspondientes a la concentración, densidad y precio del cloruro férrico se encuentran en el anexo B2.

Tabla 7.1. Valores promedio de días y horas laboradas al mes en la rallería Santa Bárbara

Parámetro	Magnitud
Días laborales	20 días/mes
Horas laborales	20 horas/día
Caudal promedio	0.98 L/s

Para la dosis óptima de 5 mg/L de cloruro férrico se tiene:

$$\text{Peso FeCl}_3 = 5 \text{ mg/L} * 0.98 \text{ L/s} * 3600 \text{ s/hora} * 20 \text{ hora/día} * 20 \text{ día/mes} * (1\text{g}/1000\text{mg}) * (1\text{Kg}/420\text{g})$$

$$\text{Peso FeCl}_3 = \mathbf{16.8 \text{ Kg/mes FeCl}_3}$$

$$\text{Costo mensual} = 16.8 \text{ Kg/mes} * 414 \text{ pesos/Kg}$$

$$\text{Costo mensual} = \mathbf{6955.2 \text{ pesos/mes}}$$

Según el costo calculado de 6955.2 pesos por mes, se observa la viabilidad desde el punto de vista financiero que presenta el cloruro férrico en la implementación a escala piloto de un sistema de tratamiento por coagulación química en la rallería Santa Bárbara debido a su bajo costo.

## 7.2 ESTUDIO DE TRATABILIDAD UTILIZANDO HIDROXICLORURO DE ALUMINIO COMO COAGULANTE.

### 7.2.1 Etapa 1. Parámetros de tratabilidad

#### 7.2.1.1 Determinación de dosis óptima

En la figura 7.8, se presentan las eficiencias de remoción de color y turbiedad obtenidas en la determinación de dosis óptima de hidroxiclорuro de aluminio.

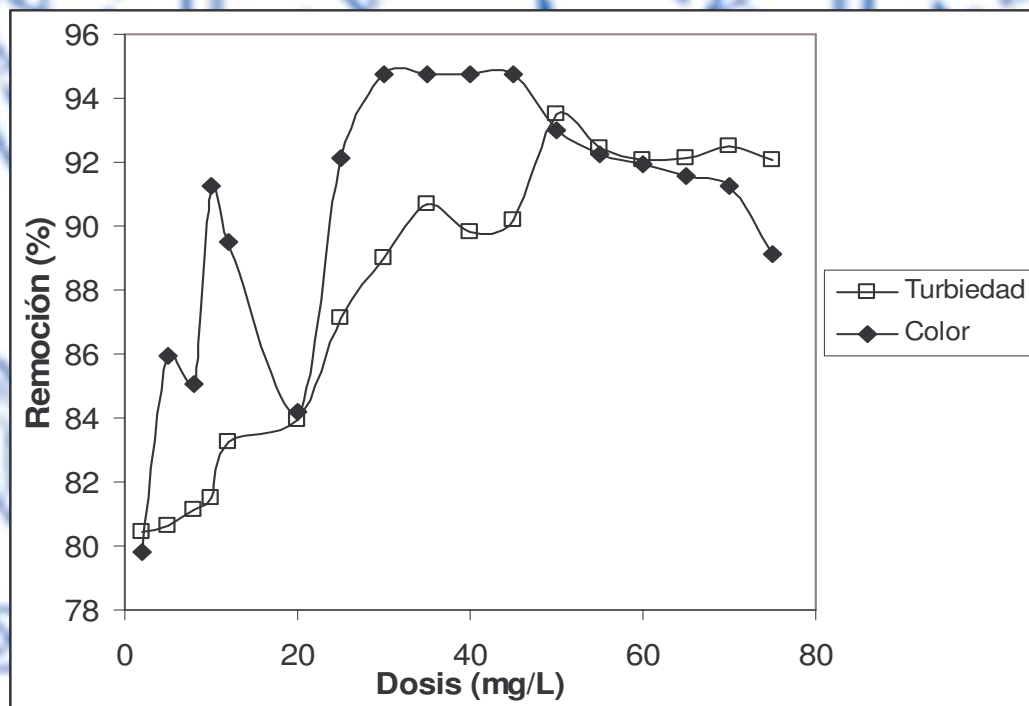


Figura 7.8. Eficiencias de remoción de color y turbiedad, obtenidas en la determinación de dosis óptima de hidroxiclорuro de aluminio.

Según la figura 7.8 y el anexo F1, el hidroxiclорuro de aluminio (PAC) presenta un comportamiento más complejo que el observado con el cloruro férrico, ya que no

necesariamente se obtienen las mejores eficiencias tanto de color como de turbiedad a una dosis óptima. El comportamiento del PAC se presenta a continuación:

- a) Para dosis entre 2 y 15 mg/L, se presentan remociones de turbiedad alrededor del 80 % y remoción de color que varía entre 80 y 90 %.
- b) Cuando las dosis se encuentran entre 20 y 45 mg/L de PAC, se presenta la máxima remoción de color (94.74 %) y aumenta ligeramente la eficiencia de remoción de turbiedad, la cual varía entre 90 y 93 %.
- c) A dosis de PAC mayores de 45 mg/L, se obtienen remociones de turbiedad que varían entre 92 y 93.5 %, mientras que las remociones de color son un poco inferiores a las presentadas con dosis entre 20 y 45 mg /L.

En la determinación de dosis óptima, se eligió la dosis de 50 mg/L de PAC, ya que presenta la mayor eficiencia en la remoción de turbiedad (93.47 %) y la remoción de color (92.98 %) es una de las mejores.

#### 7.2.1.2 Determinación del gradiente y tiempo de mezcla lenta

En la determinación del gradiente y tiempo de mezcla lenta para el PAC, según la figura 7.9 y el anexo F3, se presenta un punto donde se obtienen los mejores resultados de remoción tanto de color como de turbiedad, dicha configuración corresponde a un gradiente de mezcla lenta de  $4.5 \text{ s}^{-1}$  y tiempo de mezcla lenta de 20 minutos, para los cuales se obtuvieron eficiencias de remoción de 95.64% correspondiente a turbiedad y 95.79% de color.

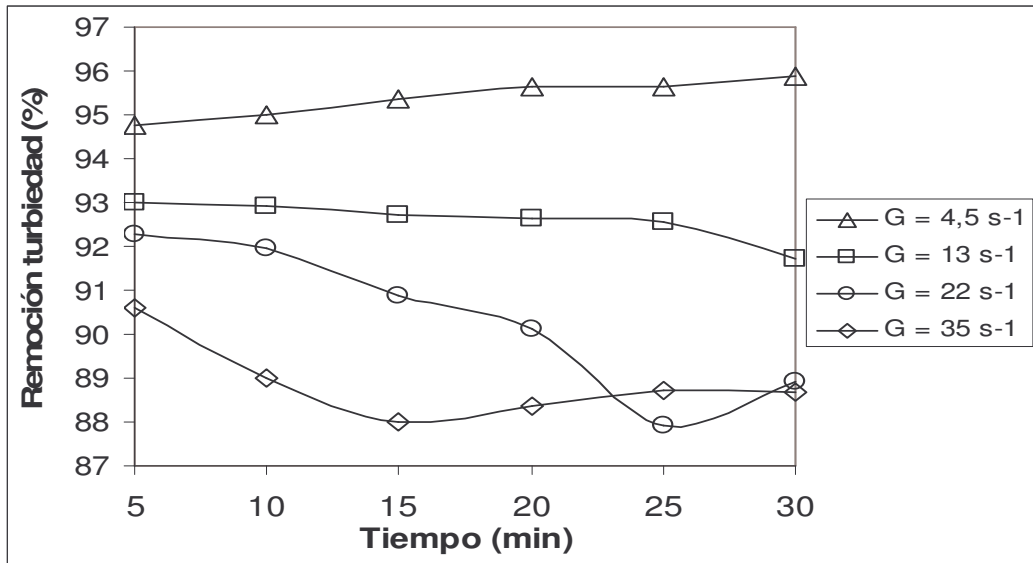


Figura 7.9.1. Eficiencias de remoción de turbiedad según el gradiente y tiempo de floculación utilizando hidroxicloriguro de aluminio.

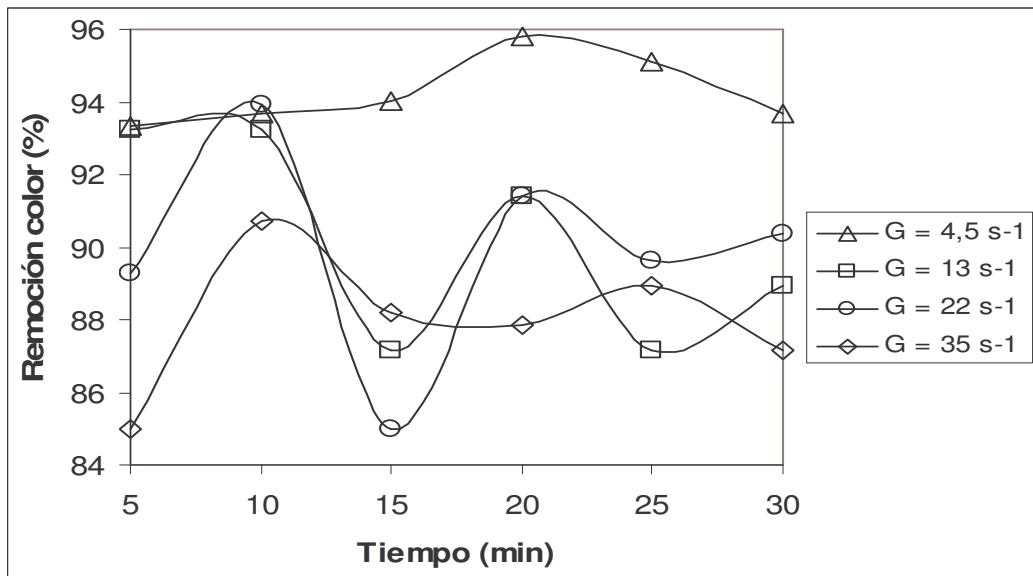


Figura 7.9.2. Eficiencias de remoción de color según el gradiente y tiempo de floculación utilizando hidroxicloriguro de aluminio.

Figura 7.9. Eficiencias de remoción de color y turbiedad, obtenidas en la determinación de gradiente y tiempo de floculación para el hidroxicloriguro de aluminio.

### 7.2.1.3 Determinación del tiempo de sedimentación

Aunque los mejores resultados de remoción tanto de color como de turbiedad se obtuvieron para el tiempo de sedimentación de 35 minutos, como se observa en la figura 7.10 y el anexo F4, se optó por un tiempo de sedimentación de 25 minutos, ya que desde allí se empieza a acotar la curva, presentándose una disminución en la tasa de sedimentación, además, en este punto las eficiencias de remoción tanto de turbiedad como del color son muy similares y se encuentran alrededor del 95%.

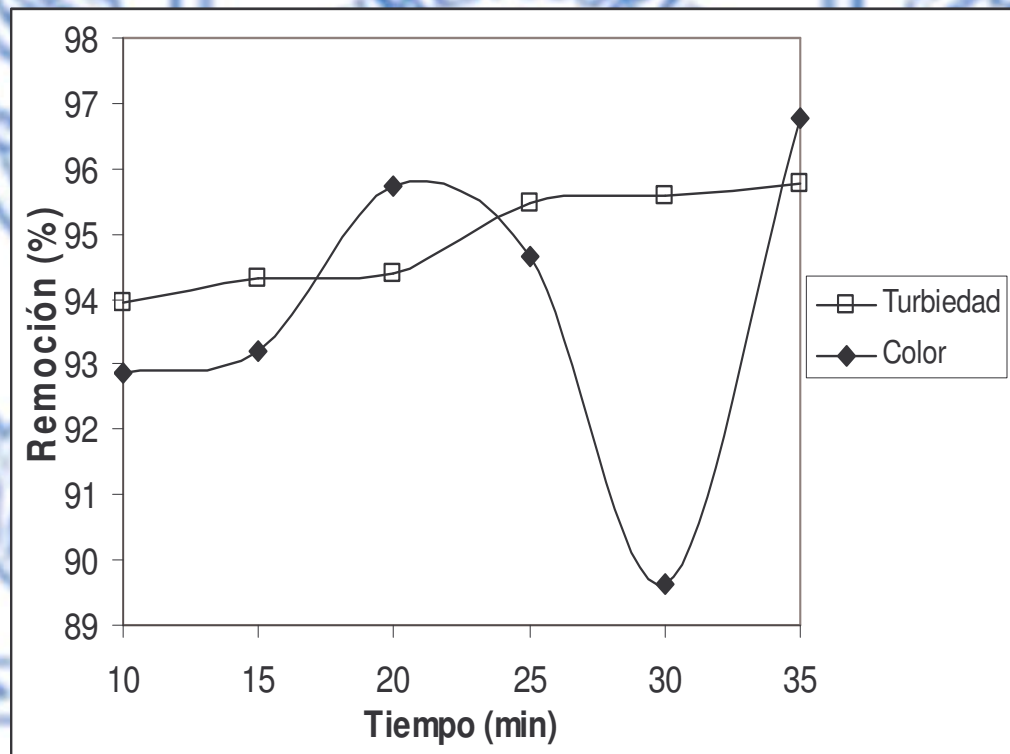


Figura 7.10. Eficiencias de remoción de color y turbiedad, obtenidas en la determinación del tiempo de sedimentación para el hidroxiclورو de aluminio.

Después de determinar el tiempo de sedimentación, se hace necesario hallar la velocidad de sedimentación y su respectiva velocidad de sedimentación crítica. La

figura 7.11 y el anexo F5, presentan los resultados obtenidos de velocidad de sedimentación y fracción remanente de turbiedad.

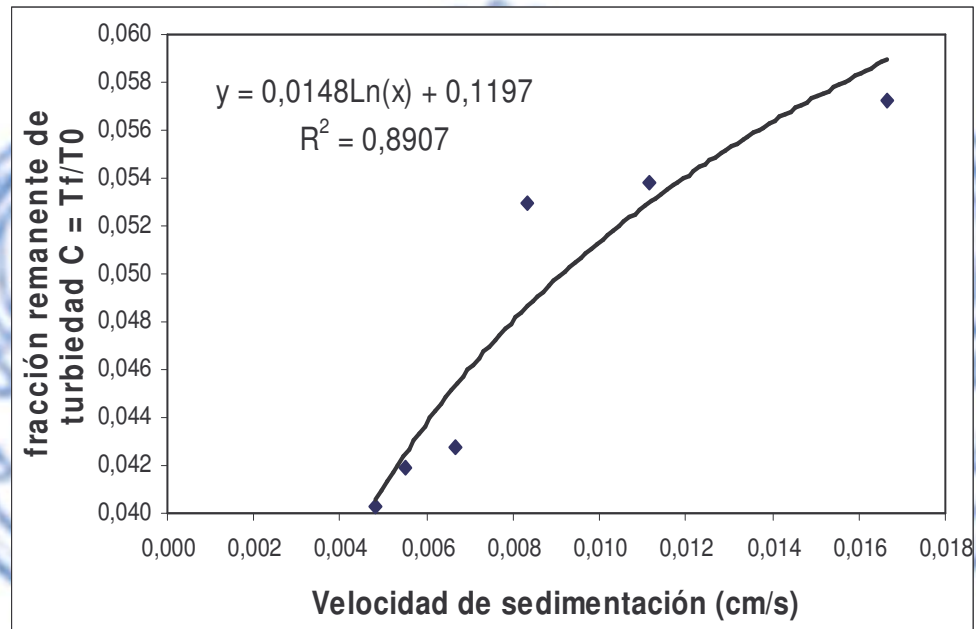


Figura 7.11. Velocidad de sedimentación versus fracción remanente de turbiedad.

Al igual que el cloruro férrico, la eficiencia remocional para el hidroxiclورو de aluminio se obtiene mediante la ecuación 7.1 (numeral 7.1.1.3), seleccionando cargas superficiales que varíen entre 5 y 15 m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>\*día, y su respectivas equivalencias en cm/s; con la fórmula de la línea de tendencia presentada en la figura 7.11, se calculan el valor de C para cada velocidad. Los resultados obtenidos de R<sub>T</sub>, C y V<sub>s</sub>, se presentan en el anexo F5 y la figura 7.12.

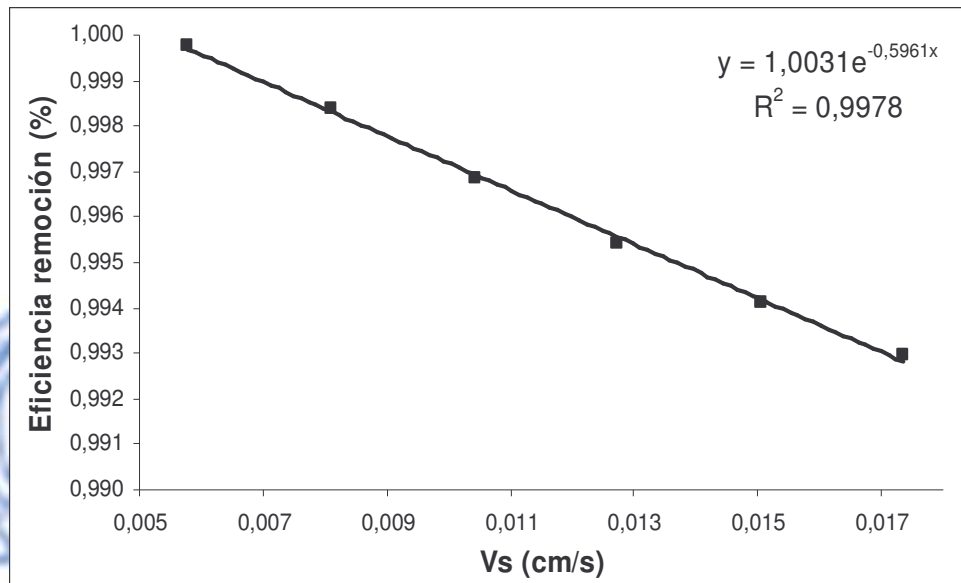


Figura 7.12. Remoción de turbiedad versus velocidad de sedimentación.

Para un porcentaje de remoción de turbiedad deseado, utilizando la ecuación presentada en la figura 7.12, se determina la velocidad de sedimentación, esta velocidad debe dividirse por un factor de seguridad de 1.3 para tener en cuenta el hecho de que el ensayo es efectuado en condiciones ideales.

Para lograr una remoción de turbiedad del 99.5%, se tiene:

$$Y = 1.0031 e^{-0.5961X}$$

Y: Remoción de turbiedad

$$X = (\ln(Y/1.0031)) / -0.5961$$

X: velocidad de sedimentación (cm/s)

$$X = (\ln(0.995/1.0031)) / -0.5961$$

$$X = 0.0136 \text{ cm/s}$$

$$V_{sc} = V_s / 1.3$$

$V_{sc}$ : velocidad de sedimentación crítica

$$V_{sc} = 0.0136 / 1.3$$

$$V_{sc} = 0.0104 \text{ cm/s}$$

### 7.2.2 Etapa 3. Tratamiento con hidroxiclورو de aluminio

En las pruebas de jarras 23 a 28, se trabajó con hidroxiclورو de aluminio (PAC); como se muestra en la figura 7.13 y el anexo F6, se puede observar claramente que los resultados obtenidos para el intervalo de dosis entre 40 y 80 mg/L, se presentan las mejores eficiencias de remoción, tanto de turbiedad como de color, para valores de pH inicial comprendidos entre 3.0 y 4.5. Para este rango de pH se obtienen eficiencias de remoción de turbiedad que van desde 80.78 % hasta 96.40 %; y eficiencias de remoción de color desde 62.50 % hasta 99.62 %.

Para valores de pH inicial mayores a 5.0, se obtuvieron eficiencias de remoción, tanto para color como para turbiedad entre el 10 y 80%, que son menores a las eficiencias de remoción obtenidas a pH inferiores. Por lo anterior en la segunda etapa se procedió a estrechar el rango de pH inicial entre 3.0 y 5.0, cuando se trabaja con PAC con dosis comprendidas entre 45 mg/L a 70 mg/L.

Estrechando el rango de pH inicial, según lo presentado en la figura 7.14 y el anexo F7, las mejores eficiencias de remoción, tanto para color como para turbiedad, se obtuvieron para las dosis de coagulante de 60 mg/L, 65 mg/L y 70 mg/L, y para los valores de pH inicial de 4.0 y 4.5.

Las eficiencias de remoción estrechando el rango de pH inicial, se encuentran entre 91 % y 98 % tanto para turbiedad como para color.



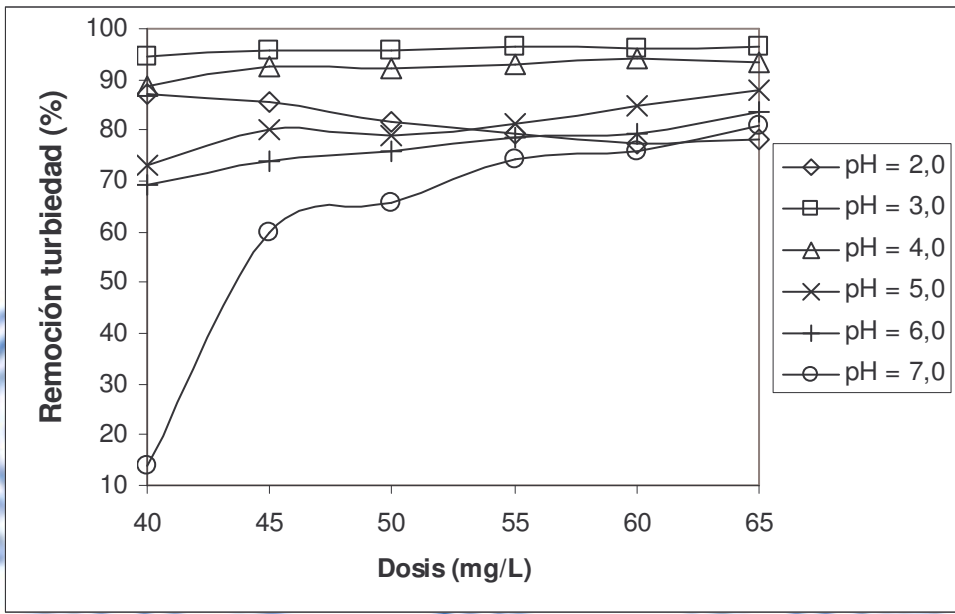


Figura 7.13.1. Eficiencias de remoción de turbiedad a pH fijo y dosis variable.

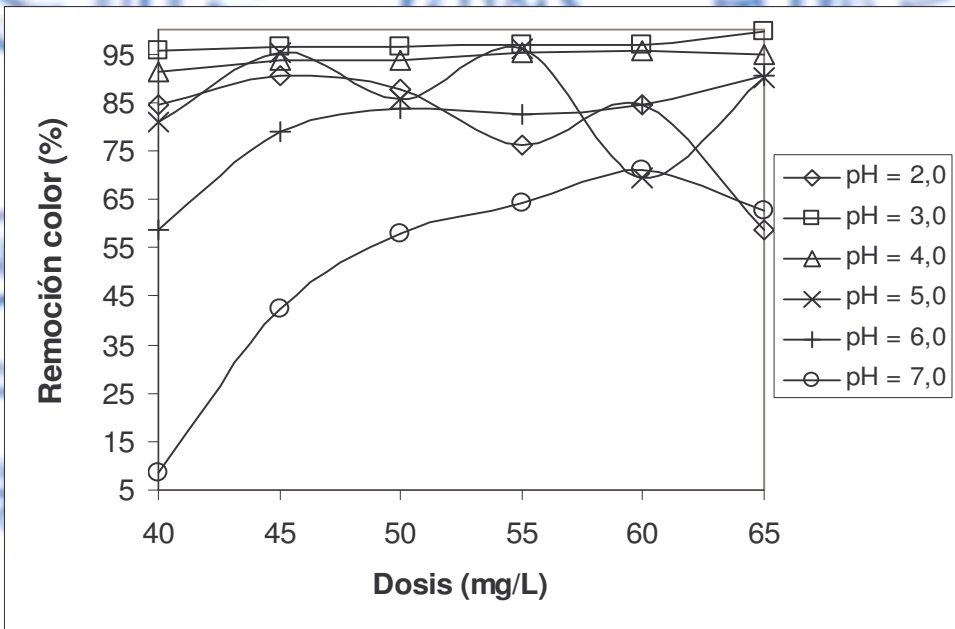


Figura 7.13.2. Eficiencias de remoción de color a pH fijo y dosis variable.

Figura 7.13. Eficiencias de remoción del hidroxicloriguro de aluminio, teniendo en cuenta las variables pH y dosis de coagulante, trabajando con un rango amplio de pH inicial.

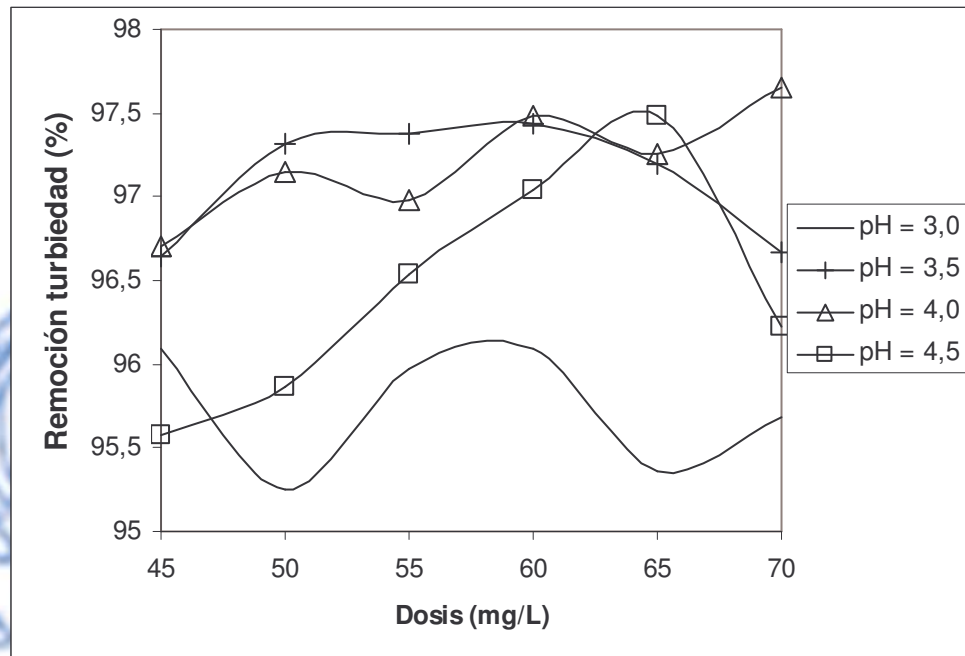


Figura 7.14.1. Eficiencias de remoción de turbiedad a pH fijo y dosis variable.

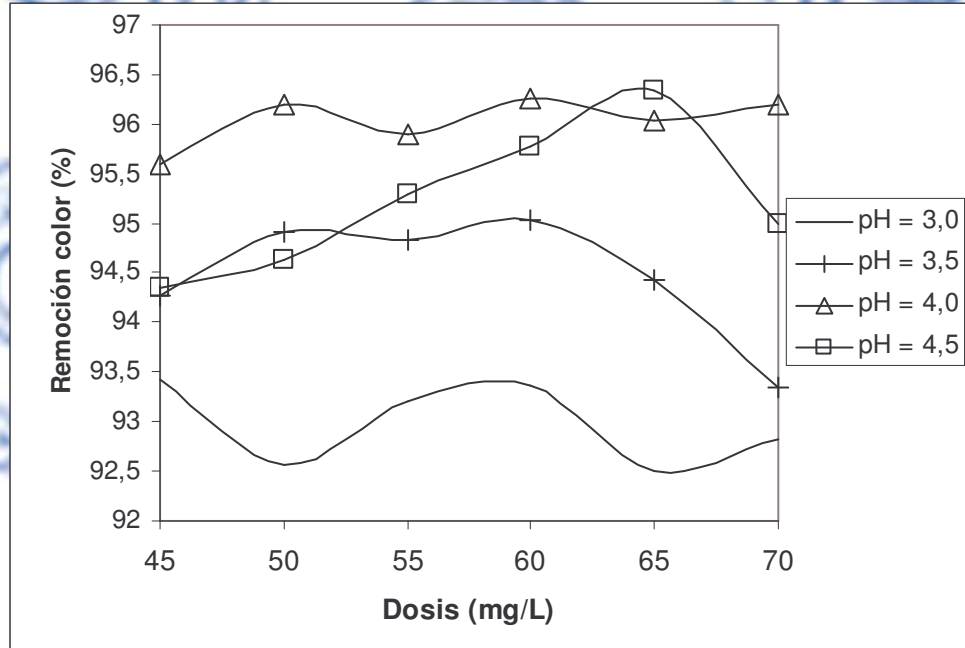


Figura 7.14.2. Eficiencias de remoción de color a pH fijo y dosis variable.

Figura 7.14. Eficiencias de remoción del hidroxicloriguro de aluminio, teniendo en cuenta las variables pH y dosis de coagulante, estrechando el rango de pH inicial.

### 7.2.3 Análisis de costos

Utilizando los datos promedio de los días laborados en la rallería Santa Bárbara que se presentaron en la tabla 7.1 y los valores correspondientes a la concentración, densidad y precio del hidroxiclورو de aluminio que se presentan en el anexo B1, se calcula el costo mensual del tratamiento de la siguiente manera:

Para la dosis óptima de 50 mg/L se tiene:

$$\text{Peso PAC} = 50 \text{ mg/L} * 0.98 \text{ L/s} * 3600 \text{ s/hora} * 20 \text{ hora/día} * 20 \text{ día/mes} * (1\text{g}/1000\text{mg}) * (1\text{Kg}/120\text{g})$$

$$\text{Peso PAC} = \mathbf{588 \text{ Kg/mes PAC}}$$

$$\text{Costo mensual} = 588 \text{ Kg/mes} * 850 \text{ pesos/Kg}$$

$$\text{Costo mensual} = \mathbf{499800 \text{ pesos/mes}}$$

Según el costo calculado de 499800 pesos por mes, desde el punto de vista financiero, se observa que el hidroxiclورو de aluminio no es viable en la implementación a escala piloto de un sistema de tratamiento por coagulación química en la rallería Santa Bárbara debido a su alto costo. Si el propietario de la rallería tiene las condiciones económicas para implementar el hidroxiclورو de aluminio para el tratamiento por coagulación química del agua residual a escala piloto, se aconseja utilizarlo debido a las eficiencias de remoción que este coagulante presenta en lo concerniente a los parámetros de evaluación de calidad de aguas utilizado en la presente investigación.

### 7.3 DIAGRAMAS DE COAGULACIÓN

El diagrama de coagulación obtenido para el parámetro de color utilizando cloruro férrico como coagulante (ver figura 7.15), muestra una región cuya eficiencia de remoción es de alrededor del 70 %, dicha región se encuentra en el intervalo de pH comprendido entre 2.5 y 3.0, para las dosis comprendidas entre 2 y 7 mg/L.

Según la figura 7.15, otra región donde se presenta una remoción aceptable de color es la comprendida en el rango de pH de 3.0 y 4.0, para las dosis estudiadas; su eficiencia de remoción de color varía entre 60 y 70 %. Para valores de pH menores a 2.5 y los mayores a 4.0, las eficiencias de remoción de color caen bruscamente hasta el punto de obtener eficiencias negativas.

Teniendo en cuenta el parámetro de turbiedad, en el diagrama de coagulación obtenido utilizando cloruro férrico como coagulante (ver figura 7.16), se muestra una región de máxima eficiencia de remoción alrededor del 70 %, dicha región se presenta en un pH de 2.5 y dosis comprendidas entre 4 y 5 mg/L. Otra región donde se presenta una remoción de turbiedad entre el 60 y el 70 %, es la comprendida en el rango de pH de entre 2.5 y 3.0, para unas dosis de coagulante que varían entre 2 y 7 mg/L; se presenta una tercera región claramente definida, con eficiencias de remoción cercanas al 50 %, esta región se presenta a un pH alrededor de 4.0 y dosis entre 3.5 y 6.5 mg/L de coagulante.

Los números asignados a cada una de las líneas presentes en los diferentes diagramas de coagulación corresponden a la eficiencia de remoción para los parámetros de calidad de agua (color y turbiedad), para los cuales se realizaron estos diagramas.

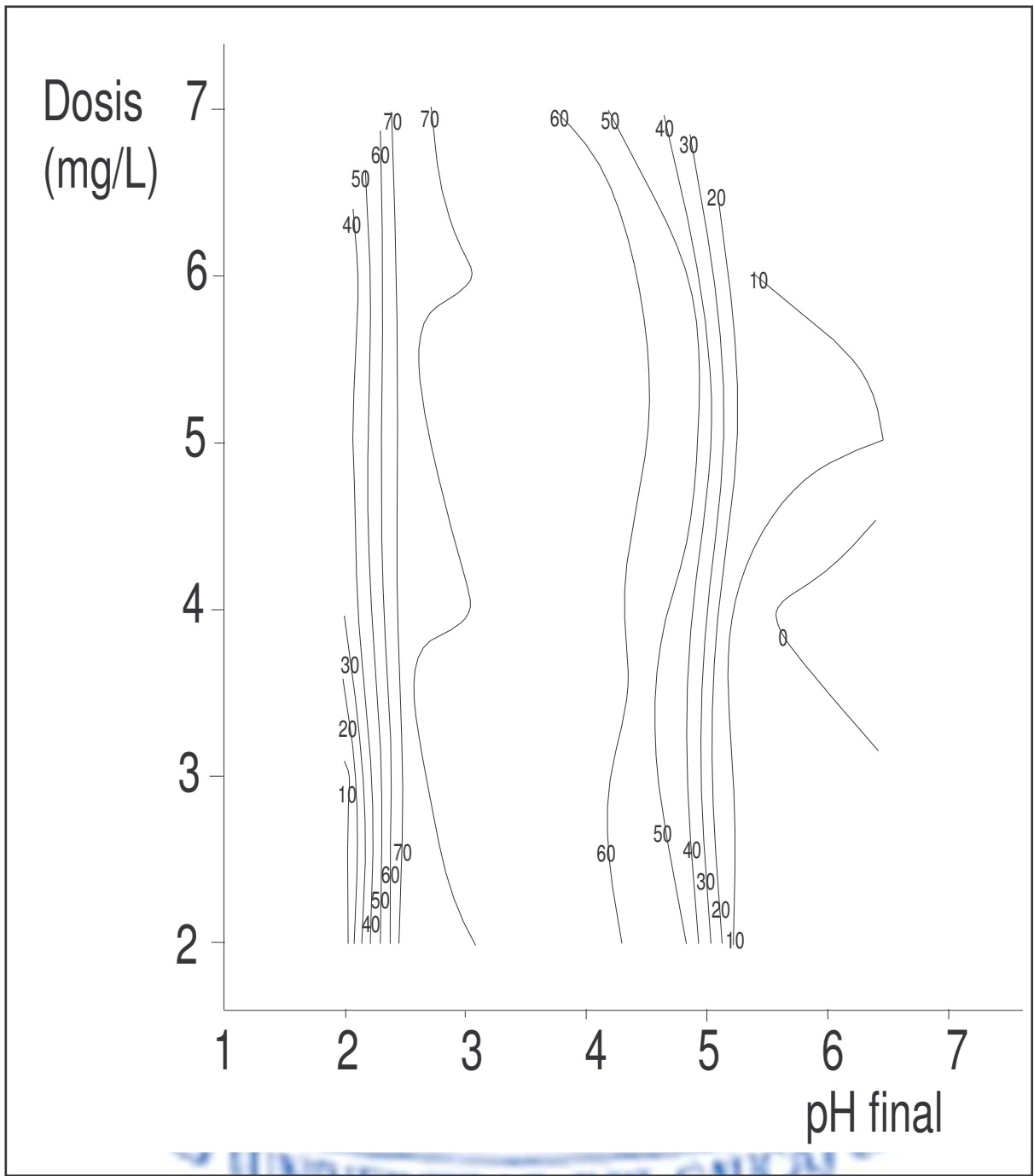


Figura 7.15. Diagrama de coagulación de color, utilizando cloruro férrico.

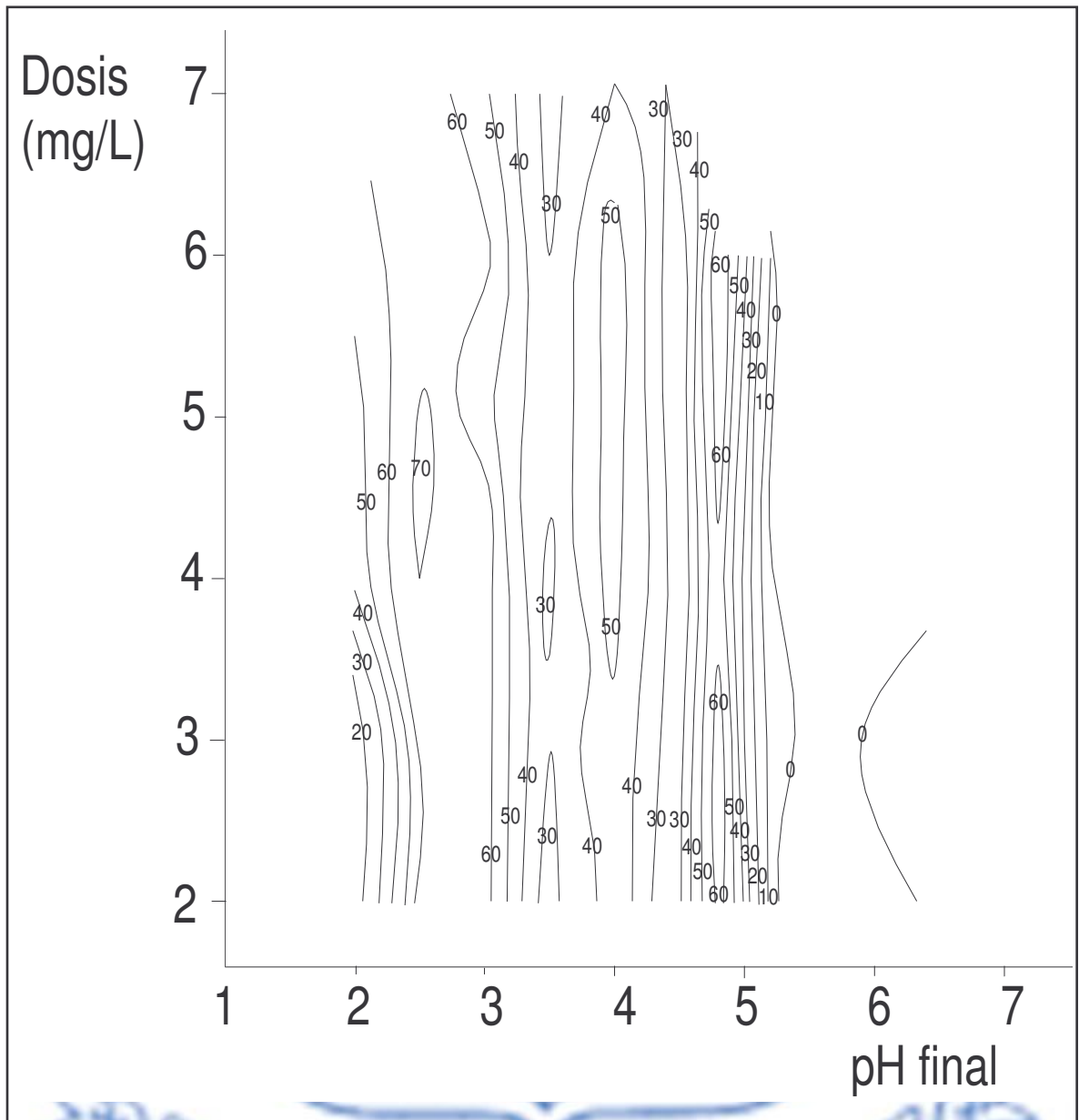
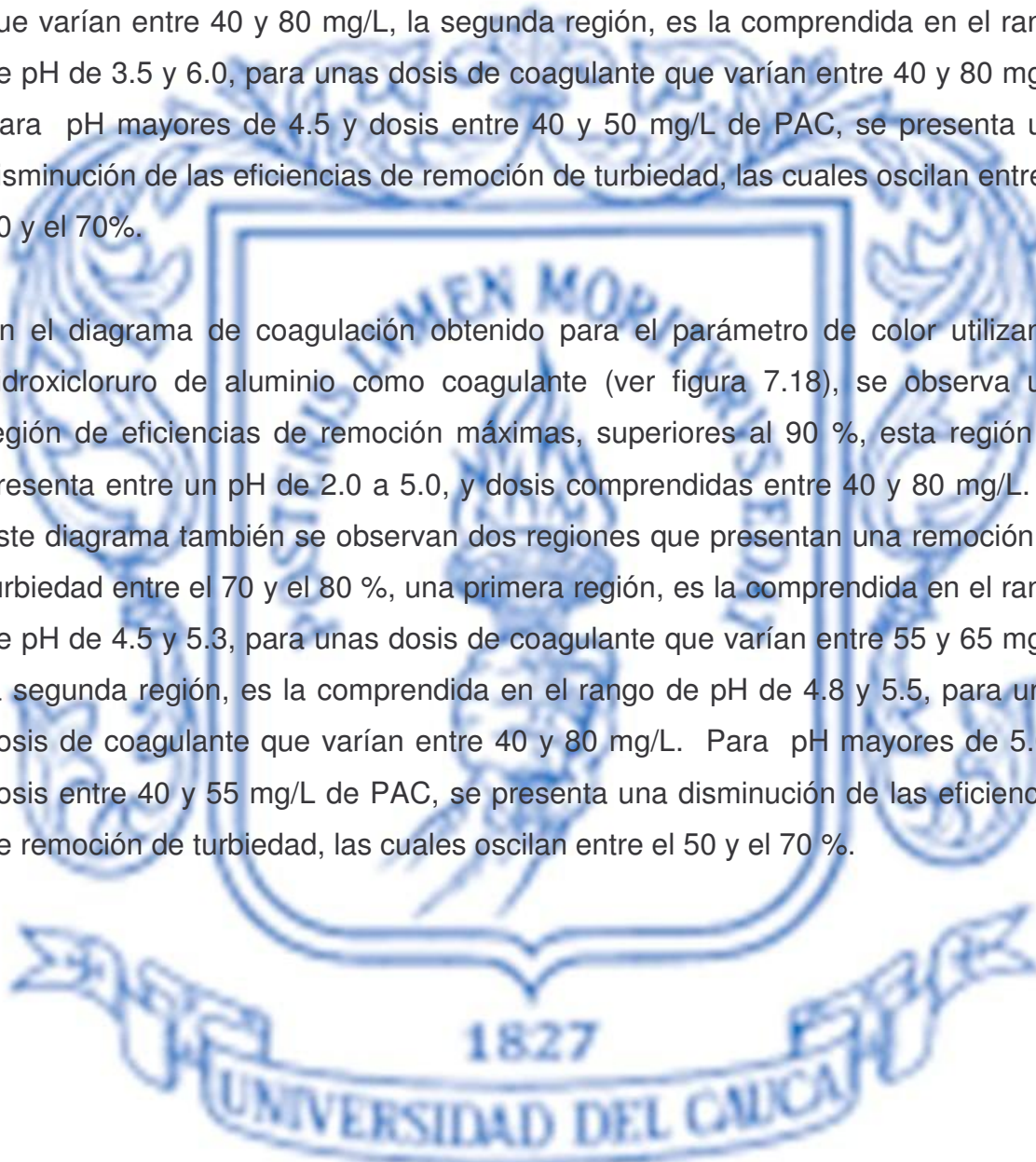


Figura 7.16. Diagrama de coagulación de turbiedad, utilizando cloruro férrico.

Para el parámetro de turbiedad, en el diagrama de coagulación obtenido utilizando hidroxiclорuro de aluminio como coagulante (ver figura 7.17), se observa una región de eficiencias de remoción máximas, superiores al 90 %, esta región se presenta entre un pH de 2.5 a 4.5, y dosis comprendidas entre 40 y 80 mg/L. En

este diagrama se observan dos regiones que presentan una remoción de turbiedad entre el 80 y el 90 %, una primera región, aunque no muy bien definida, es la comprendida en el rango de pH de 2.0 y 2.5, para unas dosis de coagulante que varían entre 40 y 80 mg/L, la segunda región, es la comprendida en el rango de pH de 3.5 y 6.0, para unas dosis de coagulante que varían entre 40 y 80 mg/L. Para pH mayores de 4.5 y dosis entre 40 y 50 mg/L de PAC, se presenta una disminución de las eficiencias de remoción de turbiedad, las cuales oscilan entre el 60 y el 70%.

En el diagrama de coagulación obtenido para el parámetro de color utilizando hidroxiclورو de aluminio como coagulante (ver figura 7.18), se observa una región de eficiencias de remoción máximas, superiores al 90 %, esta región se presenta entre un pH de 2.0 a 5.0, y dosis comprendidas entre 40 y 80 mg/L. En este diagrama también se observan dos regiones que presentan una remoción de turbiedad entre el 70 y el 80 %, una primera región, es la comprendida en el rango de pH de 4.5 y 5.3, para unas dosis de coagulante que varían entre 55 y 65 mg/L, la segunda región, es la comprendida en el rango de pH de 4.8 y 5.5, para unas dosis de coagulante que varían entre 40 y 80 mg/L. Para pH mayores de 5.0 y dosis entre 40 y 55 mg/L de PAC, se presenta una disminución de las eficiencias de remoción de turbiedad, las cuales oscilan entre el 50 y el 70 %.



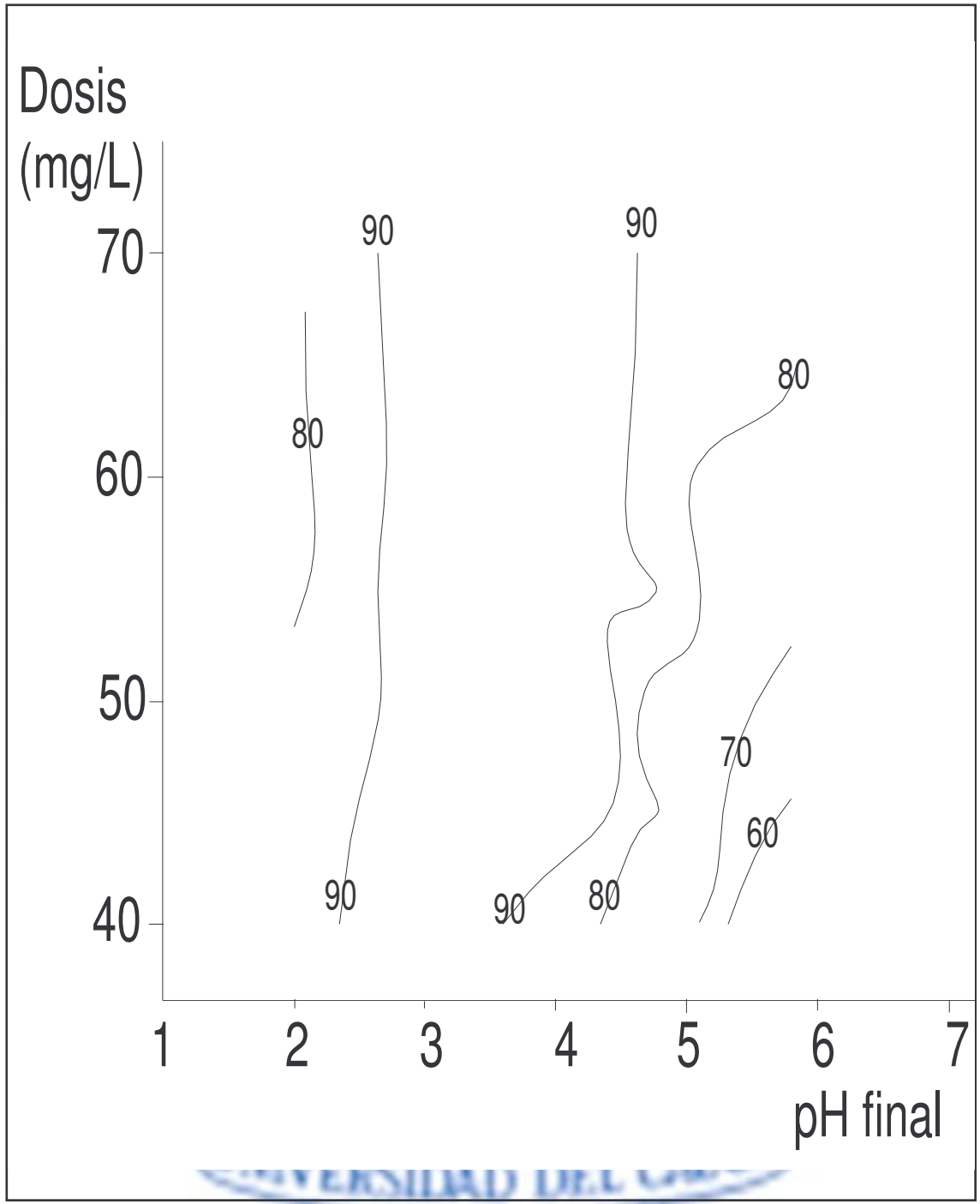


Figura 7.17. Diagrama de coagulación de turbiedad, utilizando PAC.



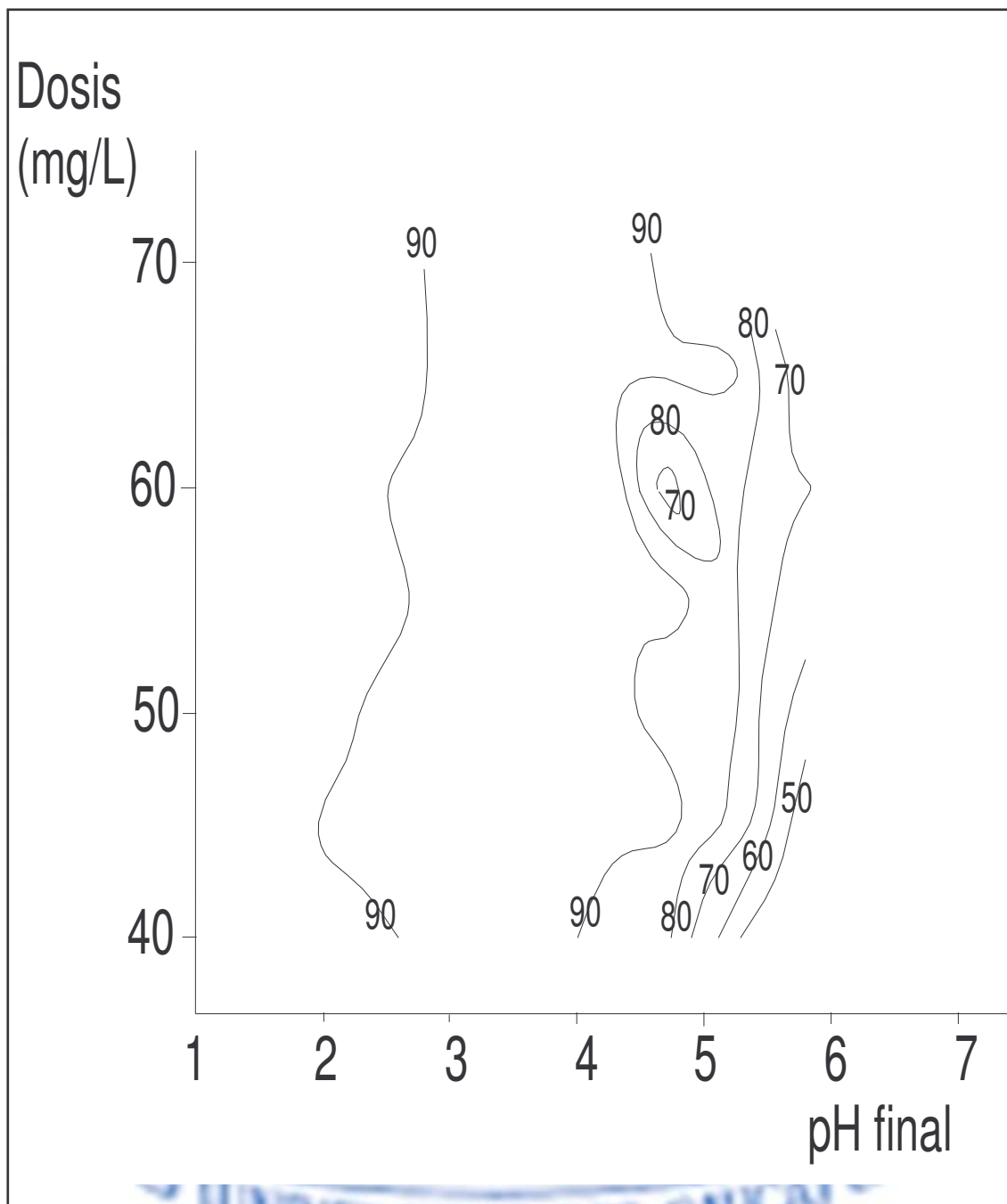


Figura 7.18. Diagrama de coagulación de color, utilizando PAC.

## 7.4 ANALISIS COMPARATIVO

### 7.4.1 Análisis comparativo entre coagulantes

La tabla 7.2, presenta un consolidado de los resultados obtenidos en el estudio realizado con cloruro férrico e hidroxicloriguro de aluminio. La tabla 7.2 consta de dos partes, la primera, donde se presentan los parámetros de tratabilidad óptimos para cada uno de los coagulantes; en la segunda parte, se reportan las mejores eficiencias de remoción para cada uno de los parámetros de calidad de aguas tenidos en cuenta en esta investigación, así como la dosis de coagulante y pH inicial de la muestra de agua residual.

Tabla 7.2. Consolidado FeCl<sub>3</sub> y PAC

<b>PARAMETRO DE TRATABILIDAD</b>	<b>FeCl<sub>3</sub></b>	<b>PAC</b>
Dosis óptima	5 mg/L	50 mg/L
Gradiente de mezcla lenta	35 s <sup>-1</sup>	4.5 s <sup>-1</sup>
Tiempo de mezcla lenta	15 minutos	20 minutos
Tiempo de sedimentación	15 minutos	25 minutos
Velocidad sedimentación	0.011 cm/s	0.007 cm/s
Velocidad sedimentación crítica	0.0087 cm/s	0.0104 cm/s
Peso mensual	16.8 Kg	588 Kg
Costo mensual	6955.2 pesos	499800 pesos

Continuación tabla 7.2.

ESTUDIO DE COAGULACIÓN	FeCl <sub>3</sub>			PAC		
	%	Dosis (mg/L)	pH inicial	%	Dosis (mg/L)	pH inicial
Remoción turbiedad (rango amplio pH)	87,11	3	3,0	97,71	70	4,0
Remoción color (rango amplio pH)	89,53	5	4,0	99,62	65	3,0
Remoción color (rango estrecho pH)	78,09	5	2,5	96,34	65	4,5
Remoción DQO	29.62	4	4.0	48.70	70	3.5
Remoción DBO	36.36	4	4.5	69,38	70	3.5
DBO/DQO*	0.4	4	4.5	0.4	70	3.5

\*Esta relación se obtiene al dividir la DBO remanente entre la DQO remanente para las mejores eficiencias de remoción obtenidas para cada uno de estos parámetros.

a) Según lo observado en la determinación de dosis óptima de los coagulantes en evaluación (ver figuras 7.1, 7.8 y los anexos E1 y F1), se presenta una mayor capacidad de aglomeración con el cloruro férrico, ya que, dicho coagulante requiere de dosis más bajas (5 mg/L) en comparación con las utilizadas con el hidroxiclورو de aluminio (50 mg/L), siendo este último valor diez veces mayor que el necesario con el cloruro férrico, para alcanzar remociones similares tanto de turbiedad como de color.

b) En la determinación del gradiente de mezcla lenta (ver figuras 7.2, 7.9; anexos E2, E3, F2 y F3), para los coagulantes estudiados, se observa la diferencia en el requerimiento de la energía de agitación (gradiente de mezcla lenta) cuando se utiliza hidroxiclورو de aluminio ( $4.5 \text{ s}^{-1}$ ) y cloruro férrico ( $35 \text{ s}^{-1}$ ), siendo este

último valor cuatro veces mayor que el necesario con el hidroxiclorigen de aluminio para alcanzar remociones similares de turbiedad y color, las cuales deben estar alrededor del 80 % para los coagulantes.

c) Teniendo en cuenta el tiempo de mezcla lenta (ver figuras 7.2, 7.9; anexos E2, E3, F2 y F3), se observa que el clorigen férrico requiere de un tiempo de 15 minutos, 5 minutos menor que el utilizado por el hidroxiclorigen de aluminio el cual es de 20 minutos; las eficiencias de remoción para dichos tiempos varían entre 80 y 90 %.

A diferencia del gradiente de floculación, el tiempo de mezcla lenta para los coagulantes estudiados, no presenta mayor importancia en la etapa correspondiente del tratamiento químico en cuanto a las eficiencias de remoción tanto de color como de turbiedad; pero en lo que corresponde al suministro de energía al sistema, el parámetro de tiempo de mezcla lenta juega un papel muy importante, ya que junto con el gradiente, guardan una relación proporcional a la energía de agitación suministrada.

d) Según lo observado en las figuras 7.3 y 7.10, así como en los anexos E4 y F4, se observa que a mayores tiempos de sedimentación, se obtuvieron las mejores eficiencias de remoción, pero al incrementar el tiempo de sedimentación, la tasa de sedimentación es decreciente.

e) Las velocidades de sedimentación presentan comportamientos distintos según el coagulante utilizado, de esta manera, el clorigen férrico requiere de velocidades de sedimentación del orden de 0.011 cm/s que son mayores en comparación a las que presenta el hidroxiclorigen de aluminio, el cual maneja velocidades de sedimentación de 0.007cm/s; esto indica que el floculo formado cuando se utiliza clorigen férrico es de mayor densidad y su remoción se efectúa mas rápidamente.

f) En lo que respecta a la velocidad de sedimentación crítica, para lograr una remoción de turbiedad del 99.5% con los coagulantes utilizados, se presenta el caso contrario de la velocidad de sedimentación, ya que el hidroxiclorigen de aluminio presenta una velocidad de sedimentación crítica de 0.0104 cm/s mayor que la requerida por el clorigen férrico (0.0087 cm/s) para lograr la misma remoción de turbiedad.

g) El hidroxiclorigen de aluminio presenta mayores eficiencias de remoción de DBO de 69.38 y de DQO de 48.70 %, en comparación con las remociones presentadas con el clorigen férrico, con una eficiencia de remoción de DBO de 36.36 y una eficiencia de remoción DQO de 29.62 %.

h) La eficiencia de remoción de materia orgánica (69.38% expresada como DBO) observada con el hidroxiclorigen de aluminio, es mayor en comparación con la remoción obtenida del material contaminante total (48.70% expresada como DQO).

i) Según lo observado en la tabla 7.2, utilizando clorigen férrico, cuando se estudia un rango amplio de pH, las eficiencias de remoción son de 87.11 % para la turbiedad y 89.53 % para el color, mientras que las eficiencias de remoción de turbiedad son de 70.17 % y de color son de 78.09 % cuando se estrecha el rango de pH. Se esperaba obtener unas eficiencias de remoción mayores cuando se trabaja estrechando el rango de pH que cuando se trabaja con un rango amplio de pH, pero debido a que en las pruebas de jarras números 35 a 44 se presentaron unas características fisicoquímicas iniciales atípicas, mayores que las normalmente reportadas, se presentó una disminución en la eficiencia de remoción para éstas.

j) El máximo valor de remoción de DBO utilizando hidroxiclورو de aluminio es alrededor del 70%, que es un valor mayor del 40 % reportado para los coagulantes comúnmente utilizados en el tratamiento de aguas residuales (CROZES, et al, 1.994). Hecho que infiere que el hidroxiclورو de aluminio, a pesar de ser poco estudiado y utilizado en el tratamiento de aguas residuales, es un coagulante que presenta altas eficiencias de remoción de la materia orgánica cuando es utilizado para tratar los efluentes de rallanderías de yuca.

k) Según lo observado en el desarrollo de la realización de las diferentes pruebas de jarras, un aspecto importante a tener en cuenta hace referencia a la densidad del flóculo sedimentado, ya que este presenta una mayor densidad cuando se utiliza hidroxiclورو de aluminio en comparación al flóculo generado por el clورو férrico, esto se observó en el menor volumen ocupado por que el flóculo después de la sedimentación.

l) Teniendo en cuenta el costo mensual que presenta el tratamiento químico a escala piloto, el clورو férrico presenta desde el punto de vista financiero mayor viabilidad en comparación al hidroxiclورو de aluminio; esto es debido a que el tratamiento con clورو férrico requiere de aproximadamente 16.8 litros por mes, lo que representa un costo mensual de 9737.28 pesos, mientras que el tratamiento con hidroxiclورو de aluminio necesita de 588 litros por mes, avaluados en 649740 pesos. Esta diferencia entre volúmenes y costos que se presenta entre el clورو férrico y el hidroxiclورو de aluminio, es debida principalmente a la dosis óptima de cada uno de los reactivos, además de la densidad, concentración y el costo por kilogramo.

m) En la determinación de la relación DBO/DQO (ver tabla 7.2) para el agua después del tratamiento químico con los coagulantes objeto de estudio, varía entre

0.4 y 0.5; esto indica que dicha agua mantiene características contaminantes tanto orgánicas como inorgánicas, pero su tendencia es a ser un vertido orgánico.

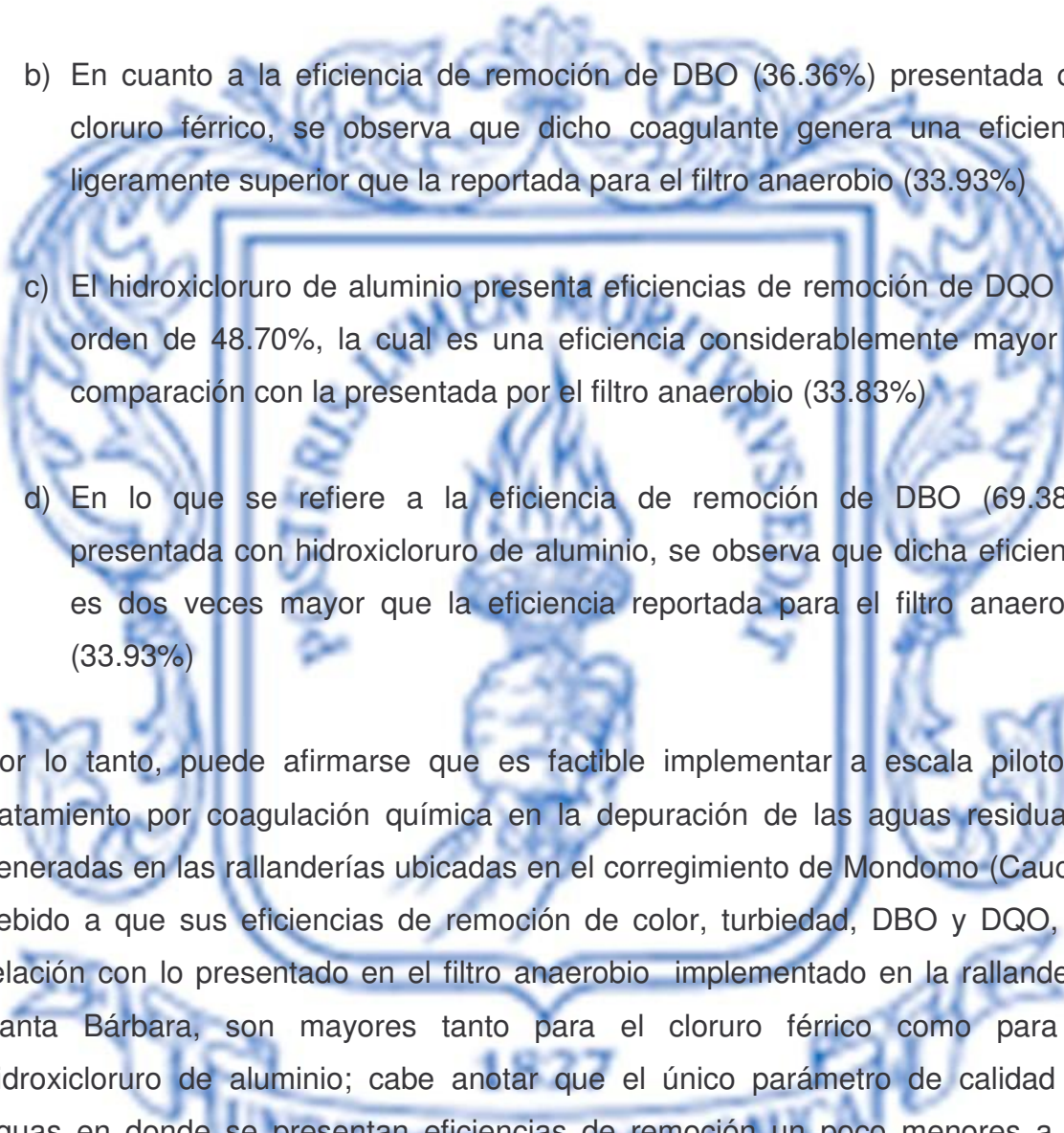
#### 7.4.2 Análisis comparativo entre el tratamiento químico y tratamiento biológico

En la tabla 7.3, se presenta una descripción general del filtro implementado en la rallandería Santa Bárbara. En el anexo I se muestran diferentes imágenes de la rallandería y algunos de los equipos utilizados.

Tabla 7.3. Descripción general del filtro anaerobio – Santa Bárbara

<b>PARAMETRO</b>	<b>MAGNITUD</b>
Caudal de diseño	6 m <sup>3</sup> /hora
Tiempo de retención hidráulico	12 horas
Volumen de tratamiento	72 m <sup>3</sup>
Volumen útil	94.5 m <sup>3</sup>
Área superficial	90 m <sup>2</sup>
Profundidad del agua	1.05 m
Medio de soporte	Tacos de guadua
Configuración del flujo del filtro	Horizontal
Tipo de flujo por etapas	Ascendente - descendente

Comparando los resultados obtenidos para las eficiencias de remoción tanto de DQO como de DBO, utilizando cloruro férrico e hidroxiclورو de aluminio, con los resultados obtenidos en los estudios realizados al filtro anaerobio ubicado en la rallandería Santa Bárbara (ver anexo H), se puede decir que:

- 
- a) El cloruro férrico presenta eficiencias de remoción de DQO que se encuentran alrededor de 29.62%, las cuales son ligeramente inferiores que las presentadas por el filtro anaerobio (33.83%)
  - b) En cuanto a la eficiencia de remoción de DBO (36.36%) presentada con cloruro férrico, se observa que dicho coagulante genera una eficiencia ligeramente superior que la reportada para el filtro anaerobio (33.93%)
  - c) El hidroxicloruro de aluminio presenta eficiencias de remoción de DQO del orden de 48.70%, la cual es una eficiencia considerablemente mayor en comparación con la presentada por el filtro anaerobio (33.83%)
  - d) En lo que se refiere a la eficiencia de remoción de DBO (69.38%) presentada con hidroxicloruro de aluminio, se observa que dicha eficiencia es dos veces mayor que la eficiencia reportada para el filtro anaerobio (33.93%)

Por lo tanto, puede afirmarse que es factible implementar a escala piloto el tratamiento por coagulación química en la depuración de las aguas residuales generadas en las rallanderías ubicadas en el corregimiento de Mondomo (Cauca), debido a que sus eficiencias de remoción de color, turbiedad, DBO y DQO, en relación con lo presentado en el filtro anaerobio implementado en la rallandería Santa Bárbara, son mayores tanto para el cloruro férrico como para el hidroxicloruro de aluminio; cabe anotar que el único parámetro de calidad de aguas en donde se presentan eficiencias de remoción un poco menores a las reportadas para el filtro anaerobio, es el parámetro de DQO cuando se utiliza cloruro férrico como coagulante.



Comparando los resultados obtenidos con los coagulantes utilizados, técnicamente se recomienda implementar el tratamiento químico con hidroxiclورو de aluminio, ya que este coagulante presenta mayores eficiencias de remoción en los parámetros utilizados para evaluar la calidad del agua tratada, como lo son: color, turbiedad, DBO y DQO, en comparación con los datos reportados para el filtro anaerobio y los resultados obtenidos cuando se utilizó cloruro férrico como coagulante en el tratamiento químico.

#### 7.4.3 Correlación de parámetros para la determinación de DBO y DQO cuando se utilizan cloruro férrico e hidroxiclورو de aluminio como coagulantes en el tratamiento químico.

Con el fin de obtener un mayor número de datos en lo concerniente a parámetros de calidad de aguas como la DBO y la DQO para los coagulantes en estudio y debido a que en el desarrollo de la investigación se obtuvieron mayor número de datos para el parámetro de DQO en comparación al parámetro de DBO, se efectuaron correlaciones de parámetros de calidad de aguas utilizando como punto de partida los datos que se obtuvieron cuando se trabajó con un rango estrecho de pH, que son de 2.41 a 2.50 para el cloruro férrico y de 3.10 a 4.40 para hidroxiclورو de aluminio, por lo tanto dichas ecuaciones solo tienen validez cuando se trabaja con estos rangos de pH. Las ecuaciones se obtuvieron utilizando el programa Polymath versión 5.1.

##### 7.4.3.1 Correlaciones para Cloruro Férrico

La ecuación 7.2 relaciona la eficiencia de remoción del parámetro DQO con las eficiencias de remoción de los parámetros turbiedad y color, así como la dosis de coagulante y el pH final.

$$DQO = ((k1 * Turbiedad^{k2}) + (k3 * Color^{k4})) / ((k5 * dosis^{k6}) + (k7 * pH^{k8})) \quad (7.2)$$

Donde:

$$K1 = 5,696E-10$$

$$K2 = 5,2539195$$

$$K3 = 13,965881$$

$$K4 = 0,0909287$$

$$K5 = 0,413595$$

$$K6 = 0,1699322$$

$$K7 = 0,1806257$$

$$K8 = 0,0958324$$

DQO: % de remoción

Turbiedad: % de remoción

Color: % de remoción

Dosis: mg/L de cloruro férrico

pH: pH de la mezcla (final)

Precisión:

$$R^2 = 0,8852988$$

$$\text{Varianza} = 24,115068$$

Para la determinación de la eficiencia de remoción de DBO, se emplearon las ecuaciones 7.2, 7.3 y 7.4 que relaciona este parámetro con las eficiencias de remoción de los parámetros DQO, dosis, pH final, color y turbiedad.

$$DBO = k + k1 * DQO + k2 * DQO^2 \quad (7.3)$$

Donde:

$$K = -246,06417$$

$$K1 = 23,831551$$

$$K2 = -0,5053476$$

DBO: % de remoción

DQO: % de remoción

Precisión:

$$R^2 = 0,9738309$$

$$\text{Varianza} = 2,2139037$$

$$\text{DBO} = k + k_1 \cdot \text{dosis} + k_2 \cdot \text{pH} + k_3 \cdot \text{Turbiedad} + k_4 \cdot \text{Color} \quad (7.4)$$

Donde:

$$k = 237,4129$$

DBO: % de remoción

$$k_1 = 4,6765634$$

Dosis: mg/L

$$k_2 = -0,1828865$$

pH: pH final

$$k_3 = -0,2974623$$

Turbiedad: % de remoción

$$k_4 = -2,3540425$$

Color: % de remoción

Precisión:

$$R^2 = 1$$

$$\text{Varianza} = 1,0E+99$$

$$\text{DBO} = K + K_1 \cdot \text{DQO} + K_2 \cdot \text{Turbiedad} + K_3 \cdot \text{Color} \quad (7.5)$$

Donde:

$$K = 92,625963$$

DBO: % de remoción

$$K_1 = 0,1465741$$

DQO: % de remoción

$$K_2 = 0,2635741$$

Turbiedad: % de remoción

$$K_3 = -1,1985168$$

Color: % de remoción

Precisión:

$$R^2 = 0,7033211$$

$$\text{Varianza} = 51,207047$$

En la figura 7.19 y el anexo E8, se presentan los resultados obtenidos de las eficiencias de remoción de DBO y DQO. Para la figura 7.19.1 se utilizó la ecuación 7.2 y para la figura 7.19.2 se utilizaron las ecuaciones 7.3, 7.4 y 7.5.

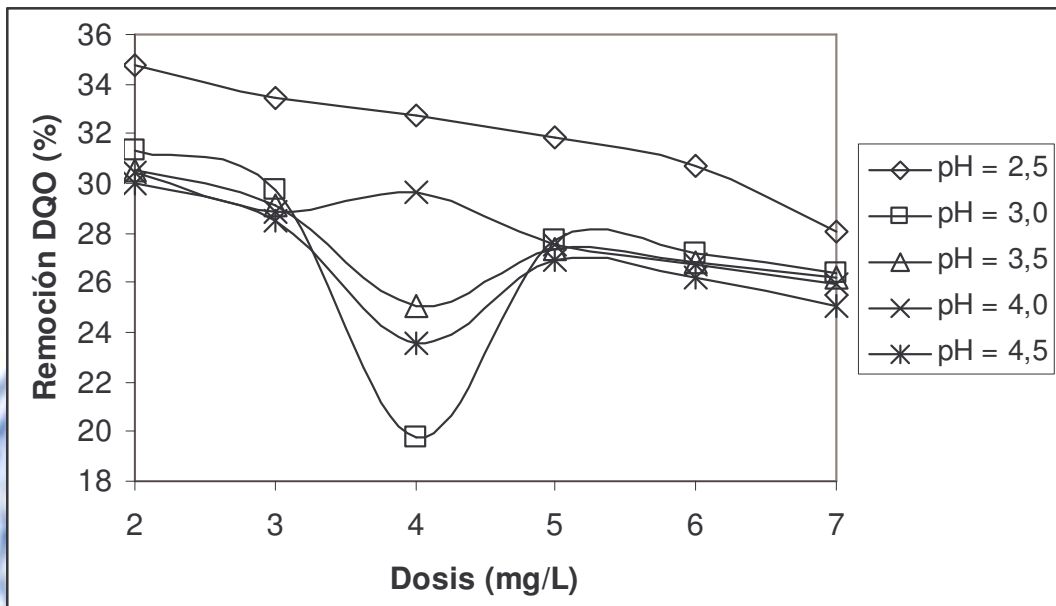


Figura 7.19.1. Eficiencias de remoción de DQO

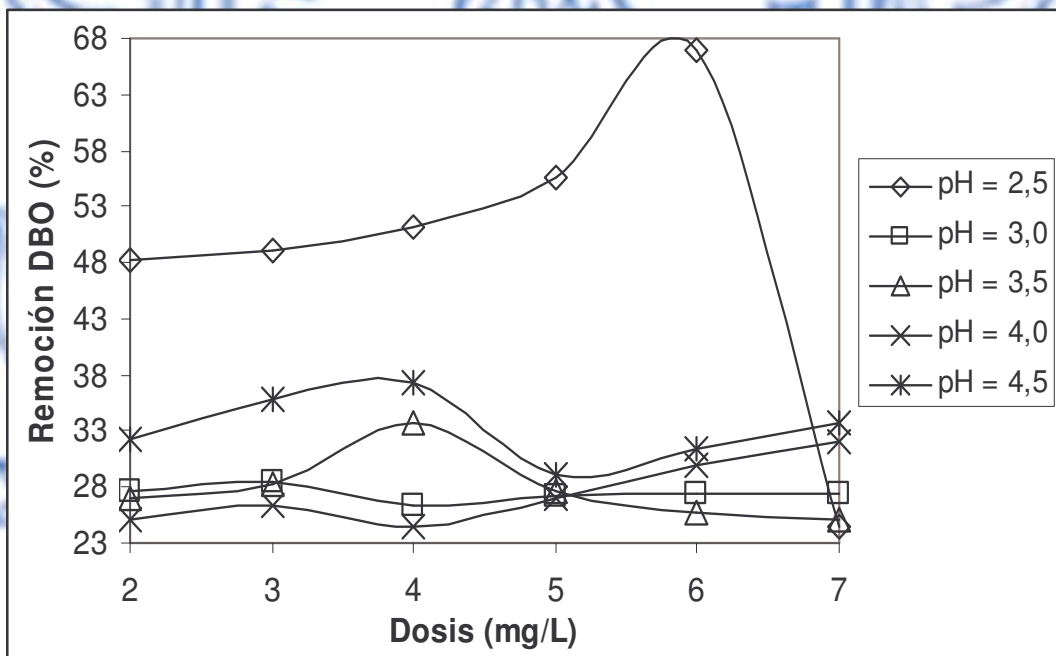


Figura 7.19.2. Eficiencias de remoción de DBO

Figura 7.19. Eficiencias de remoción de DQO y DBO, utilizando cloruro férrico.

Según la figura 7.19 y el anexo E8, se puede observar que los resultados obtenidos utilizando cloruro férrico como coagulante presentan las mejores eficiencias de remoción, tanto de DQO como de DBO, para valores de pH inicial de 2,5. Para estos valores de pH se tienen eficiencias de remoción de DQO que van desde 28,10% hasta eficiencias de remoción de 34,73%; y eficiencias de remoción de DBO desde 24.57 % hasta eficiencias de remoción de 66.94 %. Estas eficiencias de remoción de DQO y DBO se obtuvieron, cuando se trabajó con el valor de pH inicial antes mencionado en combinación con dosis de cloruro férrico que van desde 2 mg/L hasta dosis de 7 mg/L.

Para valores de pH inicial mayores de 2.5, se obtuvieron eficiencias de remoción para el parámetro de DQO entre 19.74 % y 31.34 %; y eficiencias de remoción para la DBO entre 24,55 % y 37,33 %.

Para pH inicial de 3.0, 3.5 y 4.5, se presenta una disminución en las eficiencias de remoción de la DQO en el intervalo de dosis que varía entre 3 y 5 mg/L. En lo referente a la DBO, para pH inicial de 2.5, se observa una gran disminución en la eficiencia de remoción, la cual desciende desde 66.94 % hasta 24.57 %, en el intervalo de dosis de 6 a 7 mg/L.

El diagrama de coagulación para el parámetro de DBO cuando se utiliza cloruro férrico como coagulante, figura 7.20, se realizó utilizando los datos calculados con las ecuaciones 7.3, 7.4 y 7.5, dicha figura presenta el siguiente comportamiento:

Se presenta una zona bien definida la cual se encuentra comprendida entre los pH finales de 2,9 y 4,4, en combinación con el intervalo de dosis de 2 a 7 mg/L. Dicha zona, presenta eficiencias de remoción de DBO entre 25% y 30%.

A medida que el pH final disminuye, utilizando el mismo intervalo de dosis (de 2 a 7 mg/L), se incrementa la eficiencia de remoción de este parámetro, desde un valor de 30% hasta 50%

Para pH final mayor de 4.4, se observa un leve incremento en la eficiencia de remoción de DBO, la cual pasa de 30% a 35%.

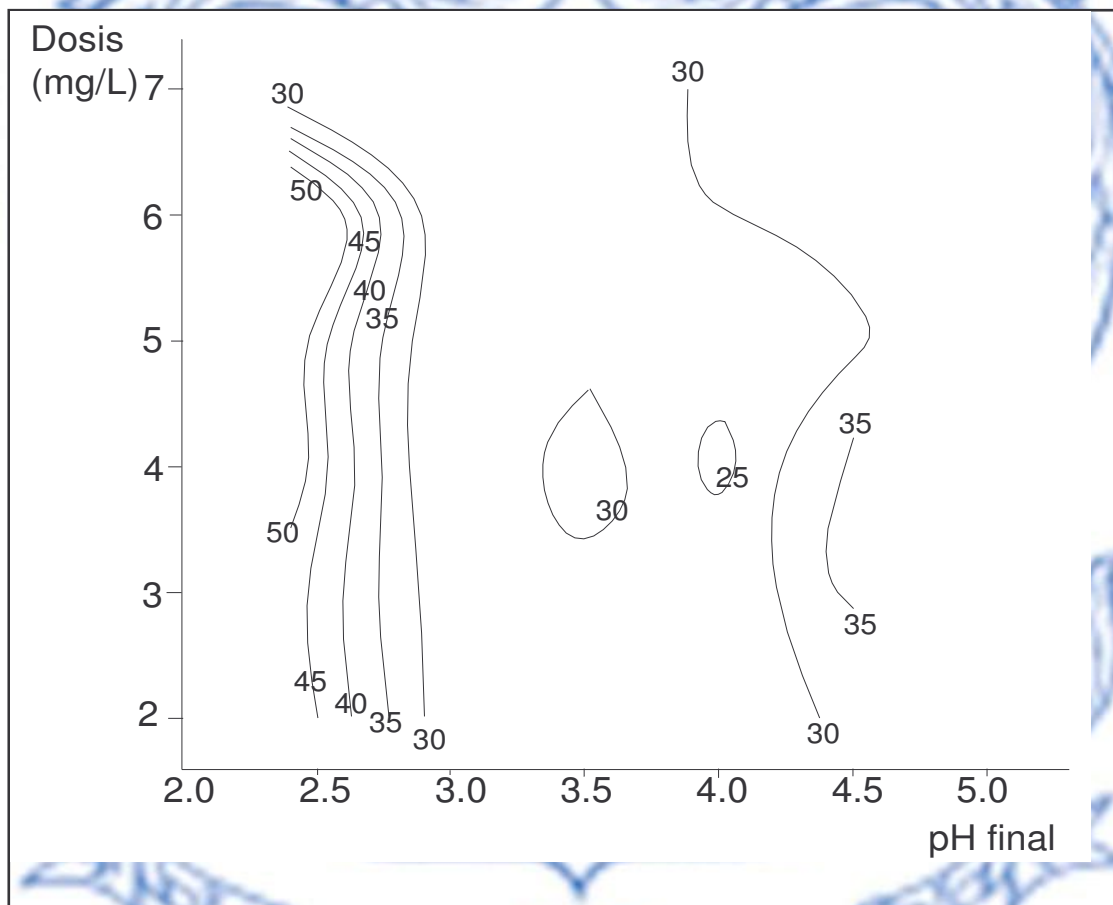


Figura 7.20. Diagrama de coagulación para eficiencia de remoción de DBO, utilizando cloruro férrico.

En la figura 7.21 se muestra el diagrama de coagulación para el parámetro de DQO cuando se utiliza cloruro férrico como coagulante, este diagrama se realizó utilizando los datos calculados con la ecuación 7.2.

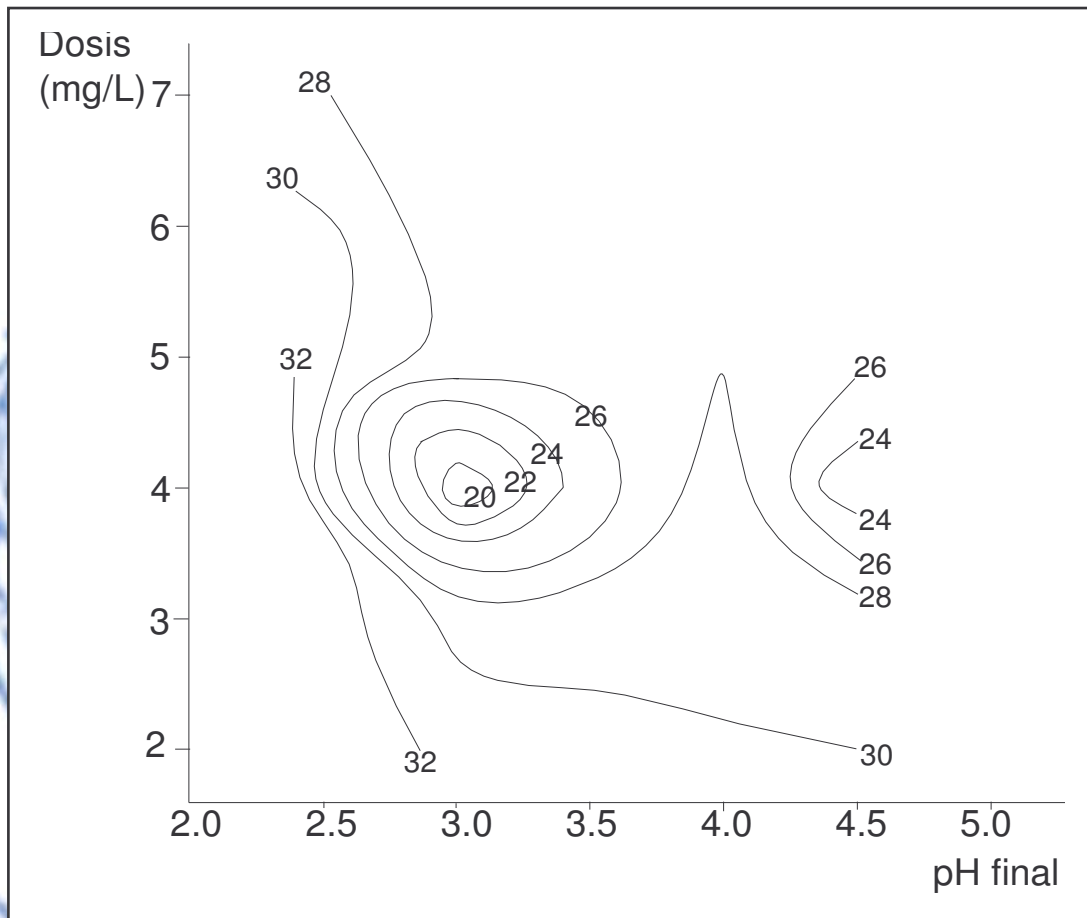


Figura 7.21. Diagrama de coagulación para eficiencia de remoción de DQO, utilizando cloruro férrico.

Teniendo en cuenta la eficiencia de remoción de DQO, el diagrama de coagulación resultante, figura 7.21, presenta el siguiente comportamiento:

Las mayores eficiencias de remoción, alrededor de 30%, se presentan para pH final menor a 3.0, en combinación con el intervalo de dosis de 2 a 6 mg/L. Esta misma eficiencia de remoción se logra para valores de pH final en el rango comprendido entre 3.0 y 4.5, y dosis de 2 a 3 mg/L.

Se presenta una gran zona con eficiencias de remoción entre 20 y 30 %, dichas remociones se logran para dosis de coagulante mayor a 2 mg/L y valores de pH final entre 2.5 y 4.5

#### 7.4.3.2 Correlaciones para hidroxiclорuro de aluminio

La ecuación 7.6 relaciona la eficiencia de remoción del parámetro DQO con las eficiencias de remoción de los parámetros turbiedad y color, así como la dosis de coagulante y el pH final.

$$\text{DQO} = k + k_1 \cdot \text{dosis} + k_2 \cdot \text{pH} + k_3 \cdot \text{Turbiedad} + k_4 \cdot \text{Color} \quad (7.6)$$

Donde:

$$k = 81,940617$$

DQO: % de remoción

$$k_1 = 0,2283377$$

Turbiedad: % de remoción

$$k_2 = 0,0138921$$

Color: % de remoción

$$k_3 = -2,5102503$$

Dosis: mg/L de cloruro férrico

$$k_4 = 1,9926186$$

pH: pH de la mezcla (final)

Precisión:

$$R^2 = 0,905281$$

$$\text{Variance} = 9,943082$$

Para la determinación de la eficiencia de remoción de DBO, se emplea la ecuación 7.7, que relaciona este parámetro con las eficiencias de remoción de los parámetros DQO, turbiedad y color.

$$\text{DBO} = k + k_1 \cdot \text{DQO} + k_2 \cdot \text{Turbiedad} + k_3 \cdot \text{Color} \quad (7.7)$$



Donde:

$K = 211,15857$

DBO: % de remoción

$K1 = 0,755384$

DQO: % de remoción

$K2 = 2,3490264$

Turbiedad: % de remoción

$K3 = -4,2930601$

Color: % de remoción

Precisión:

$R^2 = 0,9419326$

Varianza = 2,5080141

En la figura 7.22 y el anexo F8, se presentan los resultados obtenidos de las eficiencias de remoción de DBO y DQO, cuando se utilizan los resultados obtenidos con las ecuaciones 7.6 y 7.7, que correlacionan los parámetros de evaluación de calidad de aguas utilizados en la presente investigación; esta figura presenta el siguiente comportamiento:

Según la figura 7.22.1, se presenta un punto máximo en la eficiencia de remoción de DQO, de alrededor del 50%, cuando se utiliza un pH de 3.5, en el intervalo de dosis de 70 a 75 mg/L; la curva correspondiente a este pH, también contiene la menor eficiencia de remoción, la cual tiene un valor alrededor de 37%.

Independientemente del pH, las eficiencias de remoción de DQO presentan una tendencia incremental a medida que se aumentan las dosis de hidroxiclورو de aluminio.

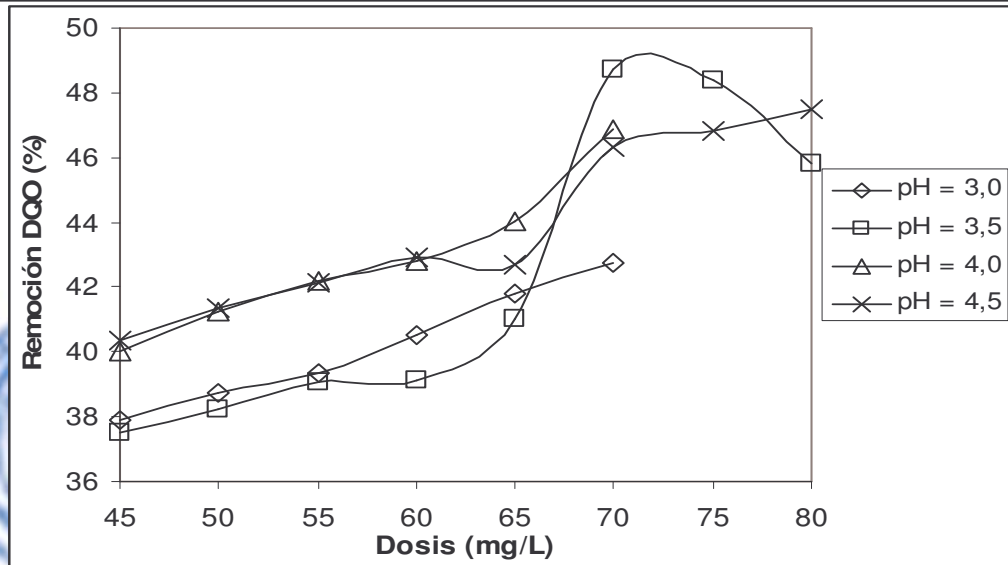


Figura 7.22.1. Eficiencias de remoción de DQO

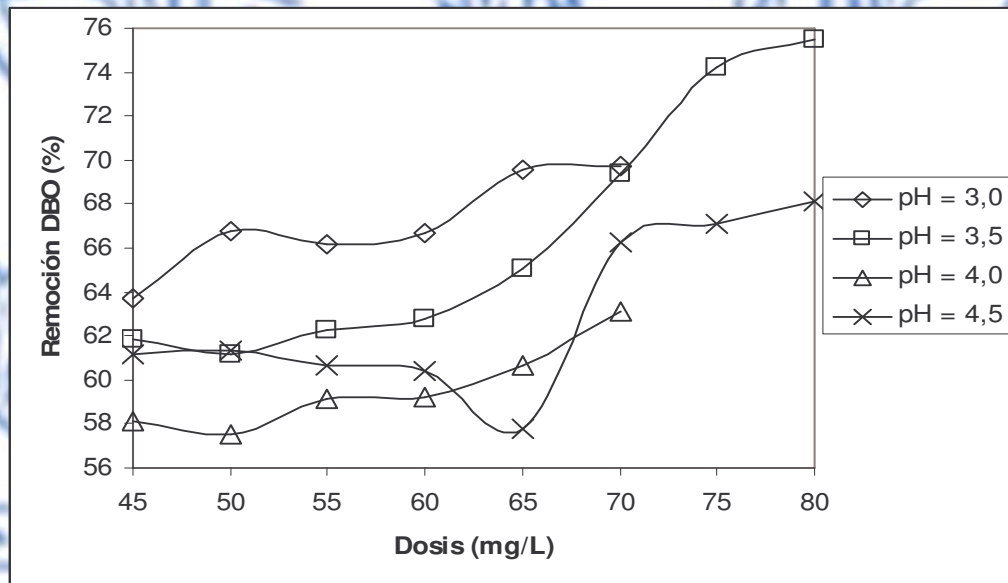


Figura 7.22.2. Eficiencias de remoción de DBO

Figura 7.22. Eficiencias de remoción de DQO y DBO, utilizando hidroxicloriguro de aluminio.

En lo correspondiente al parámetro de DBO, la figura 7.22.2 muestra una relación con el parámetro de DQO, ya que se obtienen las mejores eficiencias de remoción

cuando se utiliza un pH de 3.5 para las dosis de hidroxocloruro de aluminio mayores a 70 mg/L.

Al igual que lo presentado en la figura 7.22.1, la figura 7.22.2 muestra una tendencia incremental en cuanto a la eficiencia de remoción de DBO cuando se aumenta la dosis de coagulante para la mayoría de los valores de pH, pero, la curva correspondiente al pH de 4.5, presenta un decremento en la eficiencia de remoción desde 62 % (dosis de 45 mg/L) hasta llegar a un punto mínimo local de 58 % (dosis de 65 mg/L); desde este punto de inflexión se comienza a incrementar de nuevo la eficiencia de remoción hasta llegar a valores cercanos al 68% para dosis de 80 mg/L.

En la figura 7.23 se muestra el diagrama de coagulación para el parámetro de DBO cuando se utiliza hidroxocloruro de aluminio, este diagrama se realizó utilizando los datos calculados con la ecuación 7.7.

El diagrama de coagulación para el parámetro de DBO cuando se utiliza hidroxocloruro de aluminio como coagulante, conserva el siguiente comportamiento:

Para valores de pH final en un rango comprendido entre 3.0 y 4.0, y dosis mayores a 70 mg/L, se presentan eficiencias de remoción de DBO mayores al 70 %.

Para el intervalo de pH estudiado (de 3.0 a 4.5) y dosis comprendidas entre 40 y 70 mg/L, se presentan eficiencias de remoción de DBO entre 58 y 70 %, que son mayores a las eficiencias reportadas por la literatura cuando se utiliza el tratamiento químico en la depuración de aguas residuales.

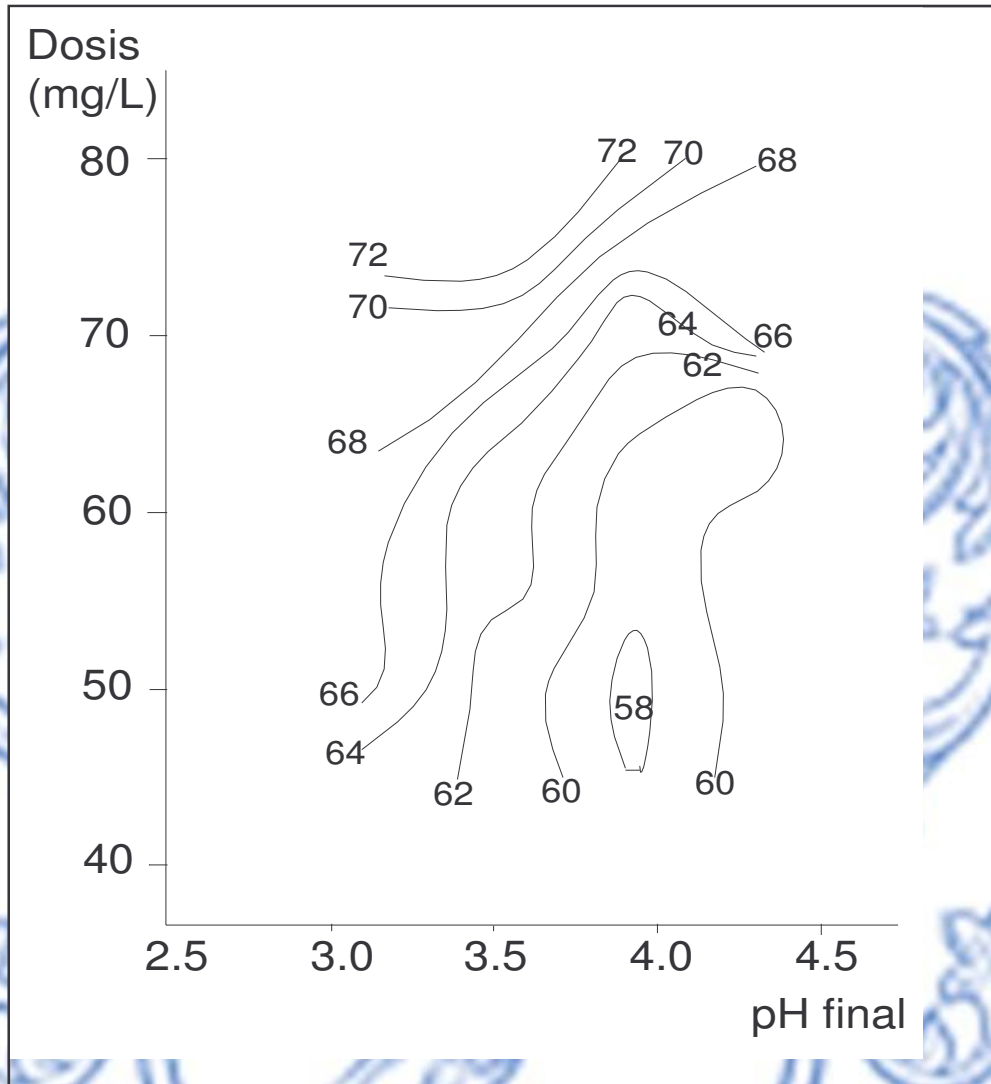


Figura 7.23. Diagrama de coagulación para eficiencia de remoción de DBO, utilizando hidroxocloruro de aluminio.

En lo concerniente al parámetro de DQO, la figura 7.24 muestra el diagrama de coagulación para las eficiencias de remoción de dicho parámetro. Para realizar este diagrama de coagulación se utilizaron los resultados obtenidos con la ecuación 7.6.

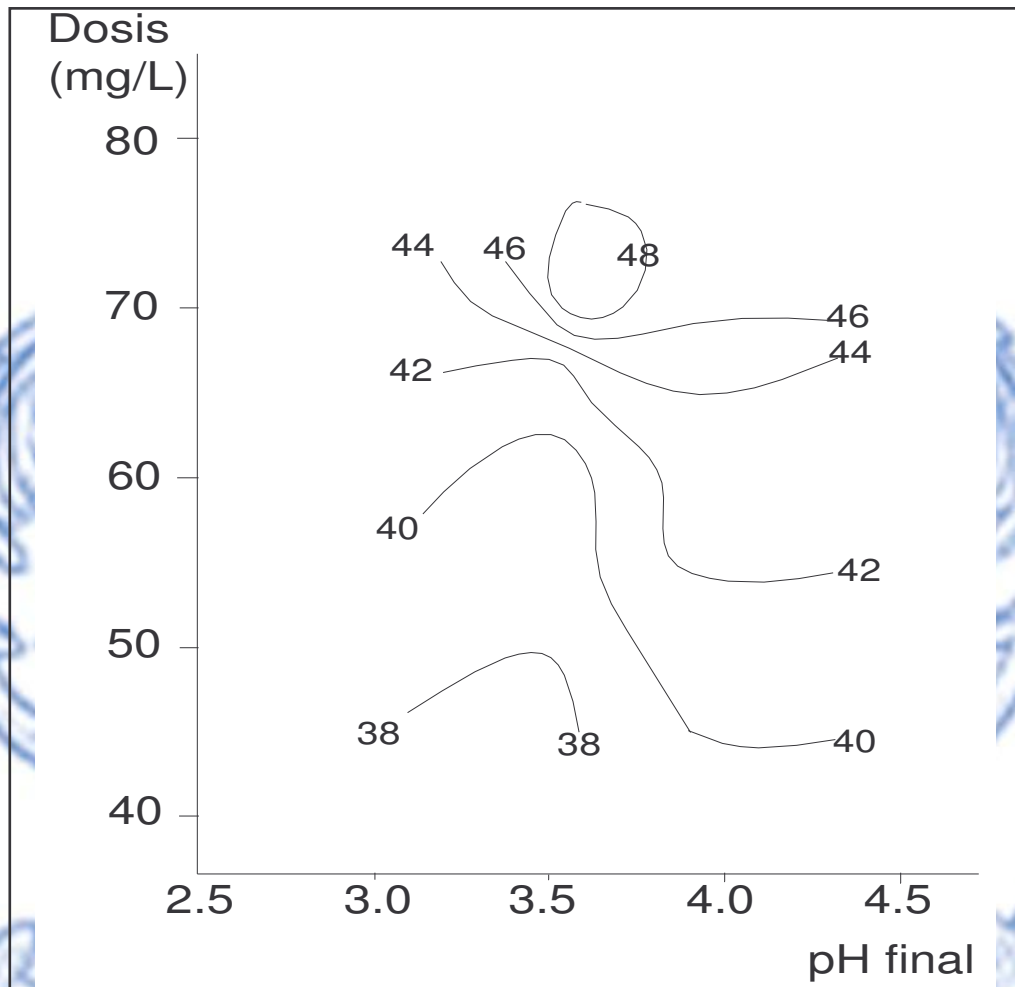


Figura 7.24. Diagrama de coagulación para la eficiencia de remoción de DQO, utilizando hidroxiclорuro de aluminio.

El diagrama de coagulación para la eficiencia de remoción de DQO, presenta el siguiente comportamiento:

Para el rango de valores de pH final estudiado, se observa una zona de remoción cuya eficiencia se encuentra por encima del 40 %; dicha zona se presenta cuando se utilizan dosis mayores a 60 mg/L y pH final comprendido entre 3.0 y 3.5; esta zona continúa para pH final mayor a 3.5 y dosis entre 45 y 80 mg/L. Para dosis menores a 60 mg/L, se presenta una disminución de la eficiencia de remoción.

## 8. CONCLUSIONES

- a) Los parámetros de tratabilidad cuando se utiliza cloruro férrico como coagulante en el tratamiento químico, se presentan en la tabla 8.1.

Tabla 8.1. Parámetros de tratabilidad  $\text{FeCl}_3$

<b>PARTAMETRO DE TRATABILIDAD</b>	<b>MAGNITUD</b>
Dosis óptima	5 mg/L
Gradiente de mezcla lenta	$35 \text{ s}^{-1}$
Tiempo de mezcla lenta	15 minutos
Tiempo de sedimentación	15 minutos
Velocidad de sedimentación	0.011 cm/s
Velocidad de sedimentación crítica	0.0087 cm/s

- b) En la tabla 8.2, se presentan los parámetros de tratabilidad cuando se utiliza hidroxiclорuro de aluminio (PAC) como coagulante.

Tabla 8.2. Parámetros de tratabilidad PAC

<b>PARTAMETRO DE TRATABILIDAD</b>	<b>MAGNITUD</b>
Dosis óptima	50 mg/L
Gradiente de mezcla lenta	$4.5 \text{ s}^{-1}$
Tiempo de mezcla lenta	20 minutos
Tiempo de sedimentación	25 minutos
Velocidad de sedimentación	0.007 cm/s
Velocidad de sedimentación crítica	0.0104 cm/s

- c) Al realizar el estudio de tratabilidad con un rango amplio de pH, utilizando cloruro férrico como coagulante, se obtuvieron eficiencias de remoción de

turbiedad alrededor del 87% con pH de 3,0 y una dosis de 3 mg/L y remoción de color alrededor del 89 % con pH 4,0 y una dosis de 5 mg/L. Al estrechar el rango de pH, en este mismo estudio, se lograron eficiencias de remoción tanto de turbiedad alrededor del 70 % con un pH de 2,5 y una dosis de 5 mg/L y una remoción de color alrededor de 78 % con un pH igual a 2,5 y una dosis de 5 mg/L.

- d) La remoción de DBO es de 36.36 % y la remoción de DQO es de 29.62 %, utilizando Cloruro férrico como coagulante. Estas eficiencias se lograron con un pH de 4.5 y una dosis de 4 mg/L para la DBO; y un pH de 4.0 y una dosis de 4 mg/L para la DQO
- e) El estudio de tratabilidad con un rango amplio de pH, efectuado al coagulante hidroxiclورو de aluminio, presentó eficiencias de remoción de turbiedad alrededor del 97 % con un pH de 4,0 y una dosis de 70 mg/L y remoción de color alrededor del 99 % con un pH de 3,0 y una dosis de 65 mg/L. Al estrechar el rango de pH, en este mismo estudio, se lograron eficiencias de remoción de turbiedad alrededor del 97 % con un pH de 4,0 y una dosis de 70 mg/L y una remoción de color alrededor del 96 % con un pH de 4,5 y una dosis de 65 mg/L.
- f) La remoción de DBO es de alrededor 69 % y la remoción de DQO es de alrededor 53 %, utilizando hidroxiclورو de aluminio como coagulante. Estas eficiencias se lograron con un pH de 3,5 y una dosis de 70 mg/L.
- g) El rango de pH que en combinación con los parámetros óptimos de tratabilidad (Gradiente y tiempo de mezcla lenta, tiempo de sedimentación) en donde se obtuvieron los mejores resultados de remoción de color,

turbiedad, DBO y DQO es el que varia entre 2,5 y 4,5 para el cloruro férrico y de 3,0 a 4,5 para el hidroxicloriguro de aluminio.

- h) La región donde se presentan máximas eficiencias de remoción tanto de color como de turbiedad utilizando cloriguro férrico, se encuentra en el intervalo de pH inicial comprendido entre 2.5 y 3.0, para las dosis comprendidas entre 2 y 7 mg/L, y a un pH de 2.5 y dosis comprendidas entre 4 y 5 mg/L.
- i) Con hidroxicloriguro de aluminio, las regiones donde se obtienen máximas eficiencias de remoción de turbiedad y color, son: la primera, entre un pH de 2.5 y 4.5, y dosis comprendidas entre 40 y 80 mg/L, y la segunda entre un pH de 2.0 y 5.0, y dosis comprendidas entre 40 y 80 mg/L.
- j) El cloriguro férrico presenta una mayor capacidad de aglutinamiento en comparación con el hidroxicloriguro de aluminio.
- k) El hidroxicloriguro de aluminio requiere de una energía de agitación (Gradiente de mezcla lenta) menor que la utilizada con el Cloriguro férrico, para lograr eficiencias de remoción alrededor del 90%, esto implica menores consumos energéticos si se utiliza agitación mecánica a escala piloto.
- l) El requerimiento del tiempo de mezcla lenta del cloriguro férrico (15 minutos) es menor que el utilizado por el hidroxicloriguro de aluminio (20 minutos).
- m) Las eficiencias de remoción tanto de color como de turbiedad, conservan una relación directa respecto al tiempo de sedimentación, ya que a mayor tiempo, mayor eficiencia de remoción.



- n) La velocidad sedimentación difiere de la velocidad de sedimentación crítica ya que esta última se determina seleccionando una remoción de turbiedad deseada, además, para tener en cuenta el hecho de que los ensayos a nivel de laboratorio se realizan en condiciones casi ideales, la velocidad de sedimentación crítica se encuentra dividida por un factor de seguridad que hace más confiables los parámetros de diseño si se desea implementar el tratamiento a escala piloto.
- o) Teniendo en cuenta la velocidad de sedimentación, el cloruro férrico al necesitar de una velocidad mayor (0.011 cm/s) en comparación a la requerida por el hidroxiclورو de aluminio (0.007), lo anterior indica que es más viable utilizar cloruro férrico en el tratamiento químico, ya que este requiere de un menor tiempo de sedimentación en comparación al tiempo requerido cuando se utiliza hidroxiclورو de aluminio.
- p) La velocidad de sedimentación crítica al ser determinada utilizando una remoción deseada de turbiedad, presenta condiciones totalmente opuesta en comparación a la velocidad de sedimentación, ya que el hidroxiclورو de aluminio para lograr una remoción de turbiedad del 99.5% requiere de una velocidad de sedimentación crítica de 0.0104 cm/s mayor a la velocidad de sedimentación crítica cuando se utiliza cloruro férrico que es 0.0087 cm/s, para lograr la misma remoción. Esto se debe a las mejores características finales del agua tratada con hidroxiclورو de aluminio, por lo tanto cuando se utiliza  $\text{FeCl}_3$  se debe suministrar un mayor tiempo de sedimentación al agua sometida al proceso químico para alcanzar una eficiencia de remoción igual que cuando se utiliza PAC.

- q) El PAC presenta eficiencias de remoción mucho más altas que las observadas con cloruro férrico, además no genera color en el agua después que se realiza su tratamiento.
- r) Aunque el cloruro férrico tiene mayor estudio y utilización en el tratamiento de aguas residuales, presenta eficiencias de remoción de color, turbiedad, DBO y DQO menores que las observadas con el hidroxiclورو de aluminio (una de las variedades del PAC).
- s) Al estrechar los rangos de pH se obtuvo que el hidroxiclورو de aluminio, presenta mejores eficiencias de remoción, tanto para color como para turbiedad, para valores de este parámetro de 4.0 y 4.5.
- t) El cloruro férrico, al utilizar dosis bajas de coagulante (alrededor de 5 mg/L) en comparación a las utilizadas por el hidroxiclورو de aluminio (alrededor de 50 mg/L), presenta una mayor economía puesto que se utiliza una menor cantidad de reactivo, su costo en el mercado es \$ 414 pesos el kilogramo de Cloruro férrico a una concentración de 42% y el del hidroxiclورو de aluminio es \$ 850 pesos el kilogramo (Fuente PRODESAL, 2.005), lo que indica que con una menor inversión, si se adquiere cloruro férrico, se va a obtener una buena disminución de la carga contaminante aportada por las aguas residuales de la rallandería Santa Bárbara; otra ventaja del cloruro férrico es su fácil consecución.
- u) Desde el punto de vista financiero, el tratamiento con cloruro férrico presenta mayor viabilidad de implementación a escala piloto, ya que mensualmente utiliza alrededor de 16.8 kilogramos evaluados en 6955.2 pesos.

- v) El tratamiento con hidroxiclورو de aluminio no es viable económicamente ya que presenta un consumo mensual de reactivo de 588 kilogramos, los cuales presentan un costo de 499800 pesos.
- w) Para mejorar las características finales del agua sometida al tratamiento químico se puede utilizar un tratamiento biológico, como filtro anaerobio, debido a la relación DBO/DQO, entre 0.4 y 0.5, que se presenta en el agua después de ser tratada con los dos coagulantes utilizados en la presente investigación.
- x) Las eficiencias de remoción de color, turbiedad, DBO y DQO, en relación con lo presentado en el filtro anaerobio implementado en la rallería Santa Bárbara, generalmente son mayores en el tratamiento químico utilizando cloruro férrico e hidroxiclورو de aluminio.
- y) Una de las grandes ventajas del tratamiento químico en comparación con el tratamiento biológico, es que las eficiencias de remoción de la carga contaminante se mantienen a pesar de tener cambios en las características fisicoquímicas iniciales del agua residual.
- z) Es factible la implementación a escala piloto el tratamiento por coagulación química en la depuración de las aguas residuales generadas en las rallerías ubicadas en Mondomo (Cauca).

## 9. RECOMENDACIONES

- a) Debido a que la operación en el proceso de extracción de almidón agro de yuca en la rallandería Santa Bárbara, es muy variable y depende mucho del operador, se generan pérdidas de su producto principalmente al final de los canales de sedimentación, hecho que se ve reflejado en la variabilidad de las características fisicoquímicas del agua residual generada en dicho proceso, por tal motivo, se recomienda una estandarización y optimización del proceso de extracción de almidón, centrándose principalmente en las operaciones de lavado de la raíz (operación que condiciona la generación de compuestos derivados del cianuro) y la sedimentación del almidón en los canales.
- b) Para los investigadores interesados en seguir con el estudio del hidroxiclورو de aluminio como coagulante en el tratamiento químico de las aguas residuales generadas en el proceso de extracción de almidón agro de yuca, se recomienda ampliar el rango de dosis a estudiar, ya que con los diagramas obtenidos en el presente estudio, no se diferencian algunos límites de las zonas de coagulación. Dentro de los parámetros recomendados para la evaluación de calidad de aguas, se aconseja tener en cuenta la alcalinidad, además, si se cuenta con los recursos financieros y la capacidad operativa suficientes, utilizar la Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO) y la Demanda Química de Oxígeno (DQO) como los principales parámetros de evaluación de calidad de aguas.
- c) Como complemento de este trabajo de investigación, se recomienda plantear un estudio de caracterización de los lodos generados en el tratamiento por coagulación química de las aguas residuales de rallanderías de yuca, donde se especifiquen sus características fisicoquímicas, riesgos, opciones de aprovechamiento, entre otros.

- d) Si se decide depositar el lodo en un lugar de almacenamiento se recomienda que el lugar sea impermeabilizado y cubierto para evitar que los elementos contaminantes, propios de este, se drenen hacia cuerpos de agua o que afecten las condiciones del suelo cercano al lugar de disposición final.
- e) Por los resultados obtenidos en el presente estudio, se recomienda implementar a escala piloto, el tratamiento químico del agua residual generada en el proceso de extracción de almidón agrio de yuca en la población de Mondomo (Cauca), dicho sistema de tratamiento debe ser ubicado después del canal de sedimentación de mancha si las rallanderías cuentan con este dispositivo, en caso contrario, se recomienda implementar el sistema de tratamiento después del canal de sedimentación de almidón.
- f) Al realizar la planta piloto se recomienda tener en cuenta los siguientes parámetros de tratamiento, cuando se utiliza cloruro férrico, ver tabla 9.1.

Tabla 9.1. Parámetros de tratabilidad  $\text{FeCl}_3$ .

<b>PARATAMETRO DE TRATABILIDAD</b>	<b>MAGNITUD</b>
Rango de dosis	3 - 5 mg/L
Rango de pH inicial	2.5 – 3.0
Gradiente de mezcla lenta	$35 \text{ s}^{-1}$
Tiempo de mezcla lenta	15 minutos
Tiempo de sedimentación	15 minutos

- g) Al realizar la planta piloto se recomienda tener en cuenta los siguientes parámetros de tratamiento, cuando se utiliza Hidroxicloruro de aluminio, ver tabla 9.2.

Tabla 9.2. Parámetros de tratabilidad PAC.

PARATAMETRO DE TRATABILIDAD	MAGNITUD
Rango de dosis	60 - 70 mg/L
Rango de pH inicial	4.0 – 4.5
Gradiente de mezcla lenta	$4.5 \text{ s}^{-1}$
Tiempo de mezcla lenta	20 minutos
Tiempo de sedimentación	25 minutos



## REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

ALARCON F; DUFOUR D. Almidón agrio de yuca en Colombia. Tomos 1 y 2. CIAT. 1998. [Sitio en Internet]. Disponible en [http:// www.ciat.org](http://www.ciat.org). Acceso el 6 de julio de 2.005.

ALP-Moderator. Norma para regular la calidad de aguas residuales descargadas al alcantarillado sanitario. Miércoles, Enero 19 de 2.005. [Sitio en Internet]. Disponible en [http:// coexport.com/cms/article.php?story= 20050119125542569](http://coexport.com/cms/article.php?story=20050119125542569). Acceso el 24 de mayo de 2.005.

CAMPOS J, DI BERNARDO L. Uso de polímeros en tratamiento de aguas de abastecimiento. Centro editorial Universidad de Sao Paulo. Brasil, julio de 1987.

CEPIS. Calidad del agua: preguntas mas frecuentes. [Sitio en Internet]. Disponible en [http:// www.cepis.ops-oms.org/bvsacg/e/faq.html](http://www.cepis.ops-oms.org/bvsacg/e/faq.html). Acceso el 16 de agosto de 2.005.

CHARÁ J. Niveles de mancha y afrecho de yuca (*Manihot esculenta*) como fuente energética en la dieta de patos pekin (*Anas platyrhynchos*). Convenio CETEC-CIPAV-IMCA. [publicación periódica] Volumen 4, Number 2, Octubre de 1992.

CROZES G, MARSHALL M, WHITE P. Enhanced Coagulation and Impact of Coagulation pH Preadjustment on Natural Organic Matter Removal and Operations Costs. American Water Works Association (AWWA). 1994.

DEPARTAMENTO DE SANIDAD DEL ESTADO DE NUEVA YORK. Manual de tratamiento de aguas negras. Editorial Limusa, S.A. de C.V. Mexico, DF. 1999.

DUFOUR D, GOTTRET V, HENRY G. Caracterización de la agroindustria de procesamiento de almidón agrio en el departamento del Cauca, Colombia. Proyecto de desarrollo de Agroempresas rurales, CIAT. 1997. [Sitio en Internet]. Disponible en [http:// www.ciat.cgiar.org/agroempresas/espanol/ inicio.htm](http://www.ciat.cgiar.org/agroempresas/espanol/inicio.htm). Acceso el 16 de agosto de 2.005.

Estudio de los mecanismos de flotabilidad del cuarzo en presencia de sales de alquilamonio, efecto del almidón. [Sitio en Internet]. Disponible en <http://www.scielo.cl/scielo.php>. Acceso el 23 de septiembre de 2.005

Exall et al (en el artículo: *Using coagulants to remove organic matter- Journal AWWA Nov. 2000*).

Lenntech. Floculación. [Sitio en Internet]. Disponible en [http:// www.lenntech.com/espanol/floculacion.htm](http://www.lenntech.com/espanol/floculacion.htm). Acceso el 24 de mayo de 2.005.

Lenntech. Floculación y coagulación. [Sitio en Internet]. Disponible en [http:// www.lenntech.com/espanol/coagulantes-y-floculantes.htm](http://www.lenntech.com/espanol/coagulantes-y-floculantes.htm). Acceso el 24 de mayo de 2.005.

Lenntech. Hierro-Fe. [Sitio en Internet]. Disponible en [http:// www.lenntech.com/espanol/formulario-de-consulta.htm](http://www.lenntech.com/espanol/formulario-de-consulta.htm). Acceso el 24 de mayo de 2.005.

MALDONADO V. Capítulo 7, sedimentación. [Sitio en Internet]. Disponible en [http:// www.cepis.ops-oms.org/bvsatr/fulltext/tratamiento/manual/tomoll/siete.pdf](http://www.cepis.ops-oms.org/bvsatr/fulltext/tratamiento/manual/tomoll/siete.pdf). Pagina 12. Acceso el 25 de agosto de 2.005.



PEREZ P, JORGE A. Manual de potabilización del agua, tercera edición. Centro editor Universidad Nacional de Colombia. Medellín, 1997.

RIBAS J, SANS R. Ingeniería Ambiental, Contaminación y Tratamientos. Alfaomega grupo editor. México DF., 1999.

RIGOLA M. Tratamiento de aguas industriales: aguas de proceso y residuales. Alfaomega grupo editor, S.A. de C.V. Mexico, DF. 1999.

RODRIGUEZ J, TORRES P, URIBE I. Tratamiento de aguas residuales del proceso de extracción de almidón de yuca en filtro anaerobio: influencia del medio de soporte. Scientia et Technica Año IX, No 23, Diciembre 2003. UTP. ISSN 0122-1701.

ROMERO J. Acuípurificación: diseño de sistemas de purificación de aguas. Centro editorial Escuela Colombiana de Ingeniería. Santa Fe Bogotá, Colombia, 1995.

ROMERO J. Tratamiento de aguas residuales: Teoría y principios de diseño. Centro editorial Escuela Colombiana de Ingeniería. Colombia, 1999.

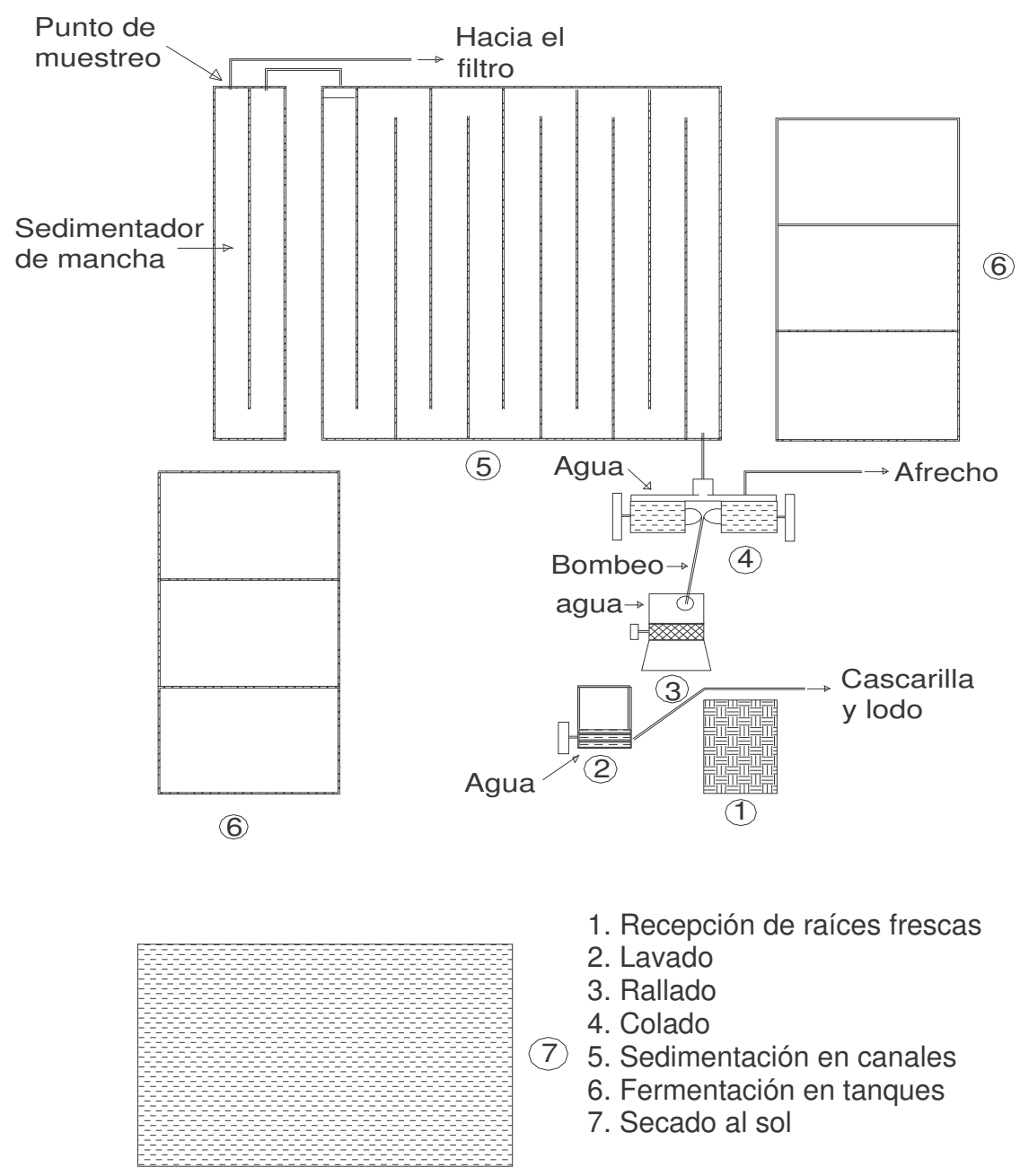
Tecnología educativa S.A. Unidad de ensayo de floculación. [Sitio en Internet]. Disponible en [http:// www.tecnoedu.com/Armfield/W1.php](http://www.tecnoedu.com/Armfield/W1.php). Acceso el 3 de agosto de 2.005.

UNIVERSIDAD DE ORIENTE. Escuela de ciencias de la tierra. [Sitio en Internet]. Disponible en [http:// www.iespaña.es/potablewater/coagulacion-floculacion.htm](http://www.iespaña.es/potablewater/coagulacion-floculacion.htm). Acceso el 16 de agosto de 2.005.



# ANEXOS

ANEXO A. ESQUEMA DEL PROCESO DE EXTRACCIÓN DE ALMIDÓN AGRIO DE YUCA RALLANDERÍA SANTA BÁRBARA



ANEXO B. FICHAS TECNICAS DE REACTIVOS Y EQUIPOS UTILIZADOS

Tabla B1. Ficha técnica del Hidroxicloruro de Aluminio

<b>Fabricante</b>	Productos derivados de la sal S.A.
<b>% Al</b>	12 %
<b>% Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	22 %
<b>Densidad</b>	1.3 g/mL
<b>Precio</b>	850 pesos/Kg

Tabla B2. Ficha técnica del cloruro férrico

<b>Fabricante</b>	Productos derivados de la sal S.A.
<b>Concentración analítica</b>	61.6 % p/v
<b>Concentración comercial</b>	35 – 45 % p/p
<b>Densidad (20°C)</b>	1.37 – 1.45 g/ml
<b>Cloruro ferroso</b>	< 0.92% p/p
<b>Acidez</b>	< 0.5 %p/p
<b>Insolubles</b>	< 0.1% p/p
<b>Precio</b>	414 pesos/kg

Tabla B3. Ficha técnica de equipos

Equipo	Casa matriz	Modelo	Descripción
Floculador	Phipps & Bird	7790-400	Voltaje 120 V AC 50 – 60 Hz
Espectrofotómetro	Hach	DR/2010	
pH meter	Schott	Blue line 24 pH	Presenta electrodo blue line 23 pH



ANEXO C. MODELO DE TABLA DE RECOLECCIÓN DE DATOS DE LABORATORIO

Fecha: \_\_\_\_\_

Coagulante: \_\_\_\_\_

Parámetros iniciales

pH: \_\_\_\_\_

Color: \_\_\_\_\_

Turbiedad: \_\_\_\_\_

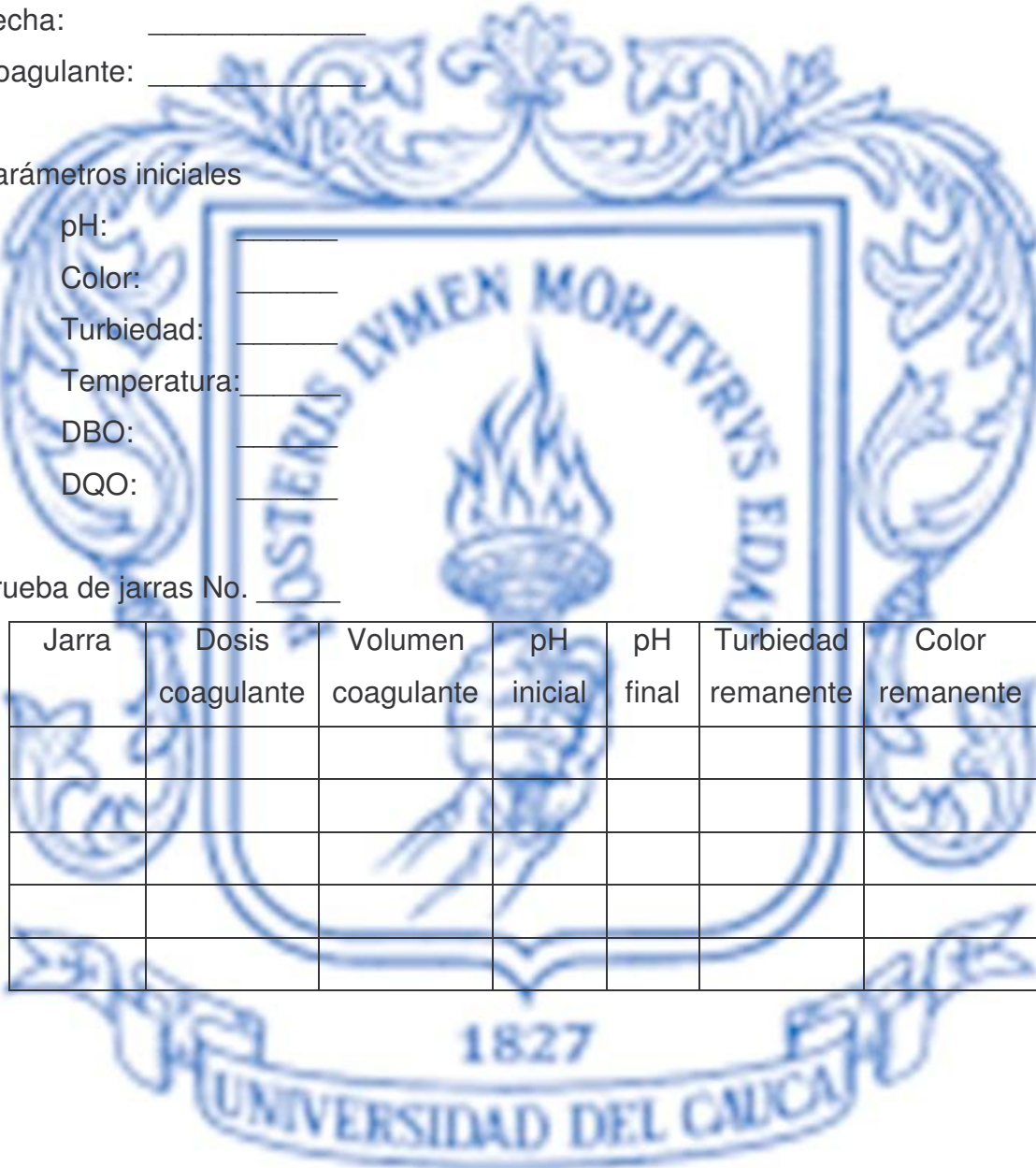
Temperatura: \_\_\_\_\_

DBO: \_\_\_\_\_

DQO: \_\_\_\_\_

Prueba de jarras No. \_\_\_\_\_

Jarra	Dosis coagulante	Volumen coagulante	pH inicial	pH final	Turbiedad remanente	Color remanente



ANEXO D. DETERMINACION DE CAUDAL

Tabla D1. Aforo de caudal rallería Santa Bárbara

Tiempo (s)	Volumen (cm <sup>3</sup> )	Caudal (cm <sup>3</sup> /s)	Caudal (L/s)
4,8	5844	1217,5	1,2
5,77	5000	866,6	0,9
7,17	5590	779,6	0,8
8,76	5510	629,0	0,6
6,48	7000	1080,2	1,1
5,45	6000	1100,9	1,1
5,51	6100	1107,1	1,1
5,37	6000	1117,3	1,1
7,13	7000	981,8	1,0
5,67	5390	950,6	1,0
5,84	5520	945,2	0,9
<b>Caudal medio</b>		<b>979,6</b>	<b>0,98</b>

ANEXO E. ESTUDIOS REALIZADOS UTILIZANDO CLORURO FERRICO COMO COAGULANTE.

Tabla E1. Resultados de la determinación de dosis óptima de Cloruro Férrico

Dosis FeCl <sub>3</sub> (mg/L)	Volumen FeCl <sub>3</sub> (mL)	Turbiedad remanente (UNT)	Remoción turbiedad (%)	Color remanente (PtCo)	Remoción color (%)	pH final
0	0	420	79,62	900	80	3,99
2	0,2	391	81,45	1600	68,63	4,02
5	0,5	347	83,54	600	88,24	4,03
8	0,8	429	79,65	850	83,33	4,03
10	1	439	79,17	1000	80,39	4,04
12	1,2	429	79,65	1000	80,39	4,02
14	1,4	373	82,31	1050	79,41	3,99
15	1,5	478	76,81	1200	73,33	4,02
20	2	487	76,37	1050	76,67	4,01
25	2,5	539	73,85	1150	74,44	3,97
30	3	518	74,87	500	88,89	3,96
35	3,5	497	75,89	1300	71,11	3,93
40	4	599	70,94	1500	66,67	4,05
45	4,5	613	70,26	1300	71,11	4,05
50	5	590	71,37	1350	70	4,03
55	5,5	654	68,27	1600	64,44	4,01
60	6	643	68,8	1750	61,11	3,98
65	6,5	623	69,77	1650	63,33	3,97



Tabla E2. Resultados determinación de gradientes y tiempo de mezcla lenta –  
FeCl<sub>3</sub>

Tiempo floculación (min)	G = 4.5 s <sup>-1</sup>		G = 13 s <sup>-1</sup>		G = 22 s <sup>-1</sup>		G = 35 s <sup>-1</sup>	
	Turbiedad (UNT)*	Color (PtCo)*	Turbiedad (UNT)*	Color (PtCo)*	Turbiedad (UNT)*	Color (PtCo)*	Turbiedad (UNT)*	Color (PtCo)*
5	465	1050	509	1600	511	1150	464	1300
10	476	1400	537	900	443	1000	453	800
15	441	1200	505	1600	459	1000	426	650
20	461	1150	512	1100	465	800	438	1050
25	455	1250	458	1050	446	950	455	1000
30	433	1150	340	950	472	800	487	900

(\*) Hace referencia, tanto a color como turbiedad, remanente

Tabla E3. Porcentaje de remoción de turbiedad y color según gradientes y tiempo  
de mezcla lenta – FeCl<sub>3</sub>

Tiempo floculación (min)	G = 4.5 s <sup>-1</sup>		G = 13 s <sup>-1</sup>		G = 22 s <sup>-1</sup>	
	Remoción Turbiedad	Remoción Color	Remoción Turbiedad	Remoción Color	Remoción Turbiedad	Remoción Color
	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)
5	77,94	79,41	75,85	68,63	75,76	77,45
10	77,42	72,55	74,53	82,35	78,98	80,39
15	79,08	76,47	76,04	68,63	78,23	80,39
20	78,13	77,45	75,71	78,43	77,94	84,31
25	78,42	75,49	78,27	79,41	78,84	81,37
30	79,46	77,45	83,87	81,37	77,61	84,31

Continuación Tabla E3.

tiempo floculación (min)	G = 35 s <sup>-1</sup>	
	Remoción Turbiedad (%)	Remoción Color (%)
5	77,99	74,51
10	78,51	84,31
15	79,79	87,25
20	79,22	79,41
25	78,42	80,39
30	76,90	82,35

Tabla E4. Determinación de tiempo de sedimentación – FeCl<sub>3</sub>.

Tiempo sedimentación (min)	Velocidad de sedimentación (cm/segundo)	Turbiedad remanente (UNT)	remoción turbiedad (%)	Color remanente (PtCo)	remoción color (%)	pH final
10	0,017	478	77,32	1450	71,57	3,78
15	0,011	439	79,17	1150	77,45	3,75
20	0,008	449	78,70	1150	77,45	3,75
25	0,007	449	78,70	1200	76,47	3,73
30	0,006	430	79,60	1200	76,47	3,75
35	0,005	419	80,12	920	81,96	3,75

Tabla E5. Determinación de la velocidad de sedimentación crítica

Carga superficial (m <sup>3</sup> /m <sup>2</sup> *día)	Velocidad sedimentación (cm/s)	Fracción remanente turbiedad (C = T <sub>f</sub> /T <sub>0</sub> )	Eficiencia remocional (R <sub>T</sub> )	Velocidad sedimentación crítica (cm/s)
5	0,0058	0,209	1,000	0,0045
7	0,0081	0,215	0,998	0,0062
9	0,0104	0,220	0,996	0,0080
11	0,0127	0,224	0,994	0,0098
13	0,0150	0,227	0,992	0,0116
15	0,0174	0,229	0,991	0,0134

Tabla E6. Comportamiento del FeCl<sub>3</sub> teniendo en cuenta las variables pH y dosis de coagulante (rango amplio de pH) – FeCl<sub>3</sub>

Dosis FeCl <sub>3</sub> (mg/L)	pH inicial	Turbiedad remanente (UNT)	Remoción turbiedad (%)	Color remanente (PtCo)	Remoción color (%)
0	4,4	351	82,60	1750	59,30
2	2,0	1780	11,75	4350	-1,16
3	2,0	1809	10,31	4000	6,98
4	2,0	1140	43,48	2950	31,40
5	2,0	1076	46,65	2900	32,56
6	2,0	901	55,33	3150	26,74
2	3,0	432	78,58	1100	74,42
3	3,0	260	87,11	2200	48,84
4	3,0	271	86,56	1200	72,09
5	3,0	549	72,78	2100	51,16
6	3,0	305	84,88	1100	74,42

Continuación tabla E6

Dosis FeCl <sub>3</sub> (mg/L)	pH inicial	Turbiedad remanente (UNT)	Remoción turbiedad (%)	Color remanente (PtCo)	Remoción color (%)
2	4,0	621	69,21	1700	60,47
3	4,0	447	77,84	1600	62,79
4	4,0	358	82,25	1250	70,93
5	4,0	338	83,24	450	89,53
6	4,0	271	86,56	950	77,91
2	5,0	775	61,58	2050	52,33
3	5,0	793	60,68	2550	40,70
4	5,0	837	58,50	2350	45,35
5	5,0	714	64,60	1250	70,93
6	5,0	634	68,57	1900	55,81
2	6,0	2021	-0,20	4050	5,81
3	6,0	2004	0,64	4150	3,49
4	6,0	2096	-3,92	4000	6,98
5	6,0	2172	-7,68	3500	18,60
6	6,0	2046	-1,44	3750	12,79
2	7,0	2048	-1,54	4000	6,98
3	7,0	2056	-1,93	4150	3,49
4	7,0	2050	-1,64	4400	-2,33
5	7,0	2198	-8,97	3450	19,77
6	7,0	2148	-6,49	4050	5,81
2	8,0	2008	0,45	3950	8,14
3	8,0	1908	5,40	4250	1,16
4	8,0	2086	-3,42	4800	-11,63
5	8,0	2126	-5,40	3750	12,79
6	8,0	2182	-8,18	5900	-37,21

Tabla E6.1 Eficiencia de Remoción de DQO para FeCl<sub>3</sub>.

Dosis FeCl <sub>3</sub> (mg/L)	pH inicial	DQO remanente	remoción DQO
0	4,4	3664,3	22,54
6	2,0	3462,7	26,81
2	3,0	2800,0	40,81
3	3,0	2756,9	41,73
4	3,0	2857,7	39,59
5	4,0	3009,0	36,4
6	4,0	2807,3	40,66

Tabla E7. Comportamiento del FeCl<sub>3</sub> teniendo en cuenta las variables pH y dosis de coagulante (estrechando el rango de pH).

Dosis (mg/L)	pH inicial	pH Final	Turbiedad remanente (UNT)	Remoción Turbiedad (%)	Color remanente (PtCo)	Remoción color (%)
2	2,5	2,41	831	67,28	1775	75,63
3	2,5	2,41	804	68,38	1675	77,11
4	2,5	2,44	761	70,05	1600	77,98
5	2,5	2,41	759	70,17	1600	78,09
6	2,5	2,44	792	68,90	1800	75,44
7	2,5	2,46	760	70,12	1725	76,49
2	3,0	3,00	1346	47,44	2300	68,44
3	3,0	3,00	1396	45,42	2400	67,10
4	3,0	2,99	1256	50,91	2275	68,84
5	3,0	2,97	1531	40,07	2425	66,81

Continuación Tabla E7.

Dosis (mg/L)	pH inicial	pH final	Turbiedad remanente (UNT)	Remoción Turbiedad (%)	Color remanente (PtCo)	Remoción color (%)
6	3,0	2,96	1464	42,65	2400	67,10
7	3,0	2,98	1735	32,13	2575	64,78
2	3,5	3,52	1867	26,90	2600	64,41
3	3,5	3,50	1752	31,49	2625	64,12
4	3,5	3,51	1819	28,82	2650	63,73
5	3,5	3,51	1712	33,10	2575	64,78
6	3,5	3,46	1789	30,01	2500	65,76
7	3,5	3,52	1848	27,59	2500	65,65
2	4,0	4,04	1954	23,38	2525	65,18
3	4,0	4,03	2025	20,60	2675	63,33
4	4,0	4,03	1957	23,27	2500	65,54
5	4,0	4,04	1925	24,61	1900	73,60
6	4,0	4,04	1954	23,45	2325	67,94
7	4,0	4,02	2056	19,37	2825	61,26
2	4,5	4,51	2026	20,48	3025	58,57
3	4,5	4,51	1981	22,39	3225	55,75
4	4,5	4,49	1857	27,31	3275	55,02
5	4,5	4,48	2014	21,03	2900	60,03
6	4,5	4,47	1943	23,89	3125	57,02
7	4,5	4,44	1914	25,05	4200	42,58

Tabla E7.1. Eficiencia de Remoción DBO y DQO utilizando FeCl<sub>3</sub> (Estrechando rango de pH)

Dosis (mg/L)	pH Inicial	DBO remanente (mg O <sub>2</sub> /L)	Remoción DBO (%)	Carga orgánica (mg O <sub>2</sub> /s)	DQO remanente (mg O <sub>2</sub> /L)	Remoción DQO (%)	Carga Total (mg O <sub>2</sub> /s)
4	4.5	2020.2	36.36	1979,8	5075.82	23.54	4974,3
4	4.0	2501.2	21.21	2451,2	4672.54	29.62	4579,1
4	3.5	2116.4	33.33	2074,1	4975.00	25.06	4875,5
4	3.0	2405.0	24.24	2356,9	5327.88	19.74	5221,3
7	2.5	2405.0	24.24	2356,9	4773.36	28.10	4677,9

Tabla E8. Determinación de eficiencias de remoción de DQO y DBO utilizando FeCl<sub>3</sub> como coagulante, por medio de correlaciones (rango estrecho de pH)

Dosis (mg/L)	pH inicial	pH final	Remoción Turbiedad (%)	Remoción color (%)	Remoción DQO <sup>1</sup> (%)	Remoción DBO (%)
2	2,5	2,41	67,28	75,63	34,73	48,28 <sup>2</sup>
3	2,5	2,41	68,38	77,11	33,41	49,14 <sup>2</sup>
4	2,5	2,44	70,05	77,98	32,74	51,27 <sup>2</sup>
5	2,5	2,41	70,17	78,09	31,89	55,65 <sup>2</sup>
6	2,5	2,44	68,9	75,44	30,73	66,94 <sup>2</sup>
7	2,5	2,46	70,12	76,49	28,10	24,57 <sup>3</sup>
2	3	3	47,44	68,44	31,34	27,70 <sup>4</sup>
3	3	3	45,42	67,1	29,70	28,53 <sup>4</sup>
4	3	2,99	50,91	68,84	19,74	26,43 <sup>4</sup>
5	3	2,97	40,07	66,81	27,70	27,17 <sup>4</sup>
6	3	2,96	42,65	67,1	27,17	27,43 <sup>4</sup>
7	3	2,98	32,13	64,78	26,35	27,32 <sup>4</sup>

Continuación tabla E8.

Dosis (mg/L)	pH inicial	pH final	Remoción Turbiedad (%)	Remoción color (%)	Remoción DQO <sup>1</sup> (%)	Remoción DBO (%)
2	3,5	3,52	26,9	64,41	30,51	26,99 <sup>4</sup>
3	3,5	3,5	31,49	64,12	29,10	28,34 <sup>4</sup>
4	3,5	3,51	28,82	63,73	25,06	33,79 <sup>2</sup>
5	3,5	3,51	33,1	64,78	27,38	27,72 <sup>4</sup>
6	3,5	3,46	30,01	65,76	26,78	25,65 <sup>4</sup>
7	3,5	3,52	27,59	65,65	26,24	25,06 <sup>4</sup>
2	4	4,04	23,38	65,18	30,41	25,13 <sup>4</sup>
3	4	4,03	20,6	63,33	28,90	26,39 <sup>4</sup>
4	4	4,03	23,27	65,54	29,62	24,55 <sup>4</sup>
5	4	4,04	24,61	73,6	27,54	26,99 <sup>3</sup>
6	4	4,04	23,45	67,94	26,72	29,91 <sup>3</sup>
7	4	4,02	19,37	61,26	25,97	32,02 <sup>3</sup>
2	4,5	4,51	20,48	58,57	30,01	32,23 <sup>4</sup>
3	4,5	4,51	22,39	55,75	28,48	35,88 <sup>4</sup>
4	4,5	4,49	27,31	55,02	23,54	37,33 <sup>4</sup>
5	4,5	4,48	21,03	60,03	26,95	29,17 <sup>3</sup>
6	4,5	4,47	23,89	57,02	26,23	31,34 <sup>3</sup>
7	4,5	4,44	25,05	42,58	25,07	33,78 <sup>3</sup>

$$^1\text{DQO} = ((k1*\text{Turbiedad}^{k2})+(k3*\text{Color}^{k4}))/((k5*\text{dosis}^{k6})+(k7*\text{pH}^{k8}))$$

$$^2\text{DBO} = k + k1*\text{Dosis} + k2*\text{pH} + k3*\text{Turbiedad} + k4*\text{Color}$$

$$^3\text{DBO} = k + k1*\text{DQO} + k2*\text{DQO}^2$$

$$^4\text{DBO} = k + k1*\text{DQO} + k2*\text{Turbiedad} + k3*\text{Color}$$



ANEXO F. ESTUDIOS REALIZADOS UTILIZANDO HIDROXICLORURO DE ALUMINIO (PAC) COMO COAGULANTE.

Tabla F1. Resultados de la determinación de dosis óptima de hidroxiclорuro de aluminio.

Dosis PAC (mg/L)	Volumen PAC (mL)	Turbiedad remanente (UNT)	Remoción Turbiedad (%)	Color remanente (PtCo)	Remoción Color (%)	pH final
0	0	483	79,53	1050	81,58	4,33
2	0,2	462	80,42	1150	79,82	4,32
5	0,5	457	80,64	800	85,96	4,32
8	0,8	445	81,14	850	85,09	4,33
10	1	437	81,48	500	91,23	4,33
12	1,2	395	83,26	600	89,47	4,33
20	2,0	379	83,94	900	84,21	4,28
25	2,5	304	87,12	450	92,11	4,28
30	3,0	260	88,98	300	94,74	4,28
35	3,5	220	90,68	300	94,74	4,28
40	4,0	240	89,83	300	94,74	4,26
45	4,5	231	90,21	300	94,74	4,27
50	5,0	154	93,47	400	92,98	4,22
55	5,5	179	92,42	440	92,28	4,22
60	6,0	187	92,08	460	91,93	4,19
65	6,5	186	92,12	480	91,58	4,19
70	7,0	177	92,50	500	91,23	4,17
75	7,5	187	92,08	620	89,12	4,15

Tabla F2. Resultados determinación de gradientes y tiempo de mezcla lenta -  
PAC

Tiempo Floculación (min)	G = 4.5 s <sup>-1</sup>		G = 13 s <sup>-1</sup>		G = 22 s <sup>-1</sup>		G = 35 s <sup>-1</sup>	
	Turbiedad (UNT)*	Color (PtCo)*	Turbiedad (UNT)*	Color (PtCo) *	Turbiedad (UNT)*	Color (PtCo) *	Turbiedad (UNT)*	Color (PtCo) *
5	124	380	156	380	173	600	210	840
10	118	360	158	380	180	340	246	520
15	110	340	163	720	204	840	268	660
20	103	240	165	480	221	480	260	680
25	103	280	166	720	270	580	252	620
30	97	360	185	620	248	540	253	720

(\*) Hace referencia, tanto a color como turbiedad, remanente

Tabla F3. Porcentajes de remoción de color y turbiedad obtenidos en la  
determinación de gradientes y tiempo de mezcla lenta – PAC.

Tiempo Floculación (min)	G = 4.5 s <sup>-1</sup>		G = 13 s <sup>-1</sup>		G = 22 s <sup>-1</sup>	
	Remoción Turbiedad (%)	Remoción Color (%)	Remoción Turbiedad (%)	Remoción Color (%)	Remoción Turbiedad (%)	Remoción Color (%)
5	94,75	93,33	93,02	93,21	92,26	89,29
10	95,00	93,68	92,93	93,21	91,95	93,93
15	95,34	94,04	92,71	87,14	90,88	85,00
20	95,64	95,79	92,62	91,43	90,12	91,43
25	95,64	95,09	92,58	87,14	87,92	89,64
30	95,89	93,68	91,73	88,93	88,91	90,36

Continuación Tabla F3.

Tiempo Floculación (min)	G = 35 s <sup>-1</sup>	
	Remoción Turbiedad (%)	Remoción Color (%)
5	90,61	85,00
10	89,00	90,71
15	88,01	88,21
20	88,37	87,86
25	88,73	88,93
30	88,69	87,14

Tabla F4. Determinación de tiempo de sedimentación utilizando PAC.

Tiempo sedimentación (min)	Velocidad de sedimentación (cm/minuto)	Turbiedad remanente (UNT)	Remoción turbiedad (%)	Color Remanente (PtCo)	Remoción color (%)	pH final
10	1,00	135	93,96	400	92,86	3,78
15	0,67	127	94,32	380	93,21	3,75
20	0,50	125	94,41	240	95,71	3,75
25	0,40	101	95,48	300	94,64	3,73
30	0,33	99	95,57	580	89,64	3,75
35	0,29	95	95,75	180	96,79	3,75

Tabla F5. Determinación velocidad de sedimentación crítica

Carga superficial (m <sup>3</sup> /m <sup>2</sup> *día)	Velocidad sedimentación (cm/s)	Fracción remanente turbiedad (C = T <sub>f</sub> /T <sub>0</sub> )	Eficiencia remocional (R <sub>T</sub> )	Velocidad sedimentación crítica (cm/s)
5	0,0058	0,043	1,000	0,0045
7	0,0081	0,048	0,998	0,0062
9	0,0104	0,052	0,997	0,0080
11	0,0127	0,055	0,995	0,0098
13	0,0150	0,058	0,994	0,0116
15	0,0174	0,060	0,993	0,0134

Tabla F6. Comportamiento del PAC teniendo en cuenta las variables pH y dosis.

Dosis PAC (mg/L)	pH inicial	pH final	Turbiedad remanente (UNT)	Remoción Turbiedad (%)	Color remanente (PtCo)	Remoción Color (%)
40	2.0	2.04	299	87.20	800	84.62
45	2.0	2.06	340	85.45	500	90.38
50	2.0	2.09	432	81.51	650	87.50
55	2.0	2.14	483	79.32	1250	75.96
60	2.0	2.09	532	77.23	800	84.62
65	2.0	2.08	508	78.25	2150	58.65
40	3.0	2.97	128	94.52	229	95.60
45	3.0	2.97	100	95.72	195	96.25
50	3.0	2.97	99	95.76	181	96.52
55	3.0	2.96	86	96.32	169	96.75
60	3.0	2.96	87	96.28	173	96.67
65	3.0	2.93	84	96.40	20	99.62

Continuación tabla F6.

Dosis PAC (mg/L)	pH inicial	pH final	Turbiedad remanente (UNT)	Remoción Turbiedad (%)	Color remanente (PtCo)	Remoción Color (%)
70	3.0	3.11	56	96.87	168	95.20
75	3.0	3.11	55	96.92	171	95.11
80	3.0	3.14	71	96.03	201	94.26
40	4.0	3.92	265	88.66	458	91.19
45	4.0	3.88	173	92.59	322	93.81
50	4.0	3.87	179	92.34	335	93.56
55	4.0	3.84	162	93.07	252	95.15
60	4.0	3.83	134	94.26	236	95.46
65	4.0	3.84	158	93.24	273	94.75
70	4.0	3.90	41	97.71	122	96.51
75	4.0	3.88	41	97.71	122	96.51
80	4.0	3.87	41	97.71	122	96.51
40	5.0	4.77	629	73.07	1000	80.77
45	5.0	4.70	460	80.31	250	95.19
50	5.0	4.67	496	78.77	750	85.58
55	5.0	4.67	437	81.29	200	96.15
60	5.0	4.63	356	84.76	1600	69.23
65	5.0	4.62	285	87.80	512	90.15
40	6.0	5.16	718	69.26	2150	58.65
45	6.0	5.17	611	73.84	1100	78.85
50	6.0	5.18	563	75.90	850	83.65
55	6.0	5.21	502	78.51	900	82.69
60	6.0	5.24	479	79.49	800	84.62
65	6.0	5.29	381	83.69	500	90.38

Continuación Tabla F6.

Dosis PAC (mg/L)	pH inicial	pH final	Turbiedad remanente (UNT)	Remoción Turbiedad (%)	Color remanente (PtCo)	Remoción Color (%)
40	7.0	5.89	2001	13.91	4750	8.65
45	7.0	5.82	941	59.72	3000	42.31
50	7.0	5.75	802	65.67	2200	57.69
55	7.0	5.67	597	74.44	1850	64.42
60	7.0	5.68	567	75.73	1500	71.15
65	7.0	5.44	449	80.78	1950	62.50

Tabla F6.1. Eficiencia de remoción de DQO utilizando PAC.

Dosis PAC (mg/L)	pH inicial	pH final	DQO remanente	Remoción DQO (%)
40	2.0	2.04	4420,48	4,36
65	3.0	2.93	2807,33	39,26
55	4.0	3.84	2882,10	37,65
70	4.0	3.90	2663.9	42.37
65	5.0	4.62	2588,32	44,00
65	6.0	5.29	2789,97	39,64
65	7.0	5.44	3268,87	29,28

Tabla F7. Comportamiento del PAC teniendo en cuenta las variables pH y dosis de coagulante (estrechando el rango de pH)

Dosis PAC (mg/L)	pH inicial	pH final	Turbiedad remanente (UNT)	Remoción Turbiedad (%)	Color remanente (PtCo)	Remoción Color (%)
45	3.0	3.11	70	96.09	230	93.43
50	3.0	3.13	85	95.25	260	92.57
55	3.0	3.15	72	95.97	238	93.20
60	3.0	3.17	70	96.09	232	93.37
65	3.0	3.18	83	95.36	262	92.51
70	3.0	3.20	77	95.69	251	92.83
45	3.5	3.51	60	96.64	201	94.26
50	3.5	3.50	48	97.32	178	94.91
55	3.5	3.51	47	97.37	181	94.83
60	3.5	3.52	46	97.43	174	95.03
65	3.5	3.54	50	97.20	195	94.43
70	3.5	3.55	52	97.09	258	92.63
70	3.5	3.57	67	96.25	208	94.06
75	3.5	3.57	135	92.45	315	91.00
80	3.5	3.57	107	94.02	311	91.11
45	4.0	3.94	59	96.70	154	95.60
50	4.0	3.94	51	97.15	133	96.20
55	4.0	3.93	54	96.98	144	95.89
60	4.0	3.90	45	97.48	131	96.26
65	4.0	3.91	49	97.26	139	96.03
70	4.0	3.88	42	97.65	133	96.20
45	4.5	4.33	79	95.58	198	94.34
50	4.5	4.33	74	95.86	188	94.63

Continuación Tabla F7.

Dosis PAC (mg/L)	pH inicial	pH final	Turbiedad remanente (UNT)	Remoción Turbiedad (%)	Color remanente (PtCo)	Remoción Color (%)
55	4.5	4.31	62	96.53	165	95.29
60	4.5	4.30	53	97.04	148	95.77
65	4.5	4.29	45	97.48	128	96.34
70	4.5	4.28	49	97.26	140	96.00
70	4.5	4.32	86	95.19	210	94.00
75	4.5	4.32	81	95.47	209	94.03
80	4.5	4.33	75	95.81	197	94.37

Tabla F7.1. Eficiencia de Remoción DBO y DQO utilizando PAC (Estrechando rango de pH)

Dosis (mg/L)	pH Inicial	DBO remanente	Remoción DBO (%)	Carga orgánica (mg O <sub>2</sub> /s)	DQO remanente	Remoción DQO (%)	Carga Total (mg O <sub>2</sub> /s)
45	3.0	1115,92	63,75	1093,6	2613,53	37.92	2561,3
60	3.5	1144,78	62,81	1121,9	2563,12	39.12	2511,9
70	3.5	942,76	69,38	923,9	2159,83	48.70	2116,6
70	4.0	1135,16	63,13	1112,5	2235,45	46.90	2190,7
65	4.5	1298,7	57,81	1272,7	2411,88	42.71	2363,6
80	4.5	981,24	68,13	961,6	2210,24	47.50	2166,0



Tabla F8. Determinación de eficiencias de remoción de DQO y DBO utilizando PAC como coagulante, por medio de correlaciones (rango estrecho de pH)

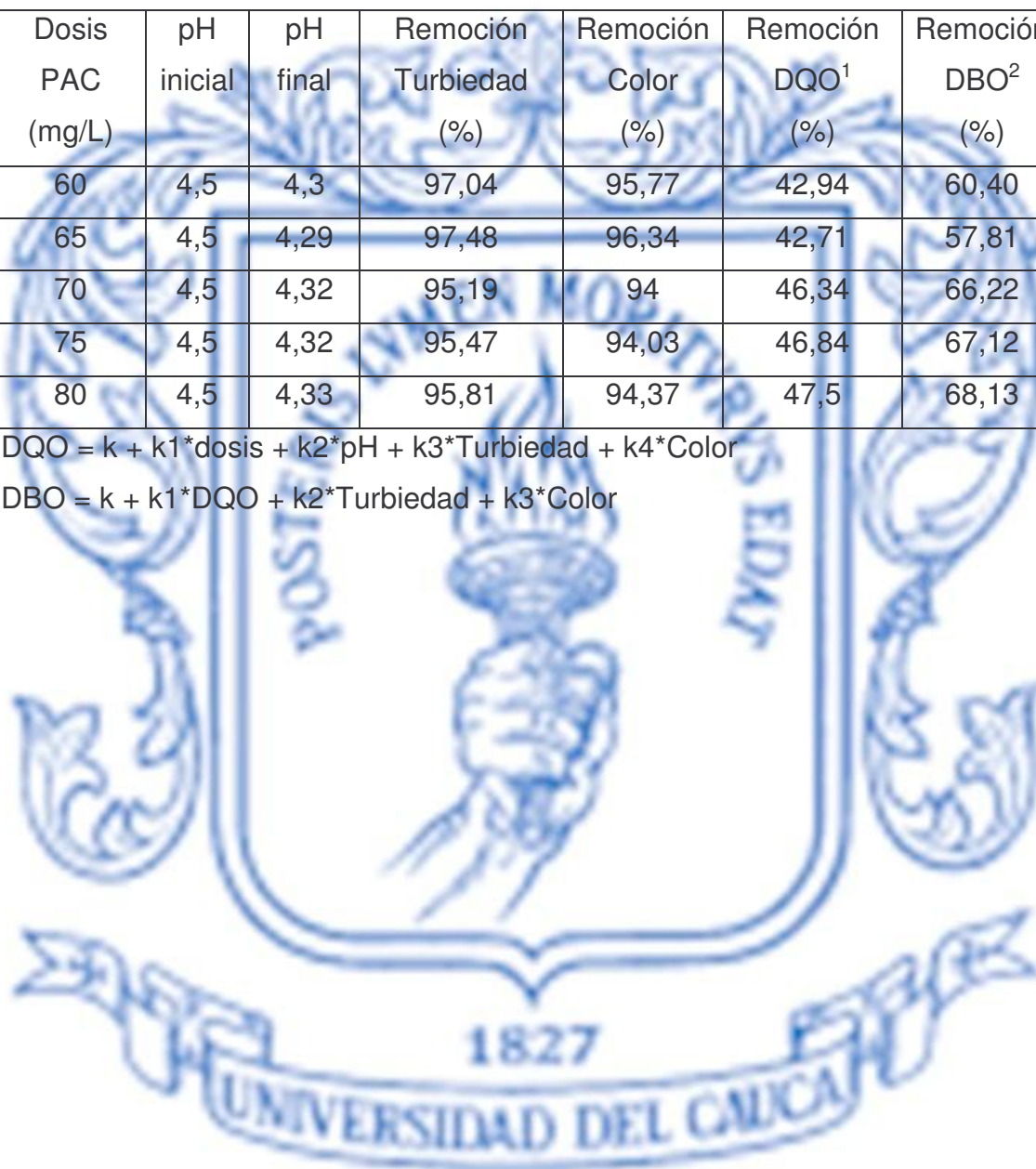
Dosis PAC (mg/L)	pH inicial	pH final	Remoción Turbiedad (%)	Remoción Color (%)	Remoción DQO <sup>1</sup> (%)	Remoción DBO <sup>2</sup> (%)
45	3	3,11	96,09	93,43	37,92	63,75
50	3	3,13	95,25	92,57	38,76	66,77
55	3	3,15	95,97	93,2	39,35	66,20
60	3	3,17	96,09	93,37	40,53	66,65
65	3	3,18	95,36	92,51	41,79	69,58
70	3	3,2	95,69	92,83	42,74	69,70
45	3,5	3,51	96,64	94,26	37,50	61,83
50	3,5	3,5	97,32	94,91	38,23	61,19
55	3,5	3,51	97,37	94,83	39,08	62,30
60	3,5	3,52	97,43	95,03	39,12	62,81
65	3,5	3,54	97,2	94,43	41,00	65,06
70	3,5	3,57	96,25	94,06	48,7	69,38
75	3,5	3,57	92,45	91	48,37	74,20
80	3,5	3,57	94,02	91,11	45,79	75,46
45	4	3,94	96,7	95,6	40,02	58,13
50	4	3,94	97,15	96,2	41,23	57,52
55	4	3,93	96,98	95,89	42,18	59,17
60	4	3,9	97,48	96,26	42,81	59,23
65	4	3,91	97,26	96,03	44,04	60,63
70	4	3,88	97,65	96,2	46,9	63,13
45	4,5	4,33	95,58	94,34	40,33	61,14
50	4,5	4,33	95,86	94,63	41,35	61,32
55	4,5	4,31	96,53	95,29	42,12	60,64

Continuación Tabla F8.

Dosis PAC (mg/L)	pH inicial	pH final	Remoción Turbiedad (%)	Remoción Color (%)	Remoción DQO <sup>1</sup> (%)	Remoción DBO <sup>2</sup> (%)
60	4,5	4,3	97,04	95,77	42,94	60,40
65	4,5	4,29	97,48	96,34	42,71	57,81
70	4,5	4,32	95,19	94	46,34	66,22
75	4,5	4,32	95,47	94,03	46,84	67,12
80	4,5	4,33	95,81	94,37	47,5	68,13

<sup>1</sup>  $DQO = k + k_1 \cdot \text{dosis} + k_2 \cdot \text{pH} + k_3 \cdot \text{Turbiedad} + k_4 \cdot \text{Color}$

<sup>2</sup>  $DBO = k + k_1 \cdot DQO + k_2 \cdot \text{Turbiedad} + k_3 \cdot \text{Color}$



ANEXO G. OBJETIVO DE LAS PRUEBAS DE JARRAS.

Tabla G1. Objetivo de las pruebas de jarras

Prueba No.	Coagulante	OBJETIVO	Fecha de realización
1	FeCl <sub>3</sub>	Dosis optima	19 / 04 / 05
2	FeCl <sub>3</sub>	Dosis optima	19 / 04 / 05
3	FeCl <sub>3</sub>	Dosis optima	19 / 04 / 05
4	FeCl <sub>3</sub>	Gradiente y tiempo de mezcla lenta	19 / 04 / 05
5	FeCl <sub>3</sub>	Gradiente y tiempo de mezcla lenta	19 / 04 / 05
6	FeCl <sub>3</sub>	Gradiente y tiempo de mezcla lenta	19 / 04 / 05
7	FeCl <sub>3</sub>	Gradiente y tiempo de mezcla lenta	19 / 04 / 05
8	FeCl <sub>3</sub>	Tiempo de sedimentación	19 / 04 / 05
9	PAC	Dosis optima	26 / 04 / 05
10	PAC	Dosis optima	26 / 04 / 05
11	PAC	Dosis optima	26 / 04 / 05
12	PAC	Gradiente y tiempo de mezcla lenta	26 / 04 / 05
13	PAC	Gradiente y tiempo de mezcla lenta	26 / 04 / 05
14	PAC	Gradiente y tiempo de mezcla lenta	26 / 04 / 05
15	PAC	Gradiente y tiempo de mezcla lenta	26 / 04 / 05
16	PAC	Tiempo de sedimentación	26 / 04 / 05
17	FeCl <sub>3</sub>	pH vs Dosis (Rango amplio de pH)	28 / 04 / 05
18	FeCl <sub>3</sub>	pH vs Dosis (Rango amplio de pH)	28 / 04 / 05
19	FeCl <sub>3</sub>	pH vs Dosis (Rango amplio de pH)	28 / 04 / 05
20	FeCl <sub>3</sub>	pH vs Dosis (Rango amplio de pH)	28 / 04 / 05
21	FeCl <sub>3</sub>	pH vs Dosis (Rango amplio de pH)	28 / 04 / 05
22	FeCl <sub>3</sub>	pH vs Dosis (Rango amplio de pH)	28 / 04 / 05
23	PAC	pH vs Dosis (Rango amplio de pH)	02 / 05 / 05

Continuación Tabla G1.

Prueba No.	Coagulante	OBJETIVO	Fecha de realización
24	PAC	pH vs Dosis (Rango amplio de pH)	02 / 05 / 05
25	PAC	pH vs Dosis (Rango amplio de pH)	02 / 05 / 05
26	PAC	pH vs Dosis (Rango amplio de pH)	02 / 05 / 05
27	PAC	pH vs Dosis (Rango amplio de pH)	02 / 05 / 05
28	PAC	pH vs Dosis (Rango amplio de pH)	02 / 05 / 05
29	PAC	pH vs Dosis (Rango amplio de pH)	17 / 05 / 05
30	PAC	pH vs Dosis (Rango estrecho de pH)	17 / 05 / 05
31	PAC	pH vs Dosis (Rango estrecho de pH)	17 / 05 / 05
32	PAC	pH vs Dosis (Rango estrecho de pH)	17 / 05 / 05
33	PAC	pH vs Dosis (Rango estrecho de pH)	17 / 05 / 05
34	PAC	pH vs Dosis (Rango estrecho de pH)	17 / 05 / 05
35	FeCl <sub>3</sub>	pH vs Dosis (Rango estrecho de pH)	19 / 05 / 05
36	FeCl <sub>3</sub>	pH vs Dosis (Rango estrecho de pH)	19 / 05 / 05
37	FeCl <sub>3</sub>	pH vs Dosis (Rango estrecho de pH)	19 / 05 / 05
38	FeCl <sub>3</sub>	pH vs Dosis (Rango estrecho de pH)	19 / 05 / 05
39	FeCl <sub>3</sub>	pH vs Dosis (Rango estrecho de pH)	19 / 05 / 05
40	FeCl <sub>3</sub>	pH vs Dosis (Rango estrecho de pH)	01 / 06 / 05
41	FeCl <sub>3</sub>	pH vs Dosis (Rango estrecho de pH)	01 / 06 / 05
42	FeCl <sub>3</sub>	pH vs Dosis (Rango estrecho de pH)	01 / 06 / 05
43	FeCl <sub>3</sub>	pH vs Dosis (Rango estrecho de pH)	01 / 06 / 05
44	FeCl <sub>3</sub>	pH vs Dosis (Rango estrecho de pH)	01 / 06 / 05

ANEXO H. EFICIENCIAS OBTENIDAS EN EL ESTUDIO DEL FILTRO ANAEROBIO (RALLANDERÍA SANTA BÁRBARA)\*

Tabla H1. Eficiencias de remoción del filtro anaerobio rallandería Santa Bárbara

Fecha	Eficiencias de remoción SST (%)	Eficiencias de remoción DQO (%)	Eficiencias de remoción DBO (%)
15/04/2005	60,97	16,56	29,63
22/04/2005			
28/04/2005	62,75	42,54	43,18
03/05/2005		38,53	
05/05/2005	42,06	51,99	42,06
12/05/2005		23,48	
14/05/2005	18,65		20,83
17/05/2005	57,32	15,04	
19/05/2005	64,61	48,65	
<b>PROMEDIO</b>	<b>51,06</b>	<b>33,83</b>	<b>33,93</b>

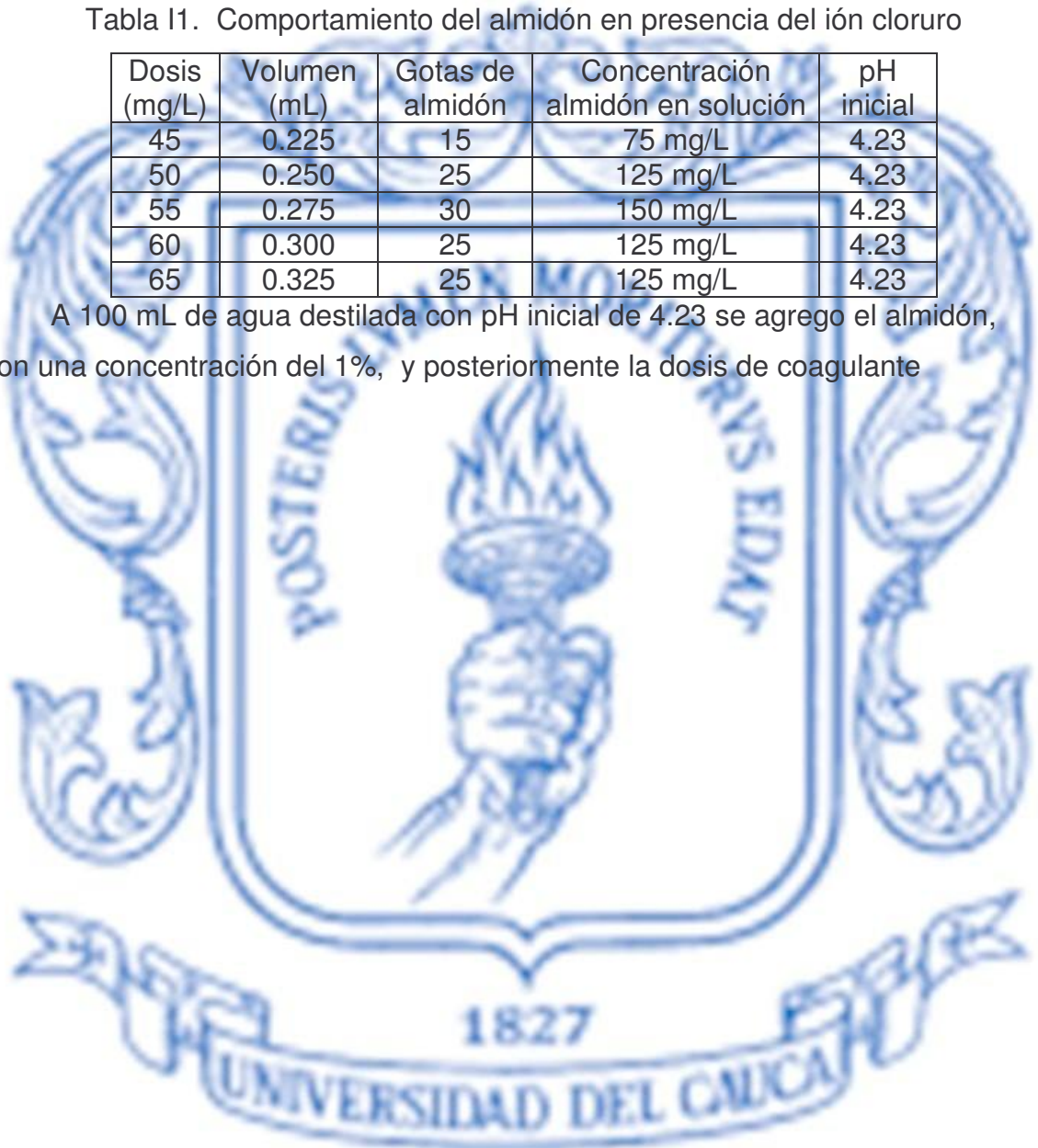
\* Datos reportados por Camilo Paz y Jair Piamba, estudiantes de Ingeniería Ambiental, Universidad del Cauca

ANEXO I. Prueba de laboratorio comportamiento del almidón en presencia del ión cloruro.

Tabla I1. Comportamiento del almidón en presencia del ión cloruro

Dosis (mg/L)	Volumen (mL)	Gotas de almidón	Concentración almidón en solución	pH inicial
45	0.225	15	75 mg/L	4.23
50	0.250	25	125 mg/L	4.23
55	0.275	30	150 mg/L	4.23
60	0.300	25	125 mg/L	4.23
65	0.325	25	125 mg/L	4.23

A 100 mL de agua destilada con pH inicial de 4.23 se agrego el almidón, con una concentración del 1%, y posteriormente la dosis de coagulante



## ANEXO J. FOTOGRAFÍAS

Fotografía J.1. Almacenamiento de la raíz



Fotografía J.2. Descascarillado de la raíz



Fotografía J.3. Tamizado del almidón.



Fotografía J.4. Canales de sedimentación.





Fotografía J.5. Tanques de fermentación.



Fotografía J.6. Secado del almidón.



Fotografía J.7. Canal de sedimentación de mancha.



Fotografía J.8. Muestreo a la salida del canal de sedimentación de mancha.



Fotografía J.9. Almacenamiento de afrecho



Fotografía J.10. Secado del afrecho.



Fotografía J.11. Montaje prueba de jarras



Fotografía J.12. Prueba de DBO.



Fotografía J.13. Equipo floculador

