

**PROPUESTA TECNOLÓGICA PARA EL TRATAMIENTO DE AGUAS  
RESIDUALES PROVENIENTES DEL PROCESO DE PULIDO EN MASA  
REALIZADO EN LA EMPRESA DE GALVANOPLASTIA FANTAXIAS S.A.S.**

**MARÍA CAROLINA RUIZ CAÑAS**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICOQUÍMICAS  
ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA  
BUCARAMANGA  
2011**

**PROPUESTA TECNOLÓGICA PARA EL TRATAMIENTO DE AGUAS  
RESIDUALES PROVENIENTES DEL PROCESO DE PULIDO EN MASA  
REALIZADO EN LA EMPRESA DE GALVANOPLASTIA FANTAXIAS S.A.S.**

**MARÍA CAROLINA RUIZ CAÑAS**

**Trabajo de grado presentado como requisito para optar el título de:  
Ingeniero Químico**

**Director:**

**HUMBERTO ESCALANTE HERNÁNDEZ  
Ph. D. Ingeniero Químico**

**Tutor:**

**EDUARDO NIÑO RUIZ  
Ingeniero Civil  
Gerente empresa FANTAXIAS LTDA**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTAD DE INGENIERÍAS FISCOQUÍMICAS  
ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA  
BUCARAMANGA  
2011**

## **AGRADECIMIENTOS**

Deseo expresar mis más sinceros agradecimientos a la empresa FANTAXIAS S.A.S. por su colaboración económica y técnica.

Al Doctor Humberto Escalante, Director de proyecto por su apoyo incondicional.

Al Ingeniero Eduardo Niño Ruiz, Gerente de la empresa FANTAXIAS S.A.S. por darme la oportunidad de realizar esta práctica y por la confianza depositada en mí.

Al Ingeniero Javier Quiroga por aportarme con sus conocimientos y su valiosa experiencia las directrices para la realización de este trabajo de grado.

Al Químico Alejandro Niño por su colaboración en la realización de las pruebas de laboratorio.

Al Jefe de aseguramiento de la calidad, Luis Ignacio Acuña por apoyarme en todo momento, asegurarme los recursos y trabajar incansablemente para que se pudiera hacer realidad gran parte del trabajo. Hago extensivo el agradecimiento a su hermano Pablo Cesar Acuña quién me colaboró y orientó en el inicio del trabajo.

A Dairon Ramírez por su colaboración en las diferentes modificaciones y equipos necesarios para el desarrollo del trabajo y a todos los operarios que siguieron mis recomendaciones y me apoyaron en especial a Jhonatan Rodríguez y a Jaiver Martínez.

A mis amigos y compañeros Jairo Suárez, Javier Pérez, Sandra Toledo y Mauricio Casas quienes me colaboraron en el laboratorio.

A mi hermanita Tatiana quien me acompañó y ayudó en todo momento y a mis padres quienes fueron mi mayor apoyo y orientación profesional para llevar a cabo este trabajo.

## DEDICATORIA

*A mis padres, hermana y todas las personas que contribuyeron a hacer realidad mis sueños, fortalecieron mis esperanzas y me impulsaron a ser cada día mejor.*

*A Dios por hacer de mí una persona honesta, sincera, responsable y con una visión acertada de lo que quiero en la vida.*

*A las personas que me han ofrecido oportunidades y han creído en mí para penetrar en el bello y maravilloso mundo del saber.*

## TABLA DE CONTENIDO

	Pág.
<u>CAPÍTULO I: INTRODUCCIÓN</u> .....	17
<u>PULIMENTO MECÁNICO DE PIEZAS DE ZAMAC EN FANTAXIAS S.A.S.</u> ...	19
<u>PROCESOS FÍSICOS PARA EL TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES</u>	19
Desbaste .....	19
Desengrase .....	19
Mezclado .....	20
Floculación .....	20
Sedimentación .....	20
Filtración .....	21
 <u>PROCESOS QUÍMICOS PARA EL TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES</u>	
.....	21
Precipitación química .....	21
Neutralización .....	22
 <u>CAPÍTULO II: METODOLOGÍA Y DISEÑO EXPERIMENTAL</u> .....	23
 <u>EVALUACIÓN EXPERIMENTAL DE LA CARGA DE LODOS PRODUCIDOS</u> .....	23
 <u>CARACTERIZACIÓN FÍSICOQUÍMICA DE LODOS Y ARPM PRODUCIDAS</u> .....	25
 <u>ESTUDIO EXPERIMENTAL DE LA PRECIPITACIÓN QUÍMICA PARA EL TRATAMIENTO DE LAS ARPM</u> .....	26
 <u>PRUEBA DE PRECIPITACIÓN DE AGUAS A ESCALA INDUSTRIAL</u> .....	26
 <u>DISEÑO BÁSICO DE INGENIERÍA PARA EL TRATAMIENTO DE ARPM PARA FANTAXIAS S.A.S.</u> .....	27

<u>SELECCIÓN DE LA MEJOR ALTERNATIVA DE FLOCULACIÓN PARA FANTAXIAS</u> .....	27
Turbidez final .....	28
Tiempo de sedimentación .....	29
pH .....	29
<u>CAPÍTULO III: RESULTADOS Y ANÁLISIS</u> .....	30
<u>EVALUACIÓN EXPERIMENTAL DE LAS CARGAS DE LODOS PRODUCIDOS</u> .....	30
<u>CARACTERIZACIÓN FÍSICOQUÍMICA DE LODOS Y ARPM PRODUCIDAS</u> .....	31
<u>ESTUDIO EXPERIMENTAL DE LA PRECIPITACIÓN QUÍMICA PARA EL TRATAMIENTO DE LA ARPM</u> .....	32
<u>PRUEBA DE PRECIPITACIÓN DE AGUAS A ESCALA INDUSTRIAL</u> .....	34
<u>DISEÑO BÁSICO DE INGENIERÍA PARA EL TRATAMIENTO DE ARPM PARA FANTAXIAS S.A.S.</u> .....	35
Capacidad de la planta .....	36
Unidades de operación. ....	36
Unidad de cribado.....	36
Unidad de presedimentación. ....	36
Unidad de desengrase.....	36
Unidad de mezcla rápida. ....	36
Unidad de floculación - sedimentación. ....	37
Unidad de filtración. ....	37
Dimensiones de los equipos .....	37

Costo de reactivos para realizar el proceso a escala industrial .....	37
<u>SELECCIÓN DE LA MEJOR ALTERNATIVA DE FLOCULACIÓN PARA FANTAXIAS</u> .....	38
<u>CAPÍTULO IV: CONCLUSIONES</u> .....	40
<u>CAPÍTULO V: REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS</u> .....	41

## LISTA DE TABLAS

	<b>Pág.</b>
<b>Tabla 1.</b> Resumen de las reacciones ocurridas para los coagulantes.....	6
<b>Tabla 2.</b> Volumen de coagulante en solución al 1% p/p agregado a la muestra de ARPM.....	10
<b>Tabla 3.</b> Descriptores de calidad de los criterios técnicos.....	12
<b>Tabla 4.</b> Descriptores de calidad de los criterios económicos y ambientales...	13
<b>Tabla 5.</b> Descriptores de calidad del criterio social .....	13
<b>Tabla 6.</b> Balance de masa general del PPM .....	14
<b>Tabla 7.</b> Resultados de la caracterización de lodos .....	15
<b>Tabla 8.</b> Caracterización física de la ARPM .....	16
<b>Tabla 9.</b> Resultados de la prueba de jarras con SA .....	16
<b>Tabla 10.</b> Resultados de la prueba de jarras con SF .....	17
<b>Tabla 11.</b> Resultados de la prueba de jarras con CF .....	17
<b>Tabla 12.</b> Consolidado de las condiciones de operación para el proceso de floculación de la ARPM.....	18
<b>Tabla 13.</b> Especificaciones tanque presedimentador y floculador – sedimentador.....	21
<b>Tabla 14.</b> Especificaciones de la unidad de filtración.....	21
<b>Tabla 15.</b> Consumo de reactivos para cada una de las alternativas .....	21
<b>Tabla 16.</b> Calificación de alternativas de acuerdo a los criterios de evaluación	22

## LISTA DE FIGURAS

	<b>Pág.</b>
<b>Figura 1.</b> Proceso de elaboración de herrajes a partir de Zamac en FANTAXIAS.....	7
<b>Figura 2.</b> Diagrama de flujo del balance de masa del proceso .....	14
<b>Figura 3.</b> Diagrama general del tratamiento de ARPM en la empresa FANTAXIAS S.A.S.....	19

## LISTA DE CUADROS

	<b>Pág.</b>
<b>Cuadro 1.</b> Resumen del pH adecuado para la coagulación y criterios generales de dosificación para las principales sustancias químicas usadas en coagulación .....	6
<b>Cuadro 2.</b> Propiedades fisicoquímicas de las materias primas utilizadas en el PPM .....	8
<b>Cuadro 3.</b> Propiedades químicas y composición de las materias primas usadas en vibradoras .....	9
<b>Cuadro 4.</b> Procedimiento experimental de la prueba de precipitación de aguas a escala industrial .....	11

## LISTA DE GRÁFICAS

**Pág.**

**Gráfica 1.** Comparación de la variación de la turbiedad en función de la cantidad de coagulante.....17

**Gráfica 2.** Comparación de los coagulantes con respecto a la turbiedad final.19

## RESUMEN

**TÍTULO:** PROPUESTA TECNOLÓGICA PARA EL TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES PROVENIENTES DEL PROCESO DE PULIDO EN MASA REALIZADO EN LA EMPRESA DE GALVANOPLASTIA FANTAXIAS S.A.S.<sup>†</sup>

**AUTORA:** María Carolina Ruiz Cañas.<sup>‡</sup>

**PALABRAS CLAVES:** Aguas residuales, pulido en masa, vertimientos líquidos, precipitación química de metales, coagulante, diseño básico, efluentes.

### DESCRIPCIÓN:

Las aguas residuales vertidas durante el proceso de pulido en masa realizado en la empresa FANTAXIAS S.A.S., se evaluaron mediante un balance macroscópico del contenido de materiales presentes en la misma y un análisis microscópico de los efluentes, incluyendo los parámetros fisicoquímicos más relevantes (pH, turbiedad), para la evaluación de su carga contaminante con respecto a la normativa Colombiana correspondiente a los vertimientos líquidos a un cuerpo de agua o a un alcantarillado (Decreto 1594 del 26 de junio de 1984).

Partiendo de la normativa ambiental y de los análisis, se concluyó que las aguas residuales exceden los límites máximos permisibles para su vertimiento al alcantarillado, bajo estos criterios, se procedió a evaluar la tecnología de precipitación química para el tratamiento de dichos efluentes.

La alternativa de floculación para FANTAXIAS S.A.S. corresponde al tratamiento con el uso del coagulante sulfato de aluminio. Esta selección fue el resultado de una ponderación de los criterios técnicos, económicos, ambientales y sociales por medio de la matriz de valoración ponderal.

Finalmente, se presenta un diseño de ingeniería básico de la planta de tratamiento en la que se consideraron como criterios de diseño la velocidad de flujo horizontal, carga superficial, caudal diario del proceso, carga de lodo residual y las pruebas a escala laboratorio e industrial realizadas con los efluentes del proceso de pulimento en masa de la empresa. Debido a la discontinuidad del proceso y a la variación de tecnologías en la fuente de los vertimientos, se recomienda realizar con frecuencia la caracterización fisicoquímica de las aguas residuales afluentes al sistema de tratamiento, y los efluentes con el fin de asegurar el adecuado funcionamiento de la planta.

---

<sup>†</sup>Proyecto de Grado

<sup>‡</sup> Facultad de Ingenierías Físicoquímicas. Escuela de Ingeniería Química.  
Director: Ph. D. Humberto Escalante Hernández; Tutor: Ing. Eduardo Niño Ruiz

## ABSTRACT

**TITLE:** TECHNOLOGICAL PROPOSAL FOR THE TREATMENT OF EFFLUENT FROM THE POLISHING MASS PROCESS IN THE COMPANY FANTAXIAS S.A.S.

**AUTHOR:** María Carolina Ruiz Cañas

**KEY WORDS:** Wastewater, polishing mass, liquid waste, chemical precipitation, coagulant, basic design, effluents.

### DESCRIPTION:

Wastewater discharged during the polishing process Mass held in the company FANTAXIAS S.A.S., assessed by a macroscopic balance of content of materials present in it and an analysis microscopic effluent, including parameters most important physicochemical (pH, turbidity) for assessment of pollution load with respect to Colombian legislation for the dumping fluids to a body of water or sewer (Decree 1594 of June 26, 1984).

From environmental regulations and the analysis, concluded that exceed the limits wastewater maximum permissible for dumping into sewer, under these criteria, we proceeded to assess technology chemical precipitation to treat these effluents.

The flocculation alternative to FANTAXIAS S.A.S. corresponds to treatment with the use of coagulant aluminum sulfate. This selection was the result of a weight of technical, economic, environmental and social criteria through social matrix weight rating.

Finally, we present a basic engineering design treatment plant that were considered design criteria like speed for horizontal flow, surface charge, daily flow of the process, load sewage sludge, laboratory scale tests made with industrial process effluents polish mass in the enterprise. Due to the discontinuity of the process and technology change the source of the discharges, it is recommended often the physicochemical characterization of wastewater effluent treatment system and effluent in order to ensure adequate plant operation.

---

<sup>†</sup>Work degree

<sup>‡</sup> Faculty of Engineering Physicochemical. School of Chemical Engineering. Director: Ph. D. Humberto Escalante Hernández; Tutor: Ing. Eduardo Niño Ruiz

## **CAPÍTULO I: INTRODUCCIÓN**

FANTAXIAS S.A.S., es una empresa Santandereana productora de herrajes fundidos y troquelados a partir de aleación Zamac. La elaboración de las piezas incluye las etapas de fundido, pulimento, desengrase, enjuague, neutralizado, activado, recubrimiento, pasivado y secado; cada una de las etapas de estos procesos genera diversos efluentes. El pulimento de las piezas es un proceso físico, que utiliza un abrasivo y por fricción se eliminan asperezas o defectos de las superficies. En esta etapa también se realiza un lavado con el fin de eliminar grasas y finos del pulido.

En general este sector industrial está compuesto de empresas de tamaño relativamente pequeño y en la mayoría de los casos el costo económico de la depuración de sus vertidos es alto.

El poder de contaminación de los vertidos se puede reducir por: cambios en el proceso, modificación en el equipo industrial, segregación de vertidos, mezcla de vertidos, recuperación de subproductos y control de los vertidos. A medida que se incrementa la población mundial, aumenta la necesidad de proveer sistemas de tratamiento o renovación que permitan eliminar los riesgos para la salud y minimizar los daños al medio ambiente [14].

Las aguas residuales industriales se deben tratar individualmente antes de ser vertidas al medio, ya que cada empresa genera residuos que poseen características muy diferentes y es más fácil tratarlas por separado que en conjunto. Además, si se arrojan aguas residuales crudas a un río o cuerpo de agua excediendo la capacidad de asimilación de contaminantes del agua receptora, ésta disminuirá su calidad para el uso del hombre, fauna y flora.

En FANTAXIAS S.A.S. (de ahora en adelante FANTAXIAS) se procesan en promedio 675,75 Kg de piezas/día, generando en promedio 29,97 Kg/día y 3.839,4 Kg/día de lodo y agua de lavado respectivamente<sup>†</sup>. Estos lodos debido a su naturaleza generarían un grave problema ambiental si se vertieran, es por esto que actualmente la empresa, con el fin de optimizar sus procesos productivos y cumplir con la normativa ambiental que hace referencia al Decreto 1594 de 1984, requiere de la implementación de un tratamiento de las Aguas Residuales del Pulimento en Masa (ARPM).

Uno de los problemas que enfrenta la industria de galvanoplastia es la remoción de metales pesados y cianuros de sus aguas residuales. El Departamento de Ingeniería Química de la Facultad de Ciencias Químicas de la Universidad Autónoma de Nuevo León en México, evaluó la reducción de metales pesados presentes en aguas residuales de la industria galvánica mediante precipitación química con sulfato de aluminio, sulfato ferroso, sulfato férrico y cloruro férrico, utilizando para la experimentación un equipo de prueba de jarras [17]. En Brasil es utilizada la precipitación química y la flotación por aire disuelto para la remoción de metales pesados presentes en RILES [4]. Por otra parte para la remoción de cromo, zinc, hierro y níquel de agua residual de la industria Galvánica de Chile, se utilizó sosa para ajustar el pH y cloruro férrico como coagulante en un equipo de prueba de jarras [6].

FANTAXIAS está interesada en disminuir el nivel de contaminación de sus efluentes, con el objeto de cumplir con los requerimientos ambientales que exige la ley Colombiana. Por lo anterior el objetivo principal del presente trabajo es investigar y analizar las diferentes tecnologías de tratamiento para estos efluentes y posteriormente realizar un diseño de ingeniería básico para el tratamiento de las ARPM.

<sup>†</sup> Fuente: La autora. Control de cargas vibratoras realizado del 2 al 10 de septiembre de 2010.

## **PULIMENTO MECÁNICO DE PIEZAS DE ZAMAC EN FANTAXIAS S.A.S.**

FANTAXIAS para la elaboración de los herrajes utiliza el proceso que tradicionalmente este sector industrial ha venido empleando durante años. Este proceso comienza con la fundición del Zamac, seguido del moldeo de las piezas, pretratamiento mecánico, desengrase, decapado, neutralizado, baño de recubrimiento, lavado, pasivado, secado y empaçado [15].

El proceso de Pulimento de las Piezas en Masa (PPM) es importante ya que de él depende la efectividad del baño de recubrimiento. Este proceso tiene como objetivos: a) Desbarbar las piezas (quitar la rebaba) mediante fricción con chips plásticos, b) Pulir, quitar filos y alisar la superficie de la pieza, c) Limpiar la pieza y suavizarla y d) Abrillantar la pieza mediante chips especiales de madera.

Dentro de la industria de electrorecubrimientos la etapa de pulido genera gran cantidad de agua con elevadas concentraciones de compuestos tóxicos. La contaminación más relevante de este tipo de actividades es la debida a la presencia en sus vertidos de metales pesados como Ni, Zn, Cu y Al entre otros [7].

## **PROCESOS FÍSICOS PARA EL TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES**

**Desbaste:** Eliminación de sólidos gruesos y sedimentables por retención en rejás (aberturas mayores de 25 mm) y tamices (superiores a 6 mm). Las rejás separan sólidos grandes y los tamices eliminan sólidos en suspensión. La limpieza de las rejás y tamices se puede realizar mecánica o manualmente [12].

**Desengrase:** Se realiza en tanques pequeños de flotación donde la grasa sale a la superficie, y es retenida mientras el agua aclarada sale por una descarga inferior. Este desengrase se realiza en sedimentadores, en las que las unidades adaptadas en los sedimentadores (primarios en general), permiten recoger el

material flotante en dispositivos, para llevarlo posteriormente a las unidades de tratamiento de lodos [10].

**Mezclado:** El mezclado o mezclado rápido es el proceso mediante el cual los reactivos se dispersan, uniforme y rápidamente en el agua. Es la operación física más importante que incide en la eficiencia de la dosis del coagulante. En la coagulación la reacción química se efectúa en menos de 0,1 s; en consecuencia el mezclado debe ser tan instantáneo y completo como sea posible. Puede efectuarse dentro de un tanque con un mezclador de eje vertical, o dentro de un tubo, usando sistemas especializados de mezcla. Otros métodos que pueden usarse son los canales de Parshall, los saltos hidráulicos, los canales con mamparas o el mezclado con aire [9].

**Floculación:** Es la operación en la que las partículas en suspensión aumentan su superficie de contacto; debido a la adición de productos químicos en los procesos de precipitación química. En la floculación las partículas se unen por la acción de puentes de los pequeños aglomerados (producto de la coagulación) para construir partículas lo suficientemente grandes y pesadas (flocs) para su posterior sedimentación [16]. En la floculación el mezclado debe ser controlado para garantizar que los choques tengan la suficiente energía de modo que las partículas se adhieran entre sí; de otro modo si éstas se mezclan a altas velocidades se obtienen tamaños de flocs pequeños que dificultan la sedimentación.

**Sedimentación:** La sedimentación es la separación de los componentes del agua en dos fases: una fase sólida y una líquida. La fase sólida está compuesta de lodos formados por partículas de sólidos suspendidos más pesados que el agua; los cuales por gravedad se depositan en el fondo. La fase líquida está formada por el agua y los compuestos en disolución. La sedimentación se emplea generalmente en el presedimentador, después del tratamiento químico de

precipitación con coagulantes y en la concentración de sólidos en los espesadores de lodos [11].

**Filtración:** Es el proceso mediante el cual el agua fluye lentamente atravesando un lecho de medios granulares de arena, antracita y grava. Cuando el agua atraviesa el medio, las partículas quedan atrapadas debido a mecanismos de: intercepción, floculación, colado y sedimentación [9].

## **PROCESOS QUÍMICOS PARA EL TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES**

**Precipitación química:** Consiste en añadir ciertos coagulantes al agua residual para conseguir que estos alteren el estado físico de los sólidos disueltos o en suspensión y se produzca una eliminación por sedimentación. La coagulación es la reacción que ocurre en el momento de la adición de los coagulantes al agua para aglutinar las partículas suspendidas en conglomerados o grumos [1]. La coagulación es la desestabilización eléctrica de las partículas de tal manera que se aproximen unas a otras lo suficiente como para ser atraídas.

Mediante la precipitación química puede obtenerse un agua casi exenta de sólidos en suspensión y en estado coloidal. En general se elimina del 80 al 90% de la materia total en suspensión, del 40 al 70% de la DBO (Demanda Biológica de Oxígeno) y del 30 al 60% de DQO (Demanda Química de Oxígeno) [15].

Los productos químicos más utilizados como agentes precipitantes son: sulfato de aluminio, sulfato ferroso y cloruro férrico. En el Cuadro 1 se resumen los criterios generales de dosificación de estas sustancias químicas y el pH óptimo para la coagulación y en la Tabla 1 se muestran las reacciones ocurridas cuando al agua residual se le agregan los coagulantes: sulfato de aluminio, sulfato ferroso, sulfato férrico y cloruro férrico.

**Cuadro 1.** Resumen del pH adecuado para la coagulación y criterios generales de dosificación para las principales sustancias químicas usadas en coagulación <sup>[13]</sup>.

COAGULANTE	pH	CRITERIOS GENERALES DE DOSIFICACIÓN
<b>Sulfato de aluminio</b> (Al <sub>2</sub> (SO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub> )	4 – 7	Concentración de la solución de 60 g/l o 6% Tiempo mínimo de retención de la cámara de disolución de 5 min. Tuberías de PVC, polietileno, polipropileno o material similar, y aplicación por gravedad.
<b>Sulfato ferroso</b> (FeSO <sub>4</sub> * 7H <sub>2</sub> O)	> 8,5	Se recomienda en solución al 6% con tiempo de retención de 5 min en la cámara de disolución; tuberías de plástico, de caucho, de plomo o de acero inoxidable tipo 304.
<b>Cloruro férrico</b> (FeCl <sub>3</sub> )	3,5 – 6,5 y > 8,5	Se recomiendan concentraciones mayores del 2,5 % y emplear tuberías de plástico o de acero recubierto de caucho.

**Tabla 1.** Resumen de las reacciones ocurridas para los coagulantes <sup>[5]</sup>.

COAGULANTE	REACCIÓN CON LA ALCALINIDAD NATURAL (Alcalinidad de carbonato ácido de calcio y magnesio)
<b>Sulfato de aluminio</b> [Al <sub>2</sub> (SO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub> ]	Al <sub>2</sub> (SO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub> + 3Ca(HCO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> → 2 Al(OH) <sub>3</sub> + 3 CaSO <sub>4</sub> + 6 CO <sub>2</sub>
<b>Sulfato ferroso [FeSO<sub>4</sub>]</b>	FeSO <sub>4</sub> + Ca(HCO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> → Fe(OH) <sub>2</sub> + CaSO <sub>4</sub> + CO <sub>2</sub> Seguido de: Fe(OH) <sub>2</sub> + O <sub>2</sub> + H <sub>2</sub> O → Fe(OH) <sub>3</sub>
<b>Cloruro férrico [FeCl<sub>3</sub>]</b>	2 FeCl <sub>3</sub> + 3 Ca(HCO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> → 3 CaCl <sub>2</sub> + 2 Fe(OH) <sub>3</sub> + 6 CO <sub>2</sub>

†La selección del coagulante y la dosis exacta necesaria en cada caso, sólo puede ser determinada mediante ensayos de laboratorio (Prueba de jarras).

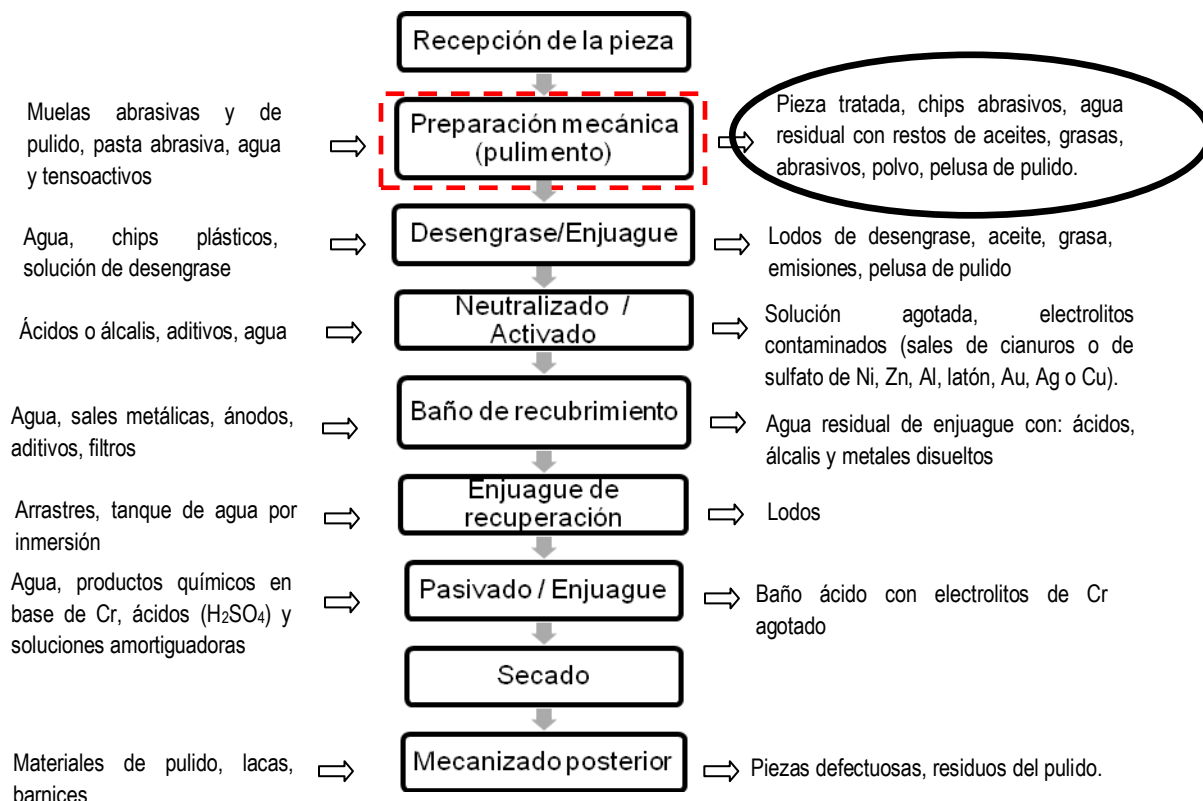
**Neutralización:** Es el ajuste de pH mediante adición de álcali o ácido a un residuo, para obtener un rango de pH cercano a 7,0. En aguas de consumo humano el pH debe estar entre 5 y 9; en aguas dulces, para vida acuática, debe estar entre 6,5 y 9 y en el mar, para la vida acuática marina, debe oscilar entre 6,5 y 8,5 [15].

## CAPÍTULO II: METODOLOGÍA Y DISEÑO EXPERIMENTAL

La evaluación de la tecnología de precipitación química del ARPM, de la empresa FANTAXIAS se llevó a cabo mediante el desarrollo de las siguientes etapas: a) Evaluación experimental de la carga de lodos producidos, b) Caracterización fisicoquímica de lodos y ARPM producidas, c) Estudio experimental de la precipitación química para el tratamiento de las ARPM, d) Prueba de precipitación de aguas a escala industrial, e) Diseño básico de ingeniería para el tratamiento de ARPM para FANTAXIAS y f) Selección de la mejor alternativa de floculación.

### EVALUACIÓN EXPERIMENTAL DE LA CARGA DE LODOS PRODUCIDOS

Las etapas del proceso de elaboración de herrajes a partir de Zamac, en la empresa FANTAXIAS se presentan en la Figura 1.



**Figura 1.** Proceso de elaboración de herrajes a partir de Zamac en FANTAXIAS.

**Fuente:** FANTAXIAS S.A.S.

En el proceso de PPM se utilizan tres vibradoras (máquinas circulares para el tratamiento de superficies modelo CM, con capacidad máx. de 100 Kg y agitación hasta de 1800 rpm) que operan continuamente. Para realizar el análisis macroscópico del proceso de PPM se recopilaron datos experimentales en la planta de: carga de piezas a pulir, consumo de agua, materias primas (control de carga de las vibradoras: tensoactivos, agentes de pulimento y chips abrasivos), volumen de lodos generados y piezas pulidas. El agua consumida se evaluó mediante un contador magnético (de ½ in, marca Elster) instalado en la tubería; llevando un registro desde el día 10 de agosto de 2010 hasta el 18 de Septiembre de 2010. El control de carga de las vibradoras se llevó a cabo mediante una balanza electrónica (Lexus - Matrix), en la cual se pesaron las materias primas antes y después del proceso. A partir de la primera carga operacional de la empresa se hizo seguimiento para obtener información sobre la duración de ciclo de trabajo, cantidad de materias primas agregadas al proceso, desgaste de las piezas y piedras abrasivas.

El PPM consta de tres etapas: a) Fricción mecánica de las piezas con los chips plásticos en la vibradora, b) Adición del desbarbante A-11 y tensoactivo TH para desbastar filos y asperezas y retirar grasas, c) Lavado. En los Cuadros 2 y 3 se muestran las características de las materias primas usadas en el proceso de PPM.

**Cuadro 2.** Propiedades fisicoquímicas de las materias primas utilizadas en el PPM.

MATERIAS PRIMAS	PROPIEDADES FISICOQUÍMICAS					
	Ph	Peso específico efectivo	Color	Estado físico	Punto de inflamación	Solubilidad en agua
<b>Chips plásticos</b>	-----	1,28	Rosado	Sólido	> 370°C	Insoluble
<b>Tensoactivo TH</b>	7,2	-----	Amarillo	Líquido viscoso	10° Baumé	-----
<b>Desbarbante A-11:</b>	10,7	-----	-----	Polvo Blanco deslizador	-----	Parcial (soluble 1% en agua)

**Fuente:** Fichas técnicas de FANTAXIAS.

**Cuadro 3.** Propiedades químicas y composición de las materias primas usadas en vibradoras.

MATERIAS PRIMAS	Propiedades Químicas		
	Incompatibilidad	Composición Química	Composición porcentual
<b>Chips plásticos</b>	-----	Mezcla de resinas poliéster y abrasivos de origen natural y sintético completamente polimerizado. Tiene en su mayoría compuestos como urea, alúmina y corindón.	SiO <sub>2</sub> = 63% Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> = 33% Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> = 1,0% Na <sub>2</sub> O-K <sub>2</sub> O = 2,0% CaO = 0,2% MgO= 0,2% TiO <sub>2</sub> = 0,8%
<b>TH (Tensoactivo)</b>	-----	Compuesto principalmente de sales sódicas de los sulfatos de alquilo, derivados de los alcoholes de cadena larga.	-----
<b>Desbarbante: A-11</b>	Ácidos	<b>Datos físico-químicos:</b> Mezcla de sales sódicas alcalinas y abrasivos naturales seleccionados.	Composición: sodio meta silicato Pentahidrato (NaSi · 5 H <sub>2</sub> O) Fosforo: 1,8%
<b>Aleación Zamac</b>	-----	Único componente de las piezas.	Zn = 93,051% Al = 3,46% Mg = 0,123% Cu = 3,35% Pb =0,0029% Cd =0,0012% Fe =0,0086% Sn =0,0007%

Fuente: Fichas técnicas de FANTAXIAS.

### CARACTERIZACIÓN FÍSICOQUÍMICA DE LODOS Y ARPM PRODUCIDAS

Teniendo en cuenta los elementos que contenían las materias primas usadas en el PPM se realizó la caracterización fisicoquímica de las muestras de aguas y lodos residuales, en el laboratorio de consultas industriales de la Universidad Industrial de Santander (UIS), evaluando las siguientes variables para cada tipo:

- a) Lodo: pH, grasas y aceites, humedad, densidad, zinc, aluminio, cobre, hierro, nitrógeno total, calcio, sodio, fósforo, sílice y magnesio.
- b) Agua residual: conductividad, pH y turbidez.

A partir de esta caracterización se analizó el cumplimiento de estos vertimientos con la normativa ambiental vigente, Decreto 1594 de 1984.

## ESTUDIO EXPERIMENTAL DE LA PRECIPITACIÓN QUÍMICA PARA EL TRATAMIENTO DE LAS ARPM

En esta etapa se evaluaron tres coagulantes: Sulfato de Aluminio (SA), Sulfato Ferroso (SF) y Cloruro Férrico (CF). La técnica utilizada fue la prueba de jarras. Las pruebas se realizaron por duplicado en el laboratorio de prácticas de la Escuela de Química de la UIS. Se utilizó en cada prueba 800 ml de agua del proceso de pulimento y cinco diferentes volúmenes de agente floculante (Tabla 2). Los tiempos de mezclado rápido y floculación se tomaron según la norma de esta prueba. Como variable de entrada se tuvo en cuenta las diferentes concentraciones de agente precipitante y como variable de salida el porcentaje de remoción de sólidos (referido a la turbiedad).

**Tabla 2.** Volumen de coagulante en solución al 1% p/p agregado a la muestra de ARPM.

TIPO DE COAGULANTE	VOLUMEN DE COAGULANTE [ml] A 800 ml ARPM					
	Exp. 1	Exp. 2	Exp. 3	Exp. 4	Exp. 5	Exp. Control
Sulfato de aluminio	55	60	65	70	75	0
Sulfato ferroso	50	52	54	56	58	0
Cloruro férrico	35	40	45	50	55	0

Fuente: La autora.

### PRUEBA DE PRECIPITACIÓN DE AGUAS A ESCALA INDUSTRIAL

Para analizar el comportamiento de las diferentes alternativas de remoción de metales pesados de las ARPM, se realizaron pruebas con los coagulantes SA y CF a las mejores condiciones de operación obtenidas a escala laboratorio (Cuadro 4). Para realizar las pruebas en la planta de FANTAXIAS fue necesario incluir en el tanque de almacenamiento de ARPM, una rejilla y una trampa de grasas con el fin de obtener agua residual con un mínimo de grasa y lodo precipitado para la prueba de coagulación. Así mismo el lodo residual producto de la presedimentación se dispuso en un lecho de secado de arena para su acondicionamiento final.

**Cuadro 4.** Procedimiento experimental de la prueba de precipitación de aguas a escala industrial.

<b>METODOLOGÍA</b>	<b>DESCRIPCIÓN</b>
<b>Preparación de la solución</b>	Solución de CF: 1230 g y 15 litros de agua. Solución de SA: 2000 g y 15 litros de agua.
<b>Dosificación de la solución</b>	Se agregó coagulante en solución a la muestra de ARPM por 12 horas continuas, durante un periodo de 10 horas. Se abrió la llave del tanque dosificador hasta el límite demarcado en la tubería, garantizando que la mezcla se realizara en el sitio de descarga del agua proveniente de la trampa de grasas.
<b>Frecuencia de preparación de la solución</b>	Dos veces al día.
<b>Toma de muestras</b>	Se tomaron 250 ml del agua del tanque donde se realizó la coagulación, cada hora, registrando las horas en las que se tomaron las muestras en la planilla de control del pozo.
<b>Parámetros evaluados</b>	pH y turbiedad

Fuente: La autora.

## **DISEÑO BÁSICO DE INGENIERÍA PARA EL TRATAMIENTO DE ARPM PARA FANTAXIAS S.A.S.**

Para cada uno de los agentes precipitantes se realizó un diseño básico para implementar en la empresa FANTAXIAS. En este diseño se evaluó: a) Tiempo mínimo de sedimentación para cada tipo de coagulante, b) Carga diaria de piezas al proceso de pulimento, c) Flujo diario de ARPM, d) Volumen de lodos residuales del proceso de coagulación y e) Condiciones de descarga de las aguas coaguladas.

## **SELECCIÓN DE LA MEJOR ALTERNATIVA DE FLOCULACIÓN PARA FANTAXIAS**

En la selección de las alternativas de floculación de ARPM se consideraron criterios técnicos (turbiedad, tiempo de sedimentación y pH), económicos (cantidad de coagulante y costo de reactivos), ambientales (productos residuales) y sociales (riesgos para la salud). Para la ponderación de los criterios se aplicó la metodología de la Matriz de Valoración Ponderal (MVP); la cual permite definir un modelo matemático de la siguiente forma:

$$I = (0,43)*CT + (0,29)*CE + (0,14)*CA+ (0,14)*CS \quad \text{Ecuación 1}$$

Donde:

- I: Indicador de calidad de la tecnología.
- CT: Sumatoria de subcriterios técnicos.
- CE: Sumatoria de subcriterios económicos.
- CA: Sumatoria de subcriterios ambientales.
- CS: Sumatoria de subcriterios sociales.

La ponderación de los criterios [8] se realizó teniendo en cuenta la cantidad e importancia de los subcriterios que contenían, dando igual valor a cada parámetro evaluado. El criterio técnico tiene el mayor peso debido a que es el más relevante para el cumplimiento de los objetivos del presente trabajo. El factor económico le sigue en importancia por la viabilidad de la propuesta para su realización en la empresa. Por otro lado los criterios ambientales y sociales se tuvieron en cuenta por el compromiso ambiental y responsabilidad social adquiridos por la empresa.

Los descriptores de calidad de los criterios técnicos, económicos, ambientales y sociales se presentan en las Tablas 3, 4 y 5.

**Tabla 3.** Descriptores de calidad de los criterios técnicos.

CALIFICACIÓN CUANTITATIVA	CALIFICACIÓN CUALITATIVA	DESCRIPCIÓN
0	Insuficiente	Excede la legislación ambiental
1	No aceptable	Se acerca al límite superior de la norma
2	Aceptable	Cumple la norma
3	Sobresaliente	Es más bajo que el establecido por la norma
4	Excelente	Se acerca a la norma de agua potable

**Fuente:** La autora.

**Turbidez final:** Indicador de la presencia de partículas en suspensión; según el Decreto 1594/84 la turbiedad máxima para vertimientos corresponde a 30 Unidades Nefralométricas de Turbiedad (NTU).

**Tiempo de sedimentación:** Las alternativas se calificaran según la desviación positiva respecto al tiempo máximo permitido (30 min).

**pH:** El Decreto 1594 de 1984 establece el rango permisible de 6 a 9.

**Tabla 4.** Descriptores de calidad de los criterios económicos y ambientales.

<b>CALIFICACIÓN CUANTITATIVA</b>	<b>CALIFICACIÓN CUALITATIVA</b>	<b>DESCRIPCIÓN</b>
0	Insuficiente	100 % mayor de la cantidad mín.
1	No aceptable	75 % mayor de la cantidad mín.
2	Aceptable	50 % mayor de la cantidad mín.
3	Sobresaliente	25 % mayor de la cantidad mín.
4	Excelente	Mínima cantidad o costo

**Fuente:** La autora.

**Tabla 5.** Descriptores de calidad del criterio social.

<b>CALIFICACIÓN CUANTITATIVA</b>	<b>CALIFICACIÓN CUALITATIVA</b>	<b>DESCRIPCIÓN</b>
0	Insuficiente	Con una muy corta exposición pueden causar muerte o daño permanente aún en caso de atención médica inmediata.
1	No aceptable	Bajo una corta exposición pueden causar daños temporales o permanentes aunque se dé una pronta atención médica.
2	Aceptable	Bajo una corta exposición pueden causar daños temporales.
3	Sobresaliente	Bajo su exposición causan irritación pero sólo daños residuales menores en ausencia de tratamiento médico.
4	Excelente	No ofrecen peligros a la salud.

**Fuente:** La autora.

## CAPÍTULO III: RESULTADOS Y ANÁLISIS

### EVALUACIÓN EXPERIMENTAL DE LAS CARGAS DE LODOS PRODUCIDOS

En la Figura 2 se muestra el diagrama de flujo del proceso de pulimento.



**Figura 2.** Diagrama de flujo del balance de masa del proceso

**Fuente:** La autora.

**Datos iniciales:** Desgaste por carga de las piezas y chips abrasivos 1,726 % y 2,877 % respectivamente y densidad del agua a temperatura ambiente: 1000 kg/cm<sup>3</sup>.

En la Tabla 6 se presentan los flujos correspondientes al balance de masa del PPM.

**Tabla 6.** Balance de masa general del PPM.

FLUJO	DESCRIPCIÓN	UNIDADES [kg/ día]	CARACTERÍSTICAS
F <sub>1</sub>	Piezas	675 ,7525	Aleación de Zamac
F <sub>2</sub>	Agua de lavado	3 839, 400	Suministrada de la red urbana
F <sub>3</sub>	Chips plásticos	636, 225	Urea, alúmina (Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ) y corindón (CaO)
F <sub>4</sub>	Desbarbante	3,200	Tensoactivos sólidos y abrasivos
F <sub>5</sub>	TH	0,100	Tensoactivo
F <sub>6</sub>	Pieza final	663,859 3	Aleación de Zamac pulida
F <sub>7</sub>	Chips abrasivos	617,9208	Urea, alúmina (Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ) y corindón (CaO)
F <sub>8</sub>	Lodo	3 872, 8974	33,4974 Kg de material particulado 3 839, 400 Kg de agua residual

**Fuente:** La autora.

## CARACTERIZACIÓN FÍSICOQUÍMICA DE LODOS Y ARPM PRODUCIDAS

Los resultados de la caracterización de los lodos se presentan en la Tabla 7.

**Tabla 7.** Resultados de la caracterización de lodos.

PARÁMETRO	RESULTADO	UNIDAD	NORMA <sup>†</sup>
pH	11,0	-----	6 - 9
Grasas y Aceites	691.200	mg /L	20
Humedad	88,0	%	-----
Densidad	1,08	g/ml	-----
Zinc	74,84	mg /L	10
Aluminio	418,5	mg /L	5
Cobre	103,14	mg /L	3
Hierro	19,548	mg /L	25
Nitrógeno Total	21,03	g/L	-----
Calcio	12,3	mg/kg	-----
Sodio	69,2	mg/kg	-----
Fósforo	146,7	mg/kg	-----
Sílice	1,2	%	-----
Magnesio	4,212	mg /L	15

<sup>†</sup> Norma ambiental Colombiana para vertimientos (Decreto 1594 de 1984).

**Fuente:** Laboratorio de consultas industriales de la UIS.

De acuerdo a la caracterización de los lodos se observa que los parámetros cantidad de Zn, Al y Cu exceden la legislación ambiental en un 748.4, 8370 y 3438% respectivamente; esto se debe a que en el PPM se desprende una pequeña capa de aleación Zamac (principal componente de las piezas). El alto contenido de grasas y aceites procede de la etapa de lavado de la pieza.

El lodo residual contiene otros elementos no contemplados por la norma producto de las materias primas utilizadas en el PPM, como el chip abrasivo (N y Ca) y desbarbantes (Na, P y Si).

En la Tabla 8 se presentan los resultados de la caracterización de la ARPM.

**Tabla 8.** Caracterización física de la ARPM.

FECHA DE TOMA DE MUESTRA	pH	CONDUCTIVIDAD [μS/cm]	TEMPERATURA [°C]	TURBIEDAD [NTU]
12 de julio de 2010	9,30	1547	25	403
27 de julio de 2010	9,81	1238	24, 2	373
6 de Agosto de 2010	9,65	1580	24,5	363
9 de agosto de 2010	9,77	1465	24,5	450
18 de agosto de 2010	9,17	1340	24,5	380
17 de septiembre de 2010	9,50	1458	24,5	570
<b>ARPM PROMEDIO</b>	9,53	1438	24,6	423,2
<b>NORMA</b>	6 – 9	1200	< 30	30

Fuente: La autora.

A partir de los valores establecidos por la normatividad se pueden relacionar los datos obtenidos de la siguiente forma:

$$\frac{pH}{pH\ normal} = 1,27, \frac{Conductividad}{Conductividad\ estándar} = 1,198, \frac{Turbiedad}{Turbiedad\ estándar} = 14,5$$

Se observa que la turbiedad es el parámetro más relevante en cuanto a impacto ambiental ya que excede aproximadamente 15 veces los estándares de regulación para la disposición de estos desechos. Por lo anterior este parámetro se seleccionó como la variable de mayor influencia en la decisión de la cantidad de floculante necesario para acondicionar la ARPM.

## ESTUDIO EXPERIMENTAL DE LA PRECIPITACIÓN QUÍMICA PARA EL TRATAMIENTO DE LA ARPM

En las Tablas 9, 10 y 11 se presentan los resultados de la prueba de jarras para cada una de las alternativas de coagulante.

**Tabla 9.** Resultados de la prueba de jarras con SA.

SULFATO DE ALUMINIO		Exp. 1	Exp. 2	Exp. 3	Exp. 4	Exp. 5	Control
<b>Variables de entrada</b>	Volumen de coagulante por 800 ml de ARPM [ml]	55	60	65	70	75	0
<b>Variables de salida</b>	Turbiedad [NTU]	5	4,87	2,99	1,04	5	80
	pH	6,46	6,53	6,71	6,78	6,8	7,2
	Volumen de lodo [ml]	26	19	28	49	47	55
<b>Indirectos</b>	% de lodo generado	52,73	65,45	49,09	10,91	14,55	0
	% Remoción	91,18	91,41	94,73	98,17	91,18	0

Fuente: La autora.

**Tabla 10.** Resultados de la prueba de jarras con SF.

<b>SULFATO FERROSO</b>		<b>Exp. 1</b>	<b>Exp. 2</b>	<b>Exp. 3</b>	<b>Exp. 4</b>	<b>Exp. 5</b>	<b>Control</b>
<b>VARIABLES DE ENTRADA</b>	Volumen de coagulante por 800 ml de ARPM [ml]	50	52	54	56	58	0
<b>VARIABLES DE SALIDA</b>	Turbiedad [NTU]	36	30	27	25	30	80
	pH	7,8	8,2	8,15	8,13	8,2	7,2
	Volumen de lodo [ml]	36	42	48	45,5	41	55
<b>INDIRECTOS</b>	% de lodo generado	34,55	23,64	12,73	17,27	25,45	0
	%Remoción	55	62,5	66,25	68,75	62,5	0

Fuente: La autora.

**Tabla 11.** Resultados de la prueba de jarras con CF.

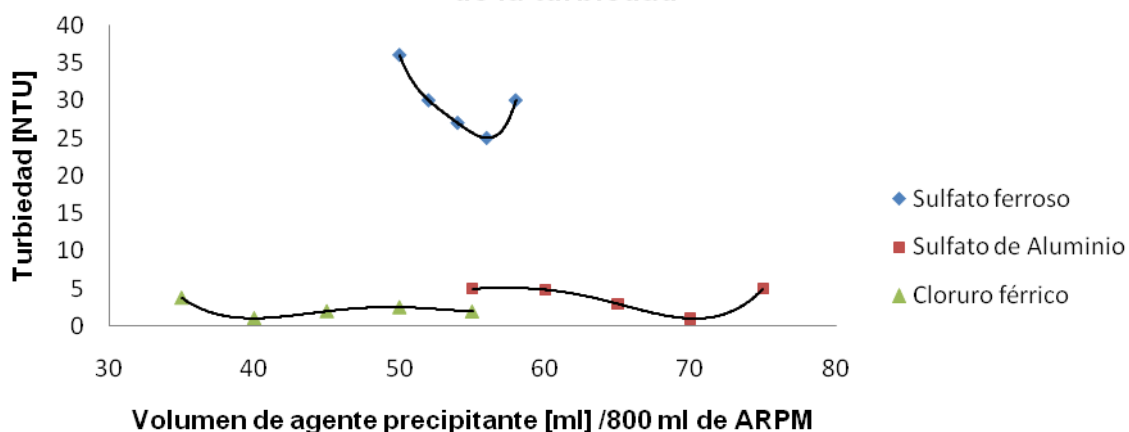
<b>CLORURO FÉRRICO</b>		<b>Exp. 1</b>	<b>Exp. 2</b>	<b>Exp. 3</b>	<b>Exp. 4</b>	<b>Exp. 5</b>	<b>Control</b>
<b>VARIABLES DE ENTRADA</b>	Volumen de coagulante por 800 ml de ARPM [ml]	35	40	45	50	55	0
<b>VARIABLES DE SALIDA</b>	Turbiedad [NTU]	3,81	1,07	2,00	2,54	1,96	80
	pH	3,5	3,61	3	2,9	5,13	7,2
	Volumen de lodo [ml]	35	30	40	30	50	55
<b>INDIRECTOS</b>	% de lodo generado	57,14	50	62,50	50	70	0
	%Remoción	96,19	98,93	98,00	97,46	98,04	0

Fuente: La autora.

En la Gráfica 1 se muestra la tendencia de la turbiedad en función del volumen de coagulante adicionado.

**Gráfica 1.** Comparación de la variación de la turbiedad en función de la cantidad de coagulante.

**Tendencia de la relación de agente precipitante en función de la turbiedad**



Fuente: La autora.

Analizando la gráfica se observa una disminución de la turbiedad hasta un valor mínimo que indica la dosis adecuada y posteriormente dosificaciones superiores a este punto resuspenden nuevamente las partículas debido a la incorporación en ellas de una carga eléctrica opuesta a la inicial [3].

De acuerdo a la gráfica el punto más bajo para cada coagulante correspondió a 65, 56 y 40 ml para el SA, SF y CF respectivamente. La relación entre mg de coagulante por litro de ARPM a tratar fueron 812.5, 700 y 500 mg/L ARPM para cada una de las alternativas. En la Tabla 12 se resumen las variables de salida para cada concentración adecuada de coagulante.

**Tabla 12.** Consolidado de las condiciones de operación para el proceso de floculación de la ARPM.

Coagulante	Turbiedad [NTU]	pH final	Volumen de lodos [ml]	Tiempo de sedimentación [min]	% Remoción
SA	2,99	6,71	28	12	94,73
SF	25	8,13	45,5	5	68,75
CF	1,07	3,61	30	2	98, 93

Fuente: La autora.

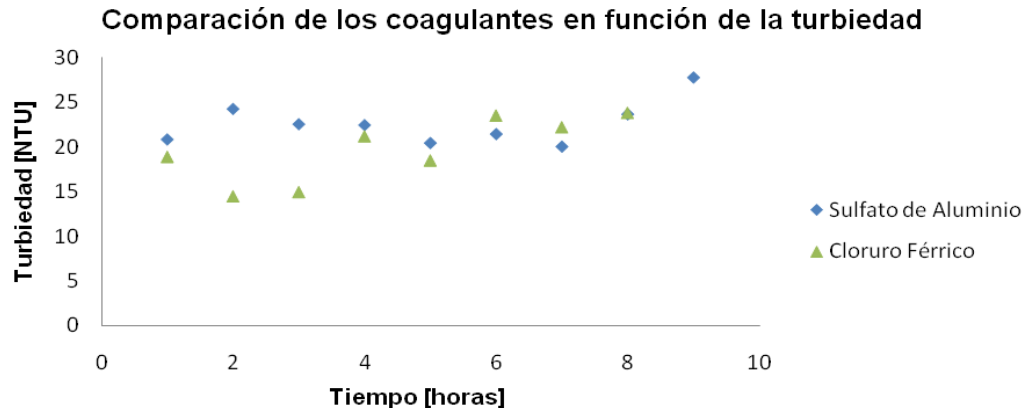
Analizando la información de la tabla se encuentra que la más alta remoción en el menor tiempo de sedimentación se consigue con el agente precipitante Cloruro Férrico (CF).

La precipitación química con SF no fue suficiente para disminuir la turbiedad al valor establecido por la norma (30 NTU) por lo que este método de tratamiento se descartó y se realizó prueba a nivel industrial con los coagulantes SA y CF.

## PRUEBA DE PRECIPITACIÓN DE AGUAS A ESCALA INDUSTRIAL

Los resultados con los coagulantes SA y CF durante 15 días de operación se muestran en la Gráfica 2.

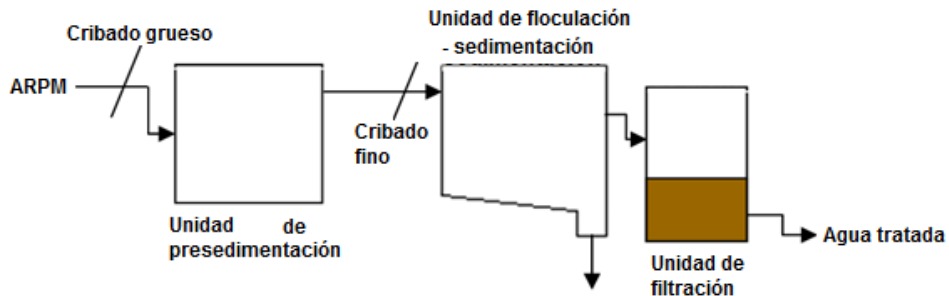
**Gráfica 2.** Comparación de los coagulantes con respecto a la turbiedad final.



**Fuente:** La autora.

Se puede observar que la turbiedad a través del tiempo estuvo en el rango permisible por la normativa ambiental (30 NTU), lo cual indica que los coagulantes seleccionados presentaron un comportamiento estable durante el proceso de precipitación química. Las pequeñas variaciones en la fluctuación de la turbiedad, a lo largo del tiempo de experimentación, son debidas a las variaciones de las condiciones de operación en la planta.

### **DISEÑO BÁSICO DE INGENIERÍA PARA EL TRATAMIENTO DE ARPM PARA FANTAXIAS S.A.S.**



**Figura 3.** Diagrama general del tratamiento de ARPM en la empresa FANTAXIAS S.A.S.

**Fuente:** La autora.

**Capacidad de la planta:** Observando el promedio diario de consumo de agua (3800 l / día) se seleccionó una planta de 4600 l/día con un factor de sobrediseño de 1,2 que opera 10 horas/día.

**Unidades de operación:** Las unidades de operación para el tratamiento de ARPM son las siguientes: unidad de cribado, presedimentación, desengrase, mezcla rápida, floculación y sedimentación.

**Unidad de cribado:** El sistema de cribado consta de dos partes; una rejilla de cribado grueso (con abertura igual a 0,64 cm = ¼ de in) a la entrada del tanque para evitar el paso de las piedras o chips abrasivos, y una rejilla de cribado fino (con abertura menor a ¼ de in) al finalizar la etapa de presedimentación para eliminar algunas partículas en suspensión.

**Unidad de presedimentación:** Se diseñó para una velocidad horizontal de flujo de 0.2 cm/s, una relación Largo – ancho de 4:1, relación Largo – Profundidad de 9:1. El volumen de la unidad es de 191, 67 L, para un tiempo de retención de lodo de 8 días y considerando una acumulación de grasas de máximo 10% [2].

**Unidad de desengrase:** Se realiza en la unidad de presedimentación con un sistema de separación de grasas y aceites y posterior recolección manual.

**Unidad de mezcla rápida:** En esta etapa se aplica el agente precipitante en solución al 7% para garantizar solubilidad completa del producto y mejor contacto del coagulante con las ARPM. El tanque recomendado es un tanque dosificador de 50 litros de un material plástico o acero inoxidable que soporte la corrosión del coagulante. Los accesorios utilizados comprenden el tanque dosificador, la válvula ajustable y la tubería de 1 in para la conducción del fluido. El punto de aplicación de la solución es el resalto hidráulico entre el presedimentador y la unidad de floculación - sedimentación.

**Unidad de floculación - sedimentación:** Equipo separador con 6 mamparas que ayudan a la formación de flocs y posterior sedimentación, espaciados 32 cm uno del otro intercalados a 2/3 de la altura total del sedimentador.

**Unidad de filtración:** Es un filtro lento con lecho de arena con carga superficial de filtración de 87,50 m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>/día y velocidad de filtración de 0,101 cm/s. La altura del lecho filtrante corresponde al 35 % de la altura total del filtro. El medio filtrante está compuesto de arena (2 mm de diámetro, 7 de dureza y peso específico no menor de 2,60) y grava (Diámetro entre 3,16 mm y 1/12" 2,212 mm).

**Dimensiones de los equipos:** En la Tablas 13 y 14 se encuentra el dimensionamiento y especificaciones de la planta de tratamiento de ARPM, estos datos se determinaron teniendo en cuenta los resultados obtenidos del balance de masa, las pruebas de jarras, las pruebas a escala industrial y las características principales de las corrientes.

**Tabla 13.** Especificaciones tanque presedimentador y floculador - sedimentador.

TANQUES	DIMENSIONES			CRITERIOS DE DISEÑO	
	Altura [m]	Ancho [m]	Largo [m]	Tiempo mínimo de retención	Carga superficial [m <sup>3</sup> /m <sup>2</sup> /día]
Presedimentador	0,67	0,48	1,91	30 min	45,63
Floculador - sedimentador	0,67	0,48	1,91	30 min	45,63

Fuente: La autora.

**Tabla 14.** Especificaciones de la unidad de filtración.

TANQUES	DIMENSIONES		MEDIO FILTRANTE	
	Altura [m]	Diámetro [m]	Grava [m]	Arena [m]
Filtración	1,29	0,25	0,15	0,30

Fuente: La autora.

**Costos de reactivos para realizar el proceso a escala industrial:** En la Tabla 15 se muestran los reactivos necesarios para el tratamiento de las ARPM provenientes de FANTAXIAS. Estos datos se obtuvieron con base en las mejores concentraciones obtenidas por la prueba de jarras para las diferentes alternativas

si la planta trabaja 25 días en el mes, cada día con una jornada de trabajo de 12 horas.

**Tabla 15.** Consumo de reactivos para cada una de las alternativas<sup>†</sup>.

COAGULANTE	CANTIDAD DE REACTIVOS		COSTO DE REACTIVOS‡		
	Mensual [Kg]	Anual [Kg]	Costo unitario [\$/kg]	Costo mensual [\$]	Costo anual [\$]
SA	50,0	600	1.280	64 000	767. 458
CF	30,75	368,97	3.300	101 500	1.217.600

<sup>†</sup>Alternativa 1: SA

Alternativa 2: CF

<sup>‡</sup> Precios dado por SUQUIM LTDA en cantidad mínima de 25 Kg (1 bulto). Considerando el gasto mensual como el de 25 días laborales de 12 horas (1 jornada de trabajo).

Fuente: La autora.

## SELECCIÓN DE LA MEJOR ALTERNATIVA DE FLOCULACIÓN PARA FANTAXIAS

Luego de determinar las condiciones de operación establecidas mediante la prueba de jarras realizadas a las muestras de ARPM, se seleccionó la mejor alternativa de floculación por precipitación química, por medio de una MVP [8], la calificación se muestra en la Tabla 16.

**Tabla 16.** Calificación de alternativas de acuerdo a los criterios de evaluación.

CRITERIO	SUBCRITERIO	SA	CF
Técnico	Turbidez final	3	4
	Tiempo de sedimentación	3	4
	pH	4	0
Sumatoria criterios técnicos		10	8
Económico	Cantidad de coagulante	1	4
	Costo de reactivos	4	1
Sumatoria criterios económicos		5	5
Ambiental	Productos residuales	4	3
Social	Riesgos para la salud <sup>†</sup>	3	1
TOTAL (I = (0,43)*CT + (0,29)*CE + (0,14)*CA+ (0,14)*CS) <sup>‡</sup>		6,73	5,45

<sup>†</sup>Dato dado por la NFPA en riesgos para la salud (ponderación de 0 a 4).

<sup>‡</sup>CT=∑ Criterios técnicos, CE=∑ Criterios económicos, CA=∑ Criterios ambientales y CS = ∑ Criterios sociales.

Fuente: La autora.

De acuerdo a los resultados obtenidos en la Tabla 16 se deduce que la mejor alternativa de tratamiento según los criterios evaluados para FANTAXIAS S.A.S. es el coagulante sulfato de aluminio.

## CAPÍTULO IV: CONCLUSIONES

1. Los lodos provenientes del proceso de pulimento de piezas realizado en la empresa FANTAXIAS S.A.S. exceden la normativa ambiental en los parámetros cantidad de Zn, Al y Cu en un 748.4, 8370 y 3438% respectivamente. Las aguas residuales superan los estándares de regulación en 15 veces para el parámetro turbiedad, 1,27 para el pH y 1,2 para la conductividad. Por lo que se vio la necesidad de tratar estos vertimientos.
2. La reducción del nivel de contaminación de las aguas residuales de la etapa de pulimento mecánico de FANTAXIAS es posible mediante la tecnología de precipitación química. Al utilizar como coagulante sulfato de aluminio, en una concentración de 812, 5 g/ cm<sup>3</sup>, se consigue una remoción del 94,73% de los sólidos suspendidos.
3. A escala industrial, en FANTAXIAS, para comprobar la efectividad del coagulante en proceso continuo se utilizó una cantidad de 2 Kg /12 horas por un período de 10 horas, obteniendo excelentes resultados en función de nivel de remoción y estabilidad del proceso. Sin embargo para mejorar el proceso es necesario controlar el caudal, dosificación del coagulante y pH.
4. Se realizó un diseño básico de ingeniería a partir de la evaluación experimental de lodos producidos, caudal de aguas residuales, pruebas de precipitación a nivel industrial y de laboratorio, utilizando los criterios de diseño: carga superficial, velocidad horizontal de sedimentación, tiempo mínimo de sedimentación, relaciones largo – profundidad y largo – ancho.

## **CAPÍTULO VI: REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS**

**[1]** ARBOLEDA, Jorge. Teoría, diseño y control de los procesos de clarificación del Agua. Centro Panamericano de Ingeniería y Ciencias del Ambiente (CEPIS), 1973.

**[2]** \_\_\_\_\_ Teoría y práctica de la purificación del agua. Tercera edición. Colombia: Editorial Mc Graw – Hill, 1992.

**[3]** BARRENECHEA, A. Tratamiento de agua para consumo humano: Plantas de filtración rápida. Manual I - Tomo I. Lima: Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente, CEPIS/OPS, 2004.

**[4]** CADORIN, Luciana et al. Tratamiento de RILES mineros ácidos por precipitación química y flotación por aire disuelto. Habana, 2006. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Departamento de Engenharia de Minas - Laboratório de Tecnologia Mineral e Ambiental.

**[5]** GARCIA, Angel et al. Depuración de aguas y residuales: Ozone systems. Barcelona: Editorial TRAT – AR, 1995.

**[6]** Inf. tecnol. Vol.17, No.2. La Serena – Chile, 2006.

**[7]** INNOVA, Tar. Tecnología ambiental. Sevilla: Grupo TAR. Escuela universitaria politécnica de sevilla, 2001.

**[8]** KINNEAR, Tomas C. y TAYLOR, James R. Investigación de Mercados. Quinta Edición. Bogotá: Mc Graw- Hill, 2001.

**[9]** MACKENZIE L, Davis y MASTEN, Susan J. Ingeniería y ciencias ambientales. Mc Graw - Hill Interamericana, 2004.

**[10]** MINDESARROLLO, Ministerio de Desarrollo Económico. Dirección de agua potable y saneamiento Básico: Reglamento técnico del sector de agua potable y Saneamiento básico RAS – 2000. Sección II. Título E. Tratamiento de Aguas Residuales. Bogotá D.C., 2000.

**[11]** RAMALHO, R.S. Tratamiento de aguas residuales. Laval University. Faculty of Science and Engineering., Canadá. 2 ed. Barcelona: Reverté, S.A, 1983

**[12]** RIGOLA, Miguel. Tratamiento de aguas industriales: Aguas de proceso y residuales. España: De Lapeña Boixareu Editores, 1989.

**[13]** ROMERO R., Jairo. Acuíquímica. Santafé de Bogotá: Escuela Colombiana de Ingeniería, 1996.

**[14]** \_\_\_\_\_ Tratamiento de aguas residuales: Teoría y principios de diseño. Santafé de Bogotá: Escuela Colombiana de Ingeniería, 1999.

**[15]** SANS F., Ramón y RIBAS, Joan de Pablo. Ingeniería Ambiental: Contaminación y tratamientos. México: Alfaomega, 1999.

**[16]** SINGLEY, J.E. Libro de coagulación: Revisión de la teoría de la coagulación del agua. Departamento de Ingeniería Ambiental, Universidad de Florida, 1985.

**[17]** SOTO R., Eduardo, et al. Remoción de metales pesados en aguas residuales mediante agentes químicos. México, 2004. Universidad Autónoma de Nuevo León. Facultad de Ciencias Químicas. Departamento de Ingeniería Química.