

# UCUENCA

Facultad de Ciencias Químicas

Carrera de Ingeniería Ambiental

Optimización del proceso de coagulación-floculación en el tratamiento de agua residual generada en la cuba de decapado en la empresa Galvánica Cía. LTDA. del cantón Cuenca

Trabajo de titulación previo a la obtención del título de Ingeniero Ambiental

Autoras:

María Belén Alvarado Pacheco

CI: 0104905906

Correo electrónico: belen.alvaradop16@gmail.com

Erika Fernanda Mayancela Santander

CI: 0105399364

Correo electrónico: erimayancela@gmail.com

Tutor:

Ing. Fausto Fernando García Ávila

CI:0301454617

**Cuenca, Ecuador**

21-noviembre-2022

## Resumen:

El presente trabajo se realizó en la empresa GALVÁNICA CIA. LTDA., ubicada en la ciudad de Cuenca. El estudio tuvo como objetivo optimizar el proceso de coagulación- floculación en el tratamiento de agua residual generada en la cuba de decapado. Para lo cual, se realizaron pruebas de jarras aplicando tres diferentes coagulantes (sulfato de aluminio, cloruro férrico y policloruro de aluminio) en el agua residual, una vez que el pH fue ajustado. Se evaluó la concentración de hierro y aluminio tanto en el agua residual, agua con ajuste de pH y agua tratada con los diferentes coagulantes. Los resultados obtenidos después de las pruebas de jarras indicaron que el coagulante con mejor porcentaje de remoción fue el sulfato de aluminio, generando una remoción del 97.69% y 92.81% de hierro y aluminio respectivamente. El uso de este coagulante es factible para la empresa pues su costo lo hace rentable económicamente. Para el análisis estadístico se utilizó MANOVA para verificar la relación entre los porcentajes de remoción de los metales (hierro y aluminio) con respecto al tipo de coagulante utilizado, concentración y dosis de cada coagulante y el pH del agua residual; por medio de este análisis estadístico también se pudo determinar que el mejor coagulante a usar es el sulfato de aluminio puesto que, nos brinda mejores resultados de remoción de hierro y aluminio. En los resultados estadísticos se pudo evidenciar que existe una relación directa entre el porcentaje de remoción de los metales y el tipo de coagulante, su concentración y el pH del agua a utilizar. Se determinó que, el sulfato de aluminio debe aplicarse a una concentración del 10% para un agua residual con pH de 5.5. Además, también se aplicó ANOVA para comprobar si existe alguna relación entre los tres tipos de coagulantes y la remoción de hierro y aluminio. En base a la aplicación de Tukey-HSD se pudo determinar que no existe una relación entre los coagulantes, pues cada uno actúa de manera diferente en relación con los parámetros establecidos.

**Palabras clave:** Coagulación. Floculación. Sulfato férrico. Policloruro de aluminio. Cloruro férrico. Prueba de jarras. Concentración. Dosificación. MANOVA. Galvánica. Decapado.

## Abstract:

The present work was carried out in the company GALVÁNICA CIA. LTDA., located in the city of Cuenca. The objective of the study was to optimize the coagulation-flocculation process in the treatment of residual water in the capping tank. For which, jar tests were carried out by applying three different coagulants (aluminum sulfate, ferric chloride and polyaluminum chloride) in the wastewater, once the pH was adjusted. The concentration of iron and aluminum in raw water, water with pH adjustment and water treated with the different coagulants was evaluated. The results obtained after the jar tests indicated that the coagulant with the highest percentage of removal was aluminum sulfate, showing a removal of 97.69% and 92.81% of iron and aluminum, respectively. The use of this coagulant is feasible for the company because its cost makes it economically profitable. For the statistical analysis, MANOVA was obtained to verify the relationship between the percentages of removal of metals (iron and aluminum) with respect to the type of coagulant used, concentration and dose of each coagulant and the pH of the wastewater; Through this statistical analysis it was also possible to determine that the best coagulant to use is aluminum sulfate since it gives us better results in iron and aluminum removal. In the statistical results it was possible to show that there is a direct relationship between the percentage of metal removal and the type of coagulant, its concentration and the pH of the water to be used. It will be extended that aluminum sulfate should apply a concentration of 10% for wastewater with a pH of 5.5. In addition, ANOVA was also applied to check if there is any relationship between the three types of coagulants and the removal of iron and aluminum. Based on the application of Tukey-HSD, it was possible to determine that there is no relationship between the coagulants, since each one acts differently in relation to the established parameters.

**Keywords:** Coagulation. Flocculation. Ferric sulfate. Aluminum polychloride. Ferric chloride. Jar test. Concentration. Dosage. MANOVA. Galvanic. Pickling.

## LISTA DE ABREVIATURAS

**PAC:** Policloruro de aluminio

**pH:** Potencial de hidrógeno

**ETAPA:** Empresa de telecomunicaciones, agua potable, alcantarillado y saneamiento de Cuenca.

**ANOVA:** Análisis de varianza

**MANOVA:** Análisis multivariado de varianza

<b>PORTADA</b>	1
<b>RESUMEN</b>	2
<b>ABSTRACT</b>	3
<b>LISTA DE ABREVIATURAS</b>	4
<b>Capítulo I</b>	17
1.1 <b>Introducción</b>	17
1.2. <b>Identificación del problema y justificación</b>	18
<b>Problema:</b>	18
<b>Justificación:</b>	18
1.3. <b>Objetivos</b>	19
<b>Objetivo general:</b>	19
<b>Objetivos específicos:</b>	19
<b>Capítulo II: Marco teórico</b>	20
<b>2.1 Agua Residual</b>	20
<b>2.1.1 Tipos de agua residual</b>	20
2.1.1.1 <b>Aguas residuales domésticas</b>	20
2.1.1.2 <b>Aguas residuales industriales</b>	21
2.1.1.3 <b>Aguas residuales agrarias</b>	21
2.1.1.4 <b>Aguas pluviales</b>	21
<b>2.2 Agua residual industrial de galvanizado</b>	21
<b>2.2.2.1 Características fisicoquímicas de las aguas residuales de galvanizado</b>	23
<b>2.2. Galvanizado</b>	23
<b>2.2.1. Decapado</b>	24
<b>2.3. Procesos para el tratamiento de aguas residuales de galvanizado</b>	25
<b>2.3.1. Ajuste del pH</b>	25
<b>2.3.2. Coagulación/ floculación</b>	25
2.3.2.1. <b>Coagulación</b>	26
2.3.2.2. <b>Floculación</b>	27
2.3.2.3. <b>Precipitación química</b>	28
<b>2.4. Coagulantes usados en el tratamiento de aguas residuales industriales</b>	29
<b>2.4.1. Sulfato de Aluminio</b>	29

2.4.2. Cloruro Férrico	30
2.4.3. Policloruro de Aluminio	31
2.5. Prueba de jarras	31
2.5.1 Tiempo de retención	33
2.5.2 Velocidad de giro	33
2.5.3 Cálculo de dosis	34
2.6. Metales a remover en el proceso de galvanizado	34
2.6.1 Hierro	34
2.6.2. Aluminio	35
2.7. Análisis estadístico	36
2.7.1. Análisis de Varianza (ANOVA)	36
2.7.2. Análisis Multivariado de Varianza (MANOVA)	36
2.8. Normativa Legal Vigente	38
2.9. Estado del arte	39
2.9.1 Remoción de metales pesados en aguas residuales mediante agentes químicos	39
2.9.2 Optimización del proceso de remoción de metales pesados de agua residual de la Industria Galvánica por precipitación química	40
2.9.3 Diseño y manual de operación y mantenimiento de una planta de tratamiento de aguas residuales ácidas de una planta de galvanizado	40
Capítulo III: Materiales y métodos	41
3.1. Delimitación del área de estudio	41
3.1.1 Ubicación	41
3.1.2. Lugar de estudio	42
3.2. Análisis de pH, Fe y Al del agua residual una vez completado el proceso de decapado de la industria GALVÁNICA CIA. LTDA.	42
3.2.1. Diagrama de proceso	42
3.2.2 Recolección de muestras	45
3.2.3. Análisis de laboratorio	47
3.3. Aplicación del test de jarras probando los coagulantes: sulfato de aluminio, policloruro de aluminio y cloruro férrico que permitirá remover la carga contaminante y metales del agua.	47
3.3.1. Ajuste de pH	47
3.3.2. Coagulación/Floculación mediante jar test	48
3.3.3. Análisis del agua tratada en el jar test	49

3.3.4. Equipos y reactivos para el análisis de los parámetros para evaluar la eficiencia de la coagulación-floculación	50
3.4. Selección del coagulante más adecuado en función de los resultados de las pruebas de jarras.	51
3.4.1. Análisis Multivariado de Varianza (MANOVA)	51
Capítulo IV: Resultados y discusión	55
4.1. Resultados	55
4.1.1. Resultados del análisis de pH, hierro y aluminio en el agua residual y con pH ajustado y su comparación con la normativa nacional.	55
4.1.2. Resultados de pH, hierro y aluminio del agua tratada	56
4.1.3. Análisis estadístico	66
Capítulo V: Conclusiones y Recomendaciones	76
5.1. Conclusiones	76
5.2. Recomendaciones	77
CAPITULO VI	78
6. Referencias bibliográficas	78
ANEXOS	87
Anexo 1. Análisis de la prueba estadística MANOVA en R Studio	87
Anexo 2. Datos de remoción de hierro y aluminio para Tukey-HSD	87
Anexo 3. Registro fotográfico de la obtención de muestras in situ.	89
Anexo 4. Registro fotográfico de análisis en el Laboratorio de Análisis Ambiental	91
Anexo 5. Resultados obtenidos del Laboratorio de Saneamiento de ETAPA EP	94

## Índice de Tablas

Tabla 1. Residuo o subproducto dependiendo de la etapa del proceso de galvanizado. ..	22
Tabla 2. Límite máximo permisible de los parámetros analizados. ....	39
Tabla 3. Volumen aplicado de los tres coagulantes para la prueba de jarras .....	49
Tabla 4. Equipos usados en el Laboratorio de Análisis Ambiental .....	50
Tabla 5. Resultados para agua residual y con ajuste de pH.....	55
Tabla 6. Resultados de remoción de hierro y aluminio aplicando Sulfato de aluminio .....	57
Tabla 7. Resultados de remoción de hierro y aluminio aplicando Policloruro de Aluminio	60
Tabla 8. Resultados de remoción de hierro y aluminio aplicando Cloruro férrico .....	63
Tabla 9. Resumen de valores iniciales y finales con cada coagulante .....	66
Tabla 10. Prueba de Linealidad .....	67
Tabla 11. Distancia de Mahalanobis .....	67
Tabla 12. Resultados de MANOVA.....	69
Tabla 13. Resultados de ANOVA remoción de Fe .....	71
Tabla 14. Resultados de ANOVA remoción de Al .....	72
Tabla 15. Análisis estadístico entre los tres tipos de coagulantes y la remoción de Fe.....	74
Tabla 16. Análisis estadístico entre los tres tipos de coagulantes y la remoción de Al.....	75



## Índice de Ilustraciones

Ilustración 1. Equipo prueba de jarras marca Phipps & Bird.....	33
Ilustración 2. Ubicación de la Empresa Galvánica Cía. LTDA. ....	41
Ilustración 3. Diagrama explicativo del desarrollo práctico del estudio.....	43
Ilustración 4. Diagrama explicativo del desarrollo práctico del estudio.....	44
Ilustración 5. Diagrama explicativo del desarrollo práctico del estudio.....	45
Ilustración 6. Porcentaje de remoción de hierro luego de la aplicación de Sulfato de Aluminio .....	58
Ilustración 7. Porcentaje de remoción de aluminio luego de la aplicación de Sulfato de Aluminio .....	59
Ilustración 8. Porcentaje de remoción de hierro luego de la aplicación de Policloruro de Aluminio .....	61
Ilustración 9. Porcentaje de remoción de aluminio luego de la aplicación de Policloruro de Aluminio .....	62
Ilustración 10. Porcentaje de remoción de hierro luego de la aplicación de Cloruro férrico .....	64
Ilustración 11. Porcentaje de remoción de aluminio aplicando cloruro férrico.....	65
Ilustración 12. Relación entre los tres tipos de coagulantes utilizados y remoción de Fe..	73
Ilustración 13. Relación entre los tres tipos de coagulantes utilizados y la remoción de Al .....	75

## Cláusula de licencia y autorización para publicación en el Repositorio Institucional

---

María Belén Alvarado Pacheco en calidad de autor/a y titular de los derechos morales y patrimoniales del trabajo de titulación "Optimización del proceso de coagulación-floculación en el tratamiento de agua residual generada en la cuba de decapado en la empresa Galvánica Cía. LTDA. del cantón Cuenca", de conformidad con el Art. 114 del CÓDIGO ORGÁNICO DE LA ECONOMÍA SOCIAL DE LOS CONOCIMIENTOS, CREATIVIDAD E INNOVACIÓN reconozco a favor de la Universidad de Cuenca una licencia gratuita, intransferible y no exclusiva para el uso no comercial de la obra, con fines estrictamente académicos.

Asimismo, autorizo a la Universidad de Cuenca para que realice la publicación de este trabajo de titulación en el repositorio institucional, de conformidad a lo dispuesto en el Art. 144 de la Ley Orgánica de Educación Superior.

Cuenca, 21 de noviembre de 2022



---

María Belén Alvarado Pacheco

C.I: 0104905906

## Cláusula de licencia y autorización para publicación en el Repositorio Institucional

---

Erika Fernanda Mayancela Santander en calidad de autora y titular de los derechos morales y patrimoniales del trabajo de titulación "Optimización del proceso de coagulación-floculación en el tratamiento de agua residual generada en la cuba de decapado en la empresa Galvánica Cía. LTDA. del cantón Cuenca", de conformidad con el Art. 114 del CÓDIGO ORGÁNICO DE LA ECONOMÍA SOCIAL DE LOS CONOCIMIENTOS, CREATIVIDAD E INNOVACIÓN reconozco a favor de la Universidad de Cuenca una licencia gratuita, intransferible y no exclusiva para el uso no comercial de la obra, con fines estrictamente académicos.

Asimismo, autorizo a la Universidad de Cuenca para que realice la publicación de este trabajo de titulación en el repositorio institucional, de conformidad a lo dispuesto en el Art. 144 de la Ley Orgánica de Educación Superior.

Cuenca, 21 de noviembre del 2022

Erika Mayancela S

Erika Fernanda Mayancela Santander

C.I: 0105399364

## Cláusula de Propiedad Intelectual

---

María Belén Alvarado Pacheco, autora del trabajo de titulación "Optimización del proceso de coagulación-floculación en el tratamiento de agua residual generada en la cuba de decapado en la empresa Galvánica Cía. LTDA. del cantón Cuenca", certifico que todas las ideas, opiniones y contenidos expuestos en la presente investigación son de exclusiva responsabilidad de su autor/a.

Cuenca, 21 de noviembre de 2022



---

María Belén Alvarado Pacheco

C.I: 0104905906

## Cláusula de Propiedad Intelectual

---

Erika Fernanda Mayancela Santander autora del trabajo de titulación "Optimización del proceso de coagulación-floculación en el tratamiento de agua residual generada en la cuba de decapado en la empresa Galvánica Cía. LTDA. del cantón Cuenca", certifico que todas las ideas, opiniones y contenidos expuestos en la presente investigación son de exclusiva responsabilidad de su autora.

Cuenca, 21 de noviembre del 2022

Erika Mayancela S

Erika Fernanda Mayancela Santander

C.I: 0105399364

## DEDICATORIA

Este trabajo lo dedico primero a Dios, a mi madre Graciela, a mi hermano Danny, mi cuñada María José y a mis sobrinos Ariana, Luana y Matías quienes me han acompañado y apoyado durante cada paso importante en mi vida, especialmente durante esta etapa universitaria. Me han brindado sus consejos y me han impulsado a seguir con este sueño, por lo que este logro es también de mi familia.

También, a mis queridos amigos, especialmente Carolina y Camila, quienes han compartido conmigo varios momentos tanto felices como difíciles y me han ayudado a seguir mejorando como persona, quiero que sepan que siempre estarán en mi corazón.

Finalmente, este trabajo lo dedico a todas las personas que ayudaron para la culminación exitosa del mismo.

María Belén Alvarado Pacheco

## DEDICATORIA

Dedico de manera especial este trabajo a Dios, a mis padres, Geovanny y Miriam, quienes me han acompañado día a día, me han forjado como la persona que soy actualmente, me han aconsejado, han sido mi pilar fundamental en cada paso que doy y son mi motor, mi fuerza, muchos de mis logros se los debo a ustedes entre ellos incluye este. A mi hermano Mateo por ser un apoyo constante, por alegrarme y estar a mi lado en todo momento. Además, dedico este trabajo a Esteban, mi mejor amigo, mi enamorado, aquella persona que me brinda apoyo incondicional, me ha enseñado a superar mis propios límites y me impulsa a seguir adelante.

También dedico este trabajo a Lucas que siempre ha estado a mi lado acompañándome, mi compañero fiel en cada noche de desvelo, mi guardián de cuatro patas. Finalmente, este trabajo va dedicado para mi bello ángel, mi niña preciosa, mi pequeña Danny quien me ha cuidado y me ha guiado por el mejor camino, me motiva a ser mejor persona cada día y me impulsa a no rendirme.

Erika Fernanda Mayancela Santander

## AGRADECIMIENTOS

Agradecemos primero a Dios por ser un guía en nuestro camino, a nuestras familias, amigos y personas que nos han apoyado a lo largo de este proceso académico.

De manera especial, al Ingeniero Fernando García, que en su calidad de tutor nos brindó su asesoría y apoyo durante el desarrollo de nuestro trabajo de titulación, permitiéndonos culminarlo de la mejor manera.

A la empresa Galvánica Cía. LTDA., especialmente a la Ingeniera Ángela Rodríguez por permitirnos realizar este trabajo en sus instalaciones, brindándonos todas las facilidades para el avance del mismo.

Expresamos también un profundo agradecimiento al Ingeniero Aleksander Khachartyan quien nos ayudó con su asesoría de la manera más comedida, permitiéndonos aumentar nuestro conocimiento y obtener mejores resultados.

Finalmente, agradecemos a todo el personal que conforma la Universidad de Cuenca, que aportaron con nuestro desarrollo personal y académico, formándonos como profesionales que están al servicio de la sociedad en general.

María Belén Alvarado Pacheco

Erika Fernanda Mayancela Santander



### 1.1 Introducción

En los diferentes procesos que se desarrollan en la industria galvánica se producen efluentes que contienen metales pesados como aluminio y hierro, lo mismo que han resultado ser una problemática, debido a que tienen un gran impacto en el medio ambiente. En los últimos años se ha investigado sobre tratamientos adecuados para las aguas industriales con un bajo costo de operación, siendo la coagulación/floculación algunos de los procesos más estudiados por diferentes autores, los cuales mencionan que la base de estos procesos es la desestabilización de los coloides en pocos segundos, seguido de la aglomeración de estas partículas ya desestabilizadas, que al sedimentarse serán removidas con mayor facilidad (Ibarra, 2020).

Para el proceso de coagulación es necesario aplicar coagulantes que tienen la función de neutralizar las cargas negativas de los coloides, por lo que, frecuentemente se usan sales trivalentes de hierro o aluminio, ya que las mismas brindan cargas eléctricas positivas al agua, rompiendo el equilibrio electrostático. Debido a la hidrólisis que los coagulantes soportan en el agua se modifican ciertas características físico-químicas de la misma, como la conductividad (Quintero, 2015).

Existen diversos coagulantes que han sido utilizados para el tratamiento de aguas residuales industriales, los mismos que son fabricados a partir de hierro y aluminio, siendo uno de los más utilizados el sulfato de aluminio, debido a que es efectivo porque puede formar complejos polinucleares en soluciones adsorbentes, además existe una gran disponibilidad del producto a un bajo costo. También se han demostrado resultados favorables con otros coagulantes metálicos como son el cloruro férrico y policloruro de aluminio (Yanza et al., 2019).

Por medio de este trabajo se pretende optimizar el proceso de coagulación-floculación utilizado en el tratamiento del agua residual proveniente del área de decapado de una empresa dedicada al galvanizado de piezas. Se realizaron diversas pruebas de jarras aplicando tres tipos de coagulantes: cloruro férrico, sulfato de aluminio y policloruro de aluminio. Además, los resultados experimentales obtenidos después del proceso de precipitación fueron comparados con la normativa legal vigente del país para así verificar el cumplimiento de la misma.

## 1.2. Identificación del problema y justificación

### **Problema:**

Ecuador dispone de 58 empresas en el sector de industrias básicas de hierro y acero, con una capacidad de producción de acero de 89.50 miles de toneladas en el año 2019 (Corporación Financiera Nacional, 2021). En la ciudad de Cuenca, la actividad industrial de galvanizado genera una gran cantidad de compuestos tóxicos, sobre todo debido a la presencia de metales pesados en las aguas residuales, por lo que aparecen aguas con cargas contaminantes altas, en volúmenes pequeños (Bermejo, 2016). Los problemas más importantes en la industria metalúrgica según Porras et al. (2009), son: elevado consumo de oxígeno, alto DQO, valores extremos de pH y contenido de sustancias tóxicas. Algunos de los residuos con mayor presencia durante el proceso de galvanizado son lodos con gran cantidad de metales pesados de carácter ácido o básico.

El decapado es un proceso que se basa en la eliminación del óxido de hierro que se encuentra en la superficie metálica, este baño (Según Velazco et al. (2015) en metalurgia, baño es el líquido donde se sumergen los metales para modificar sus características físicas en determinados tratamientos se realiza con soluciones ácidas (Porras et al., 2009). En el proceso se generan aguas residuales con pH ácido, elevadas concentraciones de metales pesados y lodos (Escalante, 2000). La empresa de GALVÁNICA CIA. LTDA. ubicada en la ciudad de Cuenca, no dispone de un sistema adecuado para el tratamiento de sus aguas residuales industriales. La fábrica se ha centrado en controlar el pH del agua residual, sin considerar otros factores que afectan gravemente al ambiente como la cantidad de metales. Debido a la falta de conocimiento, los operadores se encargan de ajustar el pH hasta un valor de 5-6, especialmente en el área de decapado donde se utilizan químicos altamente ácidos, para posteriormente enviar el agua a una quebrada cercana a la fábrica.

### **Justificación:**

Actualmente en la literatura se describen varios métodos para reducir las concentraciones de contaminantes en aguas industriales: el más económico y factible es realizar el proceso de ajuste de pH y posterior coagulación, lo cual permite obtener un pH óptimo y concentraciones adecuadas de los metales pesados. Razón por la cual, en este estudio se evaluó la remoción de aluminio y hierro total, ya que según Acosta et al. (2013), estos metales son los que presentan mayor porcentaje de remoción en procesos de coagulación

# UCUENCA

y floculación; además que, dentro de la industria del galvanizado son los contaminantes que más presentes se encuentran. Los límites de los parámetros antes mencionados se encuentran establecidos en el Texto Unificado de Legislación Secundaria del Medio Ambiente en el Libro VI, Anexo 1, Tabla 9 para descarga de efluentes a un cuerpo de agua dulce.

La determinación del mejor coagulante y su correcta dosificación permitirá que la empresa GALVÁNICA CIA. LTDA. realice una correcta disposición de su efluente líquido, cumpliendo con los parámetros de descarga establecidos por la normativa vigente. Razón por la cual, la presente investigación, permitirá determinar las condiciones óptimas del proceso de coagulación- floculación para mejorar la calidad de descarga de sus aguas residuales hacia un cuerpo de agua dulce.

## **1.3. Objetivos**

### **Objetivo general:**

- Optimizar el proceso coagulación- floculación del sistema de tratamiento de agua residual generada en la cuba de decapado en la empresa Galvánica Cía. LTDA. del cantón Cuenca.

### **Objetivos específicos:**

- Caracterizar físico-químicamente el agua residual una vez completado el proceso de decapado de la industria GALVÁNICA CIA. LTDA.
- Aplicar el test de jarras probando los coagulantes: sulfato de aluminio, policloruro de aluminio y cloruro férrico que permitirá remover la carga contaminante y metales del agua.
- Seleccionar el coagulante más adecuado en función de los resultados de las pruebas de jarras.

### 2.1 Agua Residual

Las aguas residuales, son aquellas provenientes de diferentes actividades domésticas, industriales, comerciales o de otra labor, que por su uso contienen sustancias orgánicas o químicas que no tienen ningún valor para otro proceso (Rojas, 2002). Estas pueden recibir tratamiento de manera in situ o pueden ser llevadas mediante una red de tuberías a una planta de tratamiento. En caso de ser aguas de origen industrial reciben un tratamiento especializado. Generalmente tienen una mezcla de contaminantes tanto orgánicos como inorgánicos por lo que deben cumplir ciertas regulaciones y estándares locales y nacionales (Villacis, 2011).

El agua contaminada presenta diferentes propiedades físicas como el color, el olor el cual libera gases durante los procesos de descomposición, el grado de turbidez también influye debido a la densidad de los sólidos en suspensión, por último, se pueden presentar sólidos suspendidos, sedimentados o floculados que bajo condiciones anaeróbicas puede condiciones poco deseables como los factores mencionados anteriormente (Andrade, 2014). Los componentes biológicos también pueden presentarse en esta clase de entornos como microorganismos y follaje vegetal (Villacis, 2011). También se encuentran componentes químicos, los más comunes son los orgánicos, entre ellos las grasas, carbohidratos, proteínas, pesticidas y aceites. Además, puede existir la presencia de componentes químicos inorgánicos como cloruros, metales pesados, nitrógeno, compuestos alcalinos, entre otros (Marín, 2008).

#### 2.1.1 Tipos de agua residual

##### 2.1.1.1 Aguas residuales domésticas

Son aquellas que han sido utilizadas para actividades higiénicas (baños, limpieza doméstica, aseo personal) en viviendas y establecimientos públicos y privados, están compuestas principalmente por residuos humanos, este tipo de aguas generalmente son descargadas en un sistema de alcantarillado mediante descargas de instalaciones hidráulicas. Según Díaz et al. (2014), las aguas residuales domésticas están compuestas por agua en un 99,9%, mientras que tan solo el 0,1% son sólidos suspendidos, disueltos y coloidales.

## **2.1.1.2 Aguas residuales industriales**

Proceden de diferentes labores industriales aplicadas en fábricas y otros establecimientos, existen diferentes tipos de aguas residuales dependiendo de la industria donde se generan, aunque la mayor parte del agua residual son de proceso, limpieza, refrigeración y calefacción. Las descargas pueden ser de manera periódica o continua a través de un sistema de alcantarillado o mediante un gestor ambiental, dependiendo del nivel de contaminación de la misma (Villacis, 2011).

## **2.1.1.3 Aguas residuales agrarias**

Proviene de actividades agrícolas y ganaderas, la contaminación proviene principalmente de la aplicación de fertilizantes o acondicionadores en los terrenos agrícolas, que, aunque permite aumentar la producción, también generan varios contaminantes como microorganismos patógenos, nitrógeno y fósforo. El nitrógeno y fósforo son considerados como nutrientes limitantes ya que su presencia de manera excesiva impide que otros nutrientes se desarrollen en el suelo, alterando el medio natural por ser bioacumulables (Zambrano, 2009).

## **2.1.1.4 Aguas pluviales**

Son de procedencia atmosférica, es decir de precipitaciones de aguas lluvia o nieve, del agua caída, una fracción limpia las superficies, otra se evapora y una parte queda atrapada en depresiones del suelo. El agua va limpiando los contaminantes acumulados en el suelo y son transportados a diferentes lugares de recolección, los caudales de esta clase de aguas pueden llegar a ser entre 50 a 200 veces mayores al volumen de las aguas residuales domésticas (Zambrano, 2009).

## **2.2.2 Agua residual industrial de galvanizado**

Son aguas con carga contaminante elevada en un pequeño volumen, como consecuencia de la operación de los diferentes procesos de galvanizado, principalmente de las etapas de decapado y enjuague ya que poseen la mayor cantidad de impurezas, especialmente de metales pesados (Soto, 2006). Es necesario agregar constantemente ácidos a la solución de decapado para que la concentración de la solución se mantenga. Una vez que la solución sea considerada como una solución gastada, se convierte en agua residual y debe ser enviada a una planta de tratamiento para que sea neutralizada. Por lo antes mencionado,

este tipo de agua es de difícil tratamiento, razón por la cual debe ser enviada a una planta especializada (Ocampo et al., 2020).

En la Tabla 1, se presentan los residuos o subproductos que se obtienen en este tipo de industria dependiendo de la etapa del proceso de galvanizado.

*Tabla 1. Residuo o subproducto dependiendo de la etapa del proceso de galvanizado.*

Etapa	Residuo/Subproducto	Sustancias contenidas
Desengrase	Aceites y grasas	Aceites/grasas, libres y emulsionadas
		Componentes de la solución de desengrase
Decapado	Solución ácida agotada	Cloruros de hierro y de zinc
		Ácido clorhídrico libre
		Aceites y grasas arrastradas
		Componentes de la aleación de la pieza galvanizada
		Componentes de la solución de desengrase
		Arrastres de cromo (etapa de pasivado)
Fluxado	Baño de fluxado agotado	Cloruros de hierro, zinc y amonio
	Lodo de hidróxido de hierro generado	Sales del fluxado
		Hidróxido de hierro
Galvanizado	Mata, cenizas y salpicaduras de zinc	Zinc y hierro
		Metales de la aleación de la pieza galvanizada
	Humos de sales de fluxado al entrar a la cuba de galvanizado	Cloruros de amonio y zinc
		Aceites y grasas arrastradas

*Fuente: Ocampo et al. (2020)*

## 2.2.2.1 Características fisicoquímicas de las aguas residuales de galvanizado

La caracterización físico química de los efluentes del galvanizado, permite obtener los puntos críticos que se da durante el proceso, permitiendo identificar el tratamiento adecuado para los efluentes dependiendo de los resultados de la caracterización.

- a. **pH:** Si el pH presenta condiciones ácidas, habrá una mayor corrosión del alcantarillado donde es vertido el agua vertida (Ocampo et al., 2020).
- b. **Hierro total (mg Fe/L):** Este metal se encuentra presente en las aguas residuales por medio de la materia prima a usar. Al encontrarse en el agua residual y una vez que esta sea vertida en un cuerpo de agua dulce, afecta significativamente el ecosistema de dicha agua pues aumenta su pH y el color cambia. En el caso de que este metal se encuentre disuelto en una solución, contribuirá al crecimiento de microorganismos que pueden desarrollar depósitos de óxido férrico (Oviedo, 2012).
- c. **Aluminio (mg Al/L):** Este metal se encuentra frecuentemente en las aguas industriales, su concentración es mayor en el agua ácida. Dentro de la industria galvánica, el aluminio y sus aleaciones son usadas en combinación con aleaciones de hierro para la materia prima, debido a que se caracteriza por su resistencia a la corrosión (Marín, 2008).

## 2.2. Galvanizado

El galvanizado es una técnica electroquímica, la cual consiste en la electrodeposición de un metal sobre una superficie que puede ser metálica o no, dependiendo de los costos se suele recomendar modificar las características del metal base. El objetivo de recubrir con metal es el mejorar la apariencia del metal base, tener una protección contra la corrosión y en algunos casos mejorar las propiedades eléctricas o mecánicas, dar más dureza, entre otras (Brito et al., 2011).

El galvanizado es un proceso en donde se recubren piezas de acero mediante inmersión de éstas en zinc fundido o en alguna aleación, su adherencia se debe a la formación de un enlace metálico entre el metal a recubrir y el zinc. Esta técnica es importante ya que impide la corrosión de la pieza (Oviedo, 2012). El galvanizado en zinc fundido tiene varias ventajas en comparación a otros métodos de protección como por ejemplo la pintura o electro recubrimientos.

Entre las ventajas sobresale el bajo costo en relación con una larga duración, bajo nivel de corrosión, fácil inspección y gran resistencia a daños mecánicos. Una de las desventajas es que, las piezas que deben ser tratadas, por lo general tienen óxidos, grasas, aceites y cascarillas, por lo que se someten a diferentes procedimientos para obtener una pieza con una superficie brillante previo al recubrimiento.

Los problemas medioambientales que surgen por el proceso de galvanizado son principalmente, residuos de dos tipos: residuos altamente cargados en volúmenes pequeños, y efluentes con carga contaminante en grandes volúmenes de agua. En la parte atmosférica se emanan gases como  $NH_3$ ,  $NH_4Cl$ ,  $ZnCl_2$ , cenizas y polvos. El área más contaminante de todo el proceso de galvanizado es la parte de decapado, debido a los químicos que se utilizan para el proceso, al momento de saturarse el área de decapado su agua se sobrecarga de sedimentos (Abad, 2014).

## 2.2.1. Decapado

La finalidad principal del decapado es separar los óxidos de hierro de la superficie de la pieza, para esto se utiliza una solución de ácido clorhídrico, la cual es la más común puesto que opera a temperatura ambiente y tiene menos impacto en las siguientes etapas del proceso de galvanizado. Durante el decapado es necesario adicionar un aditivo que contenga un inhibidor, esto con el propósito de evitar el ataque al metal, acelerar la remoción del óxido y disminuir el arrastre de los residuos (Fonseca & Guamán, 2011).

En el baño de decapado se utiliza ácido clorhídrico en una concentración de 14 al 16% en peso, mientras que si se utiliza ácido sulfúrico su concentración va del 10-14%, la temperatura durante el proceso llega hasta los 80 °C. Mientras transcurre el proceso de decapado la concentración de aluminio y hierro va aumentando en el baño, al mismo tiempo que se disminuye la concentración de ácido (Muzo, 2015). Al aumentar la concentración de hierro, disminuye la actividad del baño de decapado, además que pueden existir pérdidas por evaporación y por el arrastre de piezas. La disolución se regenera una vez que alcanza el límite de solubilidad del cloruro de hierro, el cual es de 130 g/l. Por lo cual, la composición de los baños de decapado es de ácido residual libre, cloruros de zinc, aluminio, hierro y varios metales pesados que se encuentran presentes en aleaciones de los aceros (Abad, 2014).



El principal problema medioambiental en esta fase es la generación de desechos sólidos en un volumen pequeño, así como disoluciones malolientes, lodos con metales pesados, aceites y grasas que provienen del baño de desengrase. La eliminación de los baños de decapado son los mayores problemas en las empresas de galvanizado por inmersión, por lo que, son entregados a gestores para su tratamiento, el mismo que se trata de depurar físico- químicamente (Samaniego, 2006).

## **2.3. Procesos para el tratamiento de aguas residuales de galvanizado**

### **2.3.1. Ajuste del pH**

El ajuste del pH es la modificación del potencial de hidrógeno del agua, por medio de este proceso se evitan las incrustaciones en el agua. Se puede reducir la condición del efluente ya sea disolvente o corrosiva, a un nivel aceptable en donde no repercute en la naturaleza y la salud del ser humano. Al estabilizar el agua se produce una capacidad buffer, capaz de soportar los cambios radicales de pH y que permite la precipitación del producto químico utilizado (Rojas & López, 2015).

Es uno de los procedimientos más comunes, de menor costo económico usado en el tratamiento de aguas residuales, además de que su aplicación no es compleja. En el mercado, existen diferentes productos alcalinizantes como la cal hidratada, el hidróxido de sodio, bicarbonato de sodio y carbonato de sodio. Mientras sí, se desea disminuir el pH inicial, el producto químico más utilizado es el Dióxido de Carbono. La efectividad del producto usado para el acondicionamiento del agua a tratar, depende de su composición química y determinación de la corrosividad e incrustabilidad del mismo (Rojas & López, 2015). La importancia de ajustar el pH es que se modifica la cantidad de ácido y base presente en un compuesto; al realizar este proceso permite tratar de mejor manera los metales pesados para su posterior disposición (Cardozo, 2018).

### **2.3.2. Coagulación/ floculación**

Las aguas residuales industriales generalmente contienen coloides, las cuales son una de las principales causas de alterar la turbidez y el color. Estas partículas son tan pequeñas que son de poca o nula decantación, razón por la cual, es necesario implementar procesos en donde permita eliminarlas (Seoánez, 2012). El mezclado del agua residual con el coagulante es una parte fundamental para los procesos de coagulación y floculación. Según

Howe et al. (2017), el gradiente de velocidad genera que el fluido en un punto se mueve a una diferente velocidad que el fluido en otro punto, provocando así una mezcla. Por lo que, la eficiencia del tratamiento está establecido por la agitación de la mezcla del agua a tratar con el coagulante.

Los procesos de coagulación y floculación son de carácter químico, los cuales generalmente se aplican antes de un tratamiento secundario (Seoáñez, 2012). Son necesarios para separar sólidos que se encuentran presentes en el agua. Estos procesos ayudan a mejorar el color del agua, es decir, su claridad y reduce la turbidez. Extraen los sólidos en suspensión que se suelen tardar varios días o incluso años en precipitar de forma natural.

### 2.3.2.1. Coagulación

La coagulación es un proceso en donde se desestabilizan las partículas hidrófilas las cuales se encuentran protegidas por una carga eléctrica y una capa de agua. Para realizar dicho proceso se agrega un coagulante en donde se neutraliza las cargas eléctricas superficiales o también se suele invertir dichas cargas de los coloides. Este proceso neutraliza sólidos suspendidos cargados en el agua, pues las partículas generalmente son negativas, y los coagulantes que se suelen agregar son positivos, así se logra neutralizar la carga (Véliz et al., 2010).

Los coloides son partículas estables las cuales no se sedimentan de manera natural, siendo los principales responsables del color y la turbidez del agua, poseen un diámetro entre 1 y 1000 mili micrómetros. Estas partículas pueden ser hidrófobos que generalmente son las inorgánicas, son importantes en el tratamiento del agua pues son inestables al formar cristales no coloidales. También pueden ser coloides hidrofílicos las cuales son generalmente orgánicas, abarcan polímeros, proteínas, almidones entre otras macromoléculas, forman soluciones verdaderas (Fúquene & Yate, 2018).

Existen varios factores que afectan la optimización del proceso de coagulación, los cuales son:

- a. **pH:** es el factor más importante, puesto que, si el proceso se desarrolla fuera del rango adecuado de pH, se disminuye la solubilidad del coagulante en el agua, por

# UCUENCA

lo cual se necesita más concentración del químico, además tomará una mayor cantidad de tiempo en formarse el flóculo (Fúquene & Yate, 2018).

- b. **Turbiedad:** la dosis del coagulante incrementa con la turbiedad del agua, para cada turbiedad existe su dosis adecuada. Existen casos en los que la turbiedad es muy alta y se requiere una dosis de coagulante menor pues existe colisión entre los coloides. Por otro lado, si la turbiedad es demasiado baja se requiere dosis altas de coagulante porque existe menor probabilidad de choque entre las partículas (Fúquene & Yate, 2018)
- c. **Agitación y mezcla:** la eficiencia del proceso se da por la agitación del agua con el coagulante, asegurando que el químico sea dispersado uniformemente en toda la solución. Una agitación idónea permite que se obtenga una mezcla homogénea (Fúquene & Yate, 2018).
- d. **Tiempo de mezcla:** El tiempo de mezclado entre el agua residual y el coagulante aplicado afecta a la eficiencia del proceso. El tiempo de mezcla depende del contaminante a tratar, si se desea optimizar el agua potable el tiempo de mezcla es menor que al utilizar agua residual.
- e. **Tamaño de partículas:** si las partículas son muy grandes se complica la formación del flóculo, por otro lado, si las partículas son muy pequeñas se debe agregar mayor cantidad de coagulante (Zerbatto et al., 2009).
- f. **Temperatura:** la temperatura del agua afecta su densidad, pues si aumenta este parámetro se ve afectada la energía cinética de las partículas en suspensión. Por otro lado, en temperaturas bajas se genera un aumento en la viscosidad del agua dificultando la sedimentación del flóculo (Tafur & Quevedo, 2014).
- g. **Dosis del coagulante:** se puede determinar por medio de ecuaciones matemáticas o experimentalmente en el test de jarras. Es de gran importancia pues pequeñas cantidades de coagulante impiden la neutralización total de la carga del coloide, en cambio, dosis muy altas del químico invierten la carga de los coloides formando una gran cantidad de flóculos pequeños que se demorarán en sedimentar (Tafur & Quevedo, 2014).

## 2.3.2.2. Floculación

La floculación es un proceso en donde se aglomera los coloides que fueron desestabilizados aumentando el contacto entre los mismos. Una vez que se aglomera se forma un flóculo, el cual puede ser filtrado o decantando, depende del sistema de

tratamiento a seguir. El contacto entre los coloides desestabilizados, es provocado por la velocidad de cada uno de ellos. La variedad entre las velocidades se debe a dos fenómenos, la floculación pericinética o movimiento browniano y a la floculación ortocinética o el desplazamiento de una parte del fluido. Los floculantes mayormente utilizados son los polielectrolitos, que son macromoléculas con una carga inversa a la de la suspensión que se desea tratar (Seoáñez, 2012).

Los factores que afectan la floculación son:

**Concentración y naturaleza de las partículas:** existe una relación directa entre la formación del floc y la concentración de partículas en el agua y el tamaño inicial de las mismas (Núñez, 2015).

**Tiempo de retención:** el tiempo de retención es proporcional a la velocidad de aglomeración de las partículas, el cual se determina en la prueba de jarras (Vásquez, 2019).

**Gradiente de velocidad:** Durante la floculación es importante reducir la velocidad de agitación para evitar que los flóculos se rompan, sin embargo, se debe analizar el estado de agitación adecuado donde las partículas colisionan para que se formen los puentes de enlace y así formar los agregados (Núñez, 2015).

### 2.3.2.3. Precipitación química

Para la precipitación química de los metales es necesario agregar un coagulante, este proceso se ve afectado por tres factores: la cinética del proceso, el flujo del efluente a tratar y su composición. La cinética del proceso depende de la concentración del químico a agregar, la temperatura y la agitación constante. El caudal del efluente a tratar, es un dato necesario para determinar la dosificación adecuada. Es necesaria saber la composición del efluente, para así determinar con qué reactivo trabajar, pues a diferentes metales disueltos se necesita diferentes reactivos, así como establecer su correcta dosis (Caviedes et al., 2015). Existen varios factores que afectan a la precipitación química, los cuales son:

- a. **Constante de solubilidad:** es también conocida como  $K_{sp}$  y es la constante de equilibrio la cual indica la solubilidad de un compuesto, es decir, mientras menor sea su valor menor será la solubilidad del compuesto a tratar (Caviedes et al., 2015).
- b. **Cinética de precipitación:** permite determinar el tiempo de residencia para que el volumen del efluente sea igual al volumen del producto en reacción. Depende de la

concentración y de la temperatura además de las diferentes condiciones del proceso como la dosificación del químico y la agitación que se aplique para así obtener una reacción uniforme (Santibañez, 2002).

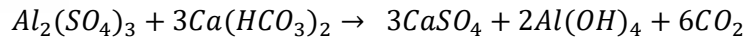
- c. **Efecto salino:** la existencia de otras sales diferentes a las que se encuentran solubles en una disolución saturada genera un incremento en la solubilidad del precipitado (Pérez, 2015).
- d. **Temperatura:** la solubilidad de sustancias sólidas incrementa con la temperatura, es lo contrario con gases, es decir, la solubilidad disminuye conforme aumenta la temperatura (Danguillecourt, 1998).
- e. **Efecto del ion común:** es el desplazamiento de un equilibrio iónico al momento de cambiar la concentración de uno de sus iones que se encuentran en dicho equilibrio, a causa de una sal que se encuentra presente en la disolución en la que dicho ion se encuentra (Danguillecourt, 1998).

## 2.4. Coagulantes usados en el tratamiento de aguas residuales industriales

Los coagulantes son productos químicos que reaccionan con los componentes del agua formando un precipitado absorbente y voluminoso. Existen coagulantes orgánicos e inorgánicos, los más usados son los derivados de sales de hierro, aluminio y polielectrolitos. Los coagulantes de las sales hierro y aluminio han sido cuestionados actualmente, pues existe una dificultad técnica para estabilizar el pH óptimo de coagulación, la necesidad de altas concentraciones del producto y se han relacionado con enfermedades neurodegenerativas. En el caso de utilizar sales se puede formar un precipitado en donde los coloides se comportan como núcleos en la formación del precipitado (Seoáñez, 2012).

### 2.4.1. Sulfato de Aluminio

El sulfato de aluminio también llamado alumbre, con su fórmula química  $Al_2(SO_4)_3$  es considerado uno de los coagulantes más usados en el tratamiento de aguas residuales, pues su bajo costo y su fácil accesibilidad en conjunto con sus excelentes resultados lo han caracterizado de tal manera. Este coagulante trabaja efectivamente en un rango de pH de 6 a 8, y dependiendo del tipo de agua a tratar, suele generar flóculos pequeños. Se utiliza generalmente en la potabilización del agua y en reducir coloides orgánicos y fósforo. Si la alcalinidad del agua es debido al bicarbonato, el sulfato de aluminio actúa como se demuestra en la reacción 1 (Tafur, 2018).



## Reacción 1

Al momento de tratar el agua con sulfato de aluminio, las moléculas del coagulante se disocian en  $Al^{+3}$  y  $SO_4^{-2}$ . El aluminio se puede combinar con coloides cargados negativamente y así neutralizar una parte de la carga de la partícula. También se puede combinar con los  $OH^-$  existentes en el agua y formar hidróxido de aluminio, el cual es un coloide que absorbe iones positivos formando una especie de un sol cargado positivamente. Este sol permite neutralizar los coloides cargados negativamente y así continuar con el proceso. El sulfato de aluminio debe ser distribuido uniformemente por toda el agua de una manera rápida para que así logre tener contacto con todas las partículas antes de que las mismas se formen en especies menos deseables (Castrillón & Giraldo, 2012).

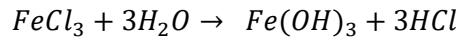
### 2.4.2. Cloruro Férrico

El tricloruro de hierro, tradicionalmente llamado cloruro férrico, es un químico que pertenece al grupo de los haluros metálicos, se utiliza generalmente a nivel industrial y su fórmula es  $FeCl_3$ . Es un producto altamente versátil el cual posee propiedades únicas, tiene un alto poder para formar flóculos. Se utiliza como coagulante a una solución al 40% para tratar aguas y efluentes residuales. Es un compuesto enérgico, pero en varios casos presenta coloración en las aguas siendo esto una desventaja (Tafur, 2017).

Este coagulante tiene ciertas ventajas en relación con otros coagulantes como su efectividad en amplios rangos de temperatura y pH. Además, puede crear iones trivalentes de mayor peso molecular, los cuales son necesarios en el proceso de coagulación. Estudios realizados han demostrado que es necesaria una dosis menor de cloruro férrico en comparación con sales de aluminio para obtener los mismos resultados. Es por estas razones que este coagulante ha sido incorporado en un gran número de plantas de Europa y América para el tratamiento de potabilización (Zerbatto et al., 2009).

El Cloruro Férrico es una sal de base débil que al mezclarse con el agua forma hidróxido férrico insoluble, como se presenta en la reacción 2. Sus aplicaciones en el tratamiento de aguas residuales industriales y domésticas son: eliminar fosfatos, reducir sólidos en suspensión, precipitar metales pesados y deshidratar lodos. La dosis que se aplique del

coagulante al agua a tratar va a depender totalmente de la misma, pues en algunos casos se necesitará mayor o menor cantidad de concentración (Duque, 2012).



## Reacción 2

### 2.4.3. Policloruro de Aluminio

El policloruro de aluminio (PAC) es un compuesto químico utilizado en el tratamiento de aguas crudas e industriales, su composición es a base de sales de aluminio polimerizadas utilizadas generalmente en la clarificación de plantas potabilizadoras de agua y efluentes industriales (Chama, 2017). Su creación data a los años 80 en donde se desarrollaron coagulantes polimerizados de sales metálicas, hasta la actualidad el compuesto ha ido evolucionando, mejorando en su eficiencia y costo y su fórmula química es  $[AlO_4Al_{12}(OH)_{24}(H_2O)_{12}]_7$  (Torra et al., 1998).

El PAC está conformado por una variedad de productos los cuales varían en el grado de su neutralización ácida, concentración de  $Al_2O_3$  y polimerización. En el proceso de producción el ácido es neutralizado, la parte del aluminio se convierte en polímero generando una mayor carga catiónica. Este coagulante ofrece características de desempeño únicas comparado con productos convencionales como cloruro de aluminio, sulfato férrico, sulfato de aluminio, cloruro férrico, entre otros. Entre sus beneficios se resalta el mejorar la remoción de turbidez, deja menor residuo de aluminio, menor costo de operación, reducción de lodos de un 25-75% (Pilca, 2011).

### 2.5. Prueba de jarras

La prueba de jarras o jar test es una técnica a escala que permite establecer las dosis óptimas de coagulantes que deben agregarse al agua a tratar, simulando los procesos de coagulación y floculación. Este método se realiza en el laboratorio, usando diferentes dosis de coagulante (Suarez & Trujillo, 2011). El procedimiento se realiza en tres fases mezcla rápida, mezcla lenta y sedimentación, las cuales se describen a continuación:

- a. **Mezcla rápida (coagulación):** Está fase permite que el coagulante se disperse eficientemente al obtener suficiente energía para que el coagulante se ponga en contacto con las partículas coloidales del agua removiendo la turbiedad del agua en

# UCUENCA

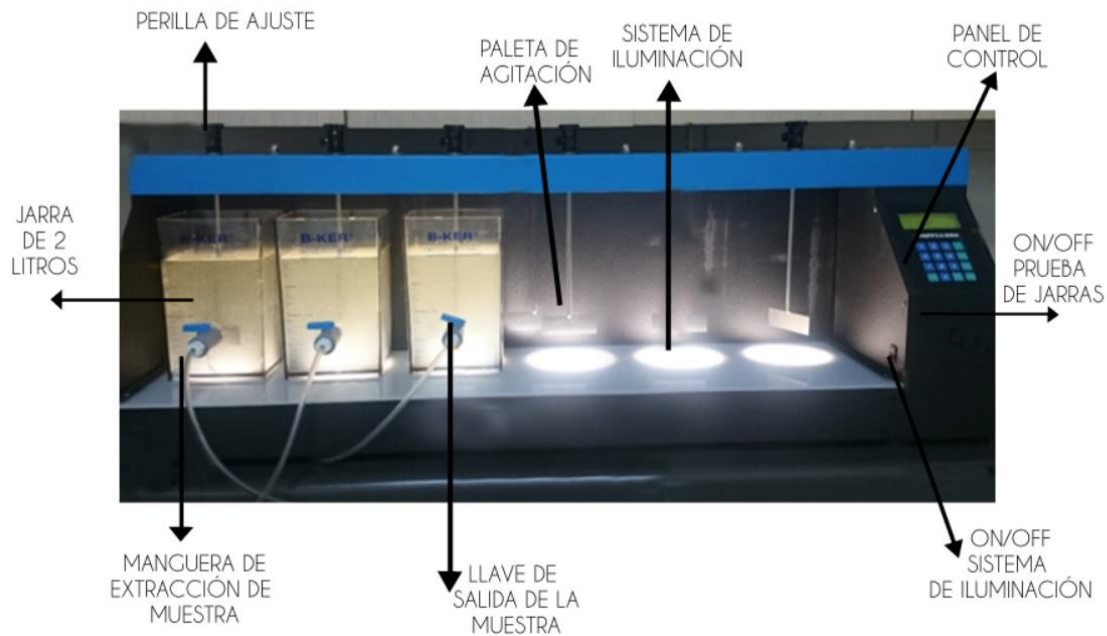
la zona de turbulencia si la dosis es la correcta. El tiempo que dura esta fase en una prueba de jarras es de alrededor de un minuto a 300 rpm, durante la mitad del proceso se adiciona coagulante para permitir su aglomeración (Rubio & Saravia, 2020).

- b. **Mezcla lenta (floculación):** El ligero movimiento que se realiza en esta fase permite que las partículas coloidales se puedan unir entre si formando así el floc (Rubio & Saravia, 2020). El tiempo de mezcla lenta debe ser menor a los 15 minutos, para evitar calentar la muestra, impidiendo así una carente floculación. El tiempo durante esta fase es de 3 a 15 minutos con agitación de 20 a 40 rpm (Lorenzo, 2006).
- c. **Sedimentación:** Las impurezas presentes en el agua a tratar son sólidos disueltos, sólidos en suspensión y coloides, las cuales pueden variar su tamaño, en el caso de que sean muy pequeñas afecta el color y en el caso de ser muy grandes afecta la turbiedad del agua. La sedimentación de dichas partículas utilizando procesos fisicoquímicos puede tardar un par de horas, pues los pasos mencionados anteriormente aceleran este proceso y permite obtener un agua más clara y para una siguiente disposición (Medina, 2017).

La temperatura del agua también influye en la efectividad de la coagulación/ floculación y en la velocidad de formación del floc, por lo que, al disminuir la temperatura, se debe aumentar la dosis de coagulante. Otro factor a analizar es el tiempo de mezclado, ya que para que el proceso sea considerado efectivo la coagulación debe ser breve (Lorenzo, 2006).

Un equipo de pruebas de jarras está compuesto por cuatro o seis paletas de agitación las cuales mezclan el contenido que se encuentra en los vasos de precipitación, cada una de estas jarras puede ser de uno o dos litros, se mezcla con una velocidad controlada por un medidor de revoluciones en rpm. También incluye un sistema de iluminación el cual permite observar los parámetros visibles de cada jarra. En el panel de control se puede ajustar el tiempo que se desea que las paletas de agitación giren y a qué velocidad. En la ilustración 1 se puede observar un equipo de jarras completo de la marca Phipps & Bird con panel digital y programación secuencial (Navarro, 2019).





*Ilustración 1. Equipo prueba de jarras marca Phipps & Bird*

*Fuente: (Navarro, 2019)*

## 2.5.1 Tiempo de retención

Es una variable que permite evaluar el tiempo en el cual las partículas se aglutinan a una cierta velocidad, siendo de suma importancia durante el proceso de coagulación y floculación. Para que el proceso sea efectivo el tiempo de retención real debe ser lo más cercano posible al tiempo de retención teórico, el mismo que se determina mediante pruebas de jarras. El tiempo de retención teórico se calcula mediante la relación entre el volumen ( $V$ ) de la unidad de floculación y el caudal ( $Q$ ) del ingreso (Medina, 2017).

## 2.5.2 Velocidad de giro

La velocidad de giro permite que el coagulante se mezcle con el agua a tratar durante la coagulación, mientras que, durante la fase de floculación, la velocidad será baja para impedir que se rompan los flóculos ya formados. La velocidad de giro en todas las paletas será la misma en todas las jarras, por lo cual permite realizar varias pruebas al mismo tiempo en iguales estados de agitación (Obras Sanitarias del Estado, 2014). La velocidad de giro generalmente varía desde 10 a 300 rpm, dependiendo del equipo de operación.

## 2.5.3 Cálculo de dosis

El cálculo de dosis es de importancia ya que, si se utilizan cantidades reducidas de coagulantes, se dificulta la neutralización total de la carga del coloide, impidiendo la formación de flóculos y si la dosis es muy alta se formará cantidades excesivas de coloides, pero con tamaño mínimo que se retrasaran en sedimentarse, esto debido a que se invierte la carga de partículas coloidales (Fúquene & Yate, 2018).

## 2.6. Metales a remover en el proceso de galvanizado

### 2.6.1 Hierro

El hierro es un metal perteneciente al grupo VIII-B de la tabla periódica, es un compuesto natural de la Tierra y de gran abundancia pues presenta una concentración de 41000 ppm en la corteza terrestre, siendo el cuarto elemento más abundante en el mundo. Obtener hierro es un proceso que se realiza desde la antigüedad por medio de la reducción de óxidos en contacto con carbón, sea de forma directa por altos hornos, o de manera indirecta en donde se obtiene hierro líquido. Se usa comúnmente en fábricas, debido a que es fuerte y económicamente viable, en la manufactura más utilizada es para la elaboración de acero inoxidable (Vera & Rosas, 2017).

El hierro es considerado como el metal más utilizado en la industria metálica con una producción anual del 95% a nivel mundial. Los usos fundamentales del hierro son para la creación de productos siderúrgicos, ya que permite la formación de aleaciones con otros elementos metálicos o no metálicos, como el acero que es una aleación de hierro y carbono, que es parte de la fabricación de herramientas, aparatos eléctricos, ferrosos y otros recursos. También en la mayor parte los trabajos de herrería se utiliza hierro forjado, ya que con mismo se obtiene una mayor tenacidad y resistencia a la corrosión. El hierro en estado puro, tiene escasa utilidad, excepto en la fabricación que requieran su potencial magnético (Comisión Chilena del Cobre, 2016).

El hierro es ampliamente usado para la obtención de acero, el mismo que sirve como materia prima en varias industrias como la construcción de edificios, navíos, fabricación de autos, calderas, cilindros para gas envasado, electrodomésticos, joyería, tubos para pozos petroleros, etc. En las operaciones de galvanoplastia los artículos fabricados con acero son recubiertos con varias capas de sales metálicas para cambiar las propiedades superficiales,

ampliar su resistencia a la corrosión, fricción y rayado (Ministerio del Ambiente, Agua y Transición Ecológica, 2013).

## 2.6.2. Aluminio

El aluminio es considerado como el elemento más abundante en el planeta ya que constituye el 8% de toda la corteza terrestre, se presenta principalmente en las rocas, suelo y vegetación. No es posible encontrarlo en estado puro, ya que suele combinarse con otros elementos, formando así diferentes compuestos. Su principal origen de liberación al ambiente es por vertidos antropogénicos. Es un metal con propiedades físicas importantes como su bajo peso específico y elevada conductividad eléctrica y calorífica, por lo que es usado en varias industrias, ya que, es ideal para su fundición, ductilidad y maleabilidad (Asociación Española de Aluminio, 2008).

Para emplear el aluminio como material estructural es aleado con otros metales, incrementando sus propiedades mecánicas. Algunos de los principales usos en la industria son como armazón de aviones, automóviles, bicicletas, superestructuras de buques y otros medios de transporte. También se lo utiliza para embalaje de alimentos como papel aluminio y latas, en la fabricación de puertas, ventanas, armarios, utensilios de uso doméstico y herramientas. En la industria de telecomunicaciones es usado como línea de transmisión de alto voltaje de diferentes equipos como las antenas satelitales debido a su conductividad (Basurto, 2017).

En la industria de galvanizado, el aluminio es utilizado como un elemento químico que se añade en los baños de Zinc, ya que mejora la resistencia a la corrosión, intensifica el brillo del revestimiento, fortalece los recubrimientos en el sustrato, suministra ductilidad. Según Oviedo (2012), en las fábricas que realizan los baños de galvanizado de Zn-Al y que contengan aluminio por encima de 0.15% se retrasa la formación y crecimiento de compuestos intermetálicos frágiles de Hierro-Zinc, mejorando las propiedades del acero galvanizado.

## 2.7. Análisis estadístico

### 2.7.1. Análisis de Varianza (ANOVA)

Es un conjunto de modelos estadísticos que permite comparar más de dos grupos, cuando los datos pueden variar en una o más características que cambien el resultado. Existen dos métodos de análisis de ANOVA: De un factor y de 2 o más factores. La forma más simple es ANOVA de una vía o factor, se utiliza cuando se tiene una variable independiente y se necesita determinar si existen diferencias estadísticas entre las medias de dos o más grupos independientes. La otra forma de ANOVA es de 2 o más vías, permite analizar la relación entre una variable dependiente y dos o más variables independientes (Dagnino, 2014).

En ANOVA, existen varias conjeturas que deben cumplirse:

- a. Las observaciones son independientes y componen una muestra aleatoria, la importancia de uno no se relaciona con la otra.
- b. Las muestras proceden de poblaciones que tienen una distribución normal. Por lo que antes de realizar el método estadístico debe ser verificado estadísticamente.
- c. La varianza debe cumplir el supuesto de homocedasticidad, es decir, la varianza debe ser la misma en cada grupo.
- d. Las variables independientes deben ser medidas en una escala de intervalo.
- e. Cuando hay más de una variable independiente, los efectos son aditivos.

### 2.7.2. Análisis Multivariado de Varianza (MANOVA)

Es una extensión del método ANOVA, donde se consideran dos o más variables dependientes simultáneamente. Al emplear MANOVA es posible estimar las diferencias entre las medias de varias categorías o tratamientos, comparando conjuntamente las variables dependientes observadas. Según Avendaño et al. (2014), esta técnica solo se realiza cuando se diseña un ensayo experimental con varios grupos, para estimar hipótesis adecuadas a la varianza de los desempeños grupales en dos o más variables dependientes cuantitativas.

Para usar MANOVA es necesario cumplir una serie de requisitos:

- a) La mayoría de las categorías se definen por el grado, ausencia o presencia de una variable independiente.
- b) Dentro de cada categoría existen varios individuos.
- c) Las mediciones para cada sujeto son independientes.

Para poder aplicar MANOVA es necesario realizar antes varias pruebas para así corroborar la certeza de dicho análisis, los parámetros previos a MANOVA serán descritos a continuación:

## **a. Linealidad**

Al determinar la linealidad general de MANOVA se puede contrastar las hipótesis nulas en relación con los efectos sobre las otras variables de factor sobre las medias de una distribución conjunta de variables dependientes. La población es dividida en grupos por las variables de factor para así poder ser analizadas y determinar si cuentan con una linealidad general (IBM, 2021).

## **b. Coeficiente de correlación de Pearson**

Se utiliza para analizar la relación que existe entre dos variables aleatorias cuantitativas. Esta medida nos da información sobre la intensidad y la dirección de la relación. Permite medir el grado de covariación entre distintas variables que se encuentran relacionadas linealmente. Sus valores dan entre -1 y el +1 y dependiendo del valor que se obtenga se definirá su significancia, es decir, si su resultado es -1 o +1 se puede decir que la correlación existente entre las variables es perfecta, en el caso de que sea mayor a 0 su correlación es positiva, si es menor que 0 existe una correlación negativa y en el caso de ser 0 se determina que no existe una relación lineal (Ruiz, 2019).

## **c. Distancia de Mahalanobis**

La distancia de Mahalanobis hace referencia a que cada dimensión se encuentra ponderada por la inversa de su desviación típica. Este parámetro cuenta con una importante propiedad que es invariante ante cambios en la unidad de medida, lo cual le permite adaptarse cuando las variables son heterogéneas (Fu, 2016).

## d. Normalidad

El modelo que se presente debe seguir una distribución normal para así poder brindar resultados confiables al momento de realizar un método de análisis estadístico. Para determinar la normalidad de los datos se puede realizar gráficos los cuales son sencillos de realizar e interpretar, también se puede realizar pruebas estadísticas las cuales permiten obtener una mejor generalización de los resultados. Existe una variedad de pruebas estadísticas para determinar la normalidad de datos, elegir la correcta depende del tamaño de la muestra, el número de variables existentes y la variabilidad entre los datos (Porras, 2016).

## e. Normalidad Multivariado (Shapiro-Wilk Test)

Para poder realizar la prueba de Shapiro-Wilk se debe considerar un tamaño de muestra de máximo 50, en donde se debe calcular la media y la varianza muestral y se ordena las observaciones de menor a mayor. Posteriormente se calculan las diferencias entre el primero y el último, el segundo y el penúltimo, el tercero y el antepenúltimo y así sucesivamente; para luego corregir con unos coeficientes tabulados por Shapiro y Wilk. La hipótesis nula es rechazada cuando su resultado final es menor que el valor crítico proporcionado por una tabla creada por los autores para el tamaño muestral y el nivel de significancia dado (Flores & Flores, 2021).

## 2.8. Normativa Legal Vigente

En el Ecuador la normativa que rige los límites permisibles para la descarga de aguas es el Texto Unificado de Legislación Secundaria del Ministerio del Ambiente, TULSMA (Ministerio del Ambiente, 2015). En el Libro VI anexo 1, capítulo 4.2.3 Normas de descarga de efluentes a un cuerpo de agua o receptor: Agua dulce y agua marina, se menciona en la sección “4.2.3.2 *Se prohíbe todo tipo de descarga en:*

a) *Las cabeceras de las fuentes de agua.*

b) *Aguas arriba de la captación para agua potable de empresas o juntas administradoras, en la extensión que determinará el CNRH, Consejo Provincial o Municipio Local y,*

c) Todos aquellos cuerpos de agua que el Municipio Local, Ministerio del Ambiente, CNRH o Consejo Provincial declaren total o parcialmente protegidos. Otro punto importante es la sección “

En el artículo 4.2.3.7 se indica “Toda descarga a un cuerpo de agua dulce, deberá cumplir con los valores establecidos”. Dichos valores se encuentran en el TULSMA, LIBRO VI, Anexo 1, Tabla 9; de la cual para este estudio se consideran los límites de aluminio y hierro total los cuales se encuentran expresados en la Tabla 2 (Ministerio del Ambiente, 2015).

Tabla 2. Límite máximo permisible de los parámetros analizados.

Parámetros	Expresado como	Unidad	Límite máximo permisible
Aluminio	Al	mg/l	5
Hierro Total	Fe	mg/l	10

Fuente: (Ministerio del Ambiente, 2015)

## 2.9. Estado del arte

### 2.9.1 Remoción de metales pesados en aguas residuales mediante agentes químicos

El estudio realizado por Regalado et al. (2004) en una industria galvánica de la ciudad de Monterrey, se analizó la remoción de metales pesados en las aguas residuales industriales, los niveles de los metales pesados rebasan la norma mexicana, la investigación consistió en la selección del mejor coagulante inorgánico, para lo cual, en la parte experimental se utilizó un equipo de prueba de jarras, se emplearon disoluciones de cloruro férrico, sulfato férrico, sulfato ferroso y sulfato de aluminio. El pH inicial del agua residual generada en la industria fue de 2, mientras que el pH que se usó durante el proceso de coagulación fue de 10, este valor se usó ya que la solubilidad de los hidróxidos metálicos se ve afectada por el pH de la disolución.

El coagulante que evidenció mejores resultados para la remoción de iones de  $\text{Cr}^{+3}$ ,  $\text{Fe}^{+3}$ ,  $\text{Zn}^{+2}$ ,  $\text{Ni}^{+2}$  fue el cloruro férrico, además demostró óptima sedimentación en comparación a los otros coagulantes. En esta investigación se encontró que existe una relación entre el tamaño de los flóculos con la cantidad de remoción, siendo así que a mayor tamaño de flóculos, mayor será la eliminación de metales pesados.

## **2.9.2 Optimización del proceso de remoción de metales pesados de agua residual de la Industria Galvánica por precipitación química**

En el trabajo desarrollado por Soto et al. (2006), se analizó la optimización de la remoción de metales pesados en un sistema de tratamiento de aguas industriales de una empresa de galvanizado ubicada en el noreste de México. Los valores de metales pesados deben estar en cumplimiento de la Norma Oficial Mexicana para las aguas que son vertidas al drenaje municipal. Para el tratamiento se utilizó el equipo de prueba de jarras, tomando en cuenta diferentes factores como el tiempo de floculación, velocidad de agitación y dosis de coagulante. El coagulante designado para la remoción de los metales fue el cloruro de hierro (III).

La investigación concluyó que la concentración de los metales  $\text{Cr}^{+3}$ ,  $\text{Fe}^{+3}$ ,  $\text{Zn}^{+2}$ ,  $\text{Ni}^{+2}$  alcanzaron la concentración permitida por la Legislación Mexicana tanto para el agua residual como el agua que alcanzó un pH de 8, luego del ajuste realizado con sosa cáustica al 20%. Por otro lado, mencionó que un exceso de coagulante afecta el proceso de sedimentación debido a que las especies químicas cargadas eléctricamente obstaculizan la desestabilización coloidal.

## **2.9.3 Diseño y manual de operación y mantenimiento de una planta de tratamiento de aguas residuales ácidas de una planta de galvanizado**

En el trabajo presentado por Coyoy (2013), se realizó el diseño para el desarrollo de una planta de tratamiento de aguas residuales ácidas proveniente de una industria galvánica de Guatemala. El proceso inició con la neutralización con hidróxido de calcio, coagulación/floculación, oxidación con inyección de aire y agitación, sedimentación de partículas y filtración. El agua tratada fue desechada a un cuerpo receptor cercano y/o rehusada para otros procesos luego de pasar por un filtro prensa, dependiendo de los resultados obtenidos.

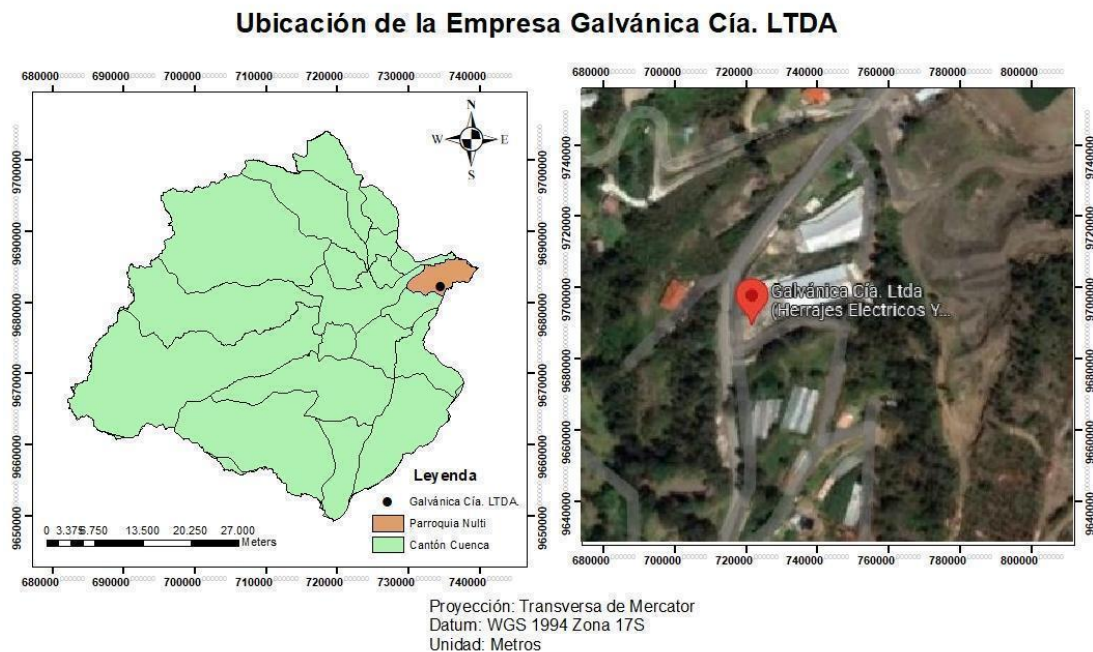
El coagulante usado fue el sulfato de aluminio, ya que el principal metal a remover fue hierro, el proceso fue realizado a escala industrial en un tanque de  $0.5\text{m}^3$ , por lo que la coagulación duró aproximadamente 2 horas. En la investigación se mencionó que es importante mantener un pH mayor a 8 para que el efluente se mantenga en condiciones óptimas.



### 3.1. Delimitación del área de estudio

#### 3.1.1 Ubicación

La empresa GALVÁNICA CIA. LTDA., se ubica en la vía a Jadán, entrada Llatcón km 1 como se indica en la ilustración 2, dentro de la parroquia rural de Nulti. La parroquia Nulti se encuentra a una altura de 2577 msnm, perteneciente al cantón Cuenca, provincia del Azuay. La parroquia Nulti es parte de las 21 parroquias rurales del cantón, tiene una extensión de 2883.42 Ha., ocupando el 1% del territorio cantonal. Al norte limita con las parroquias Llacao del cantón Cuenca y San Cristóbal del cantón Paute, al sur con las parroquias Paccha del cantón Cuenca y Jadán del cantón Gualaceo, al este con la parroquia Jadán y al oeste con la Parroquia Llacao y la ciudad de Cuenca (Gómez et al., 2015). El acceso principal a la parroquia es por la Av. Cultura Challuabamba desde la parte urbana de Machángara, por Challuabamba-Tablón, Allpayacu, Cofradía.



*Ilustración 2. Ubicación de la Empresa Galvánica Cía. LTDA.*

*Elaborado por: Autoras, 2022*

## 3.1.2. Lugar de estudio

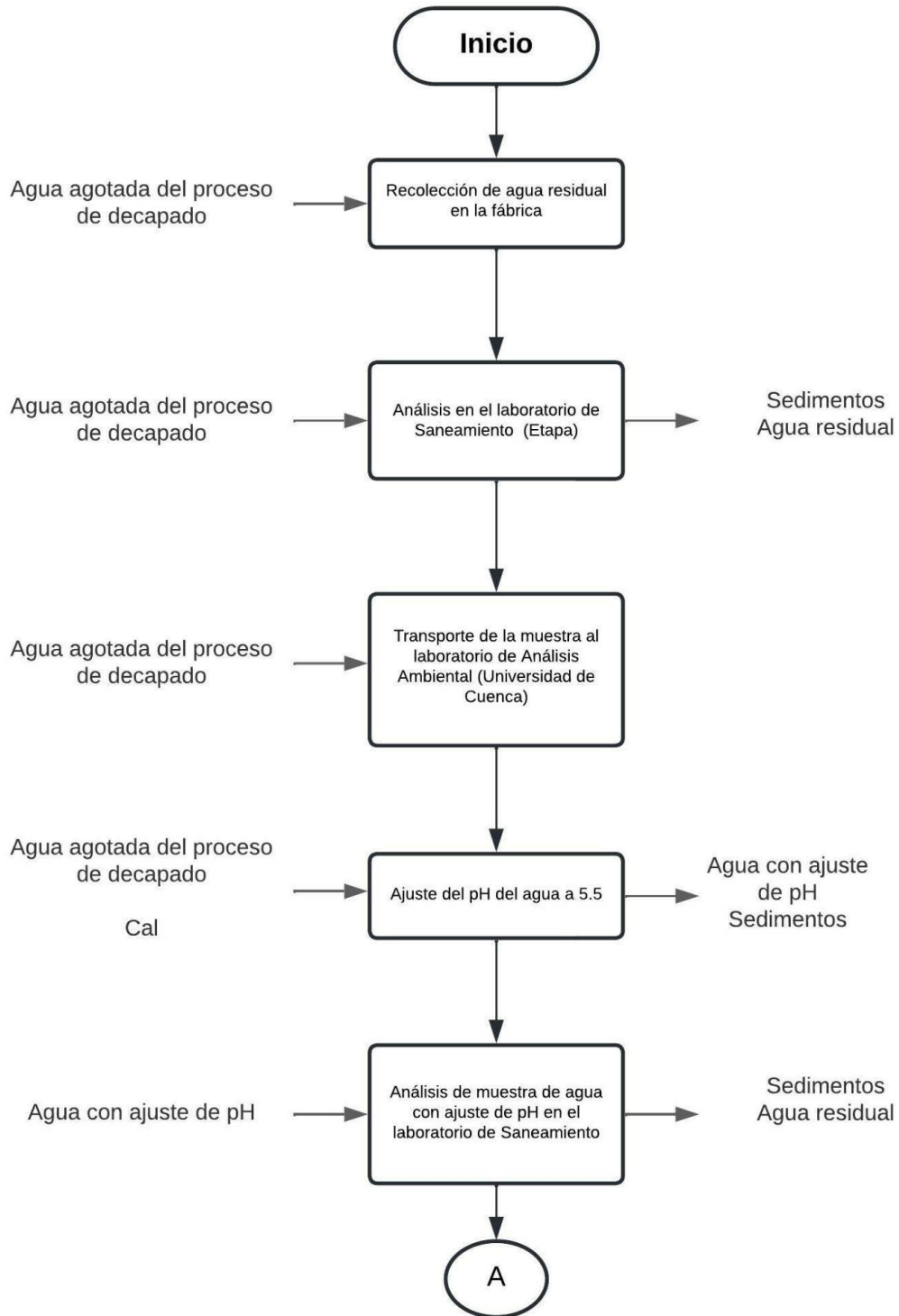
GALVÁNICA CIA. LTDA. es una empresa de metalmecánica y galvanizado, que realiza el armado, construcción, galvanizado y montaje de las estructuras metálicas con sus respectivos complementos para el sector de la Industria Eléctrica y de Telecomunicaciones, la cual se encuentra en funcionamiento desde el año 2009. Las coordenadas de ubicación son X: 734530 y Y: 9682319, el área total del terreno es de 11000m<sup>2</sup> y el área de construcción es de 1600m<sup>2</sup>. Los principales productos fabricados mensualmente dentro de la empresa son abrazadera galvanizada, cruceta ángulo galvanizado, pie amigo ángulo hierro galvanizado y bastidor galvanizado liviano (Rodríguez, 2020).

La empresa tiene tres naves para los diferentes procesos productivos, en la parte superior de la fábrica se encuentra la nave donde se realiza los procesos de decapado y galvanizado, esta área cuenta con una red de alcantarillado interno, donde colecta el agua de proceso del área de desengrase, decapado y lavado de pisos mediante un canal y una rejilla, posteriormente el agua residual es descargada a una quebrada que se encuentra ubicada al oeste de la fábrica.

## 3.2. Análisis de pH, Fe y Al del agua residual una vez completado el proceso de decapado de la industria GALVÁNICA CIA. LTDA.

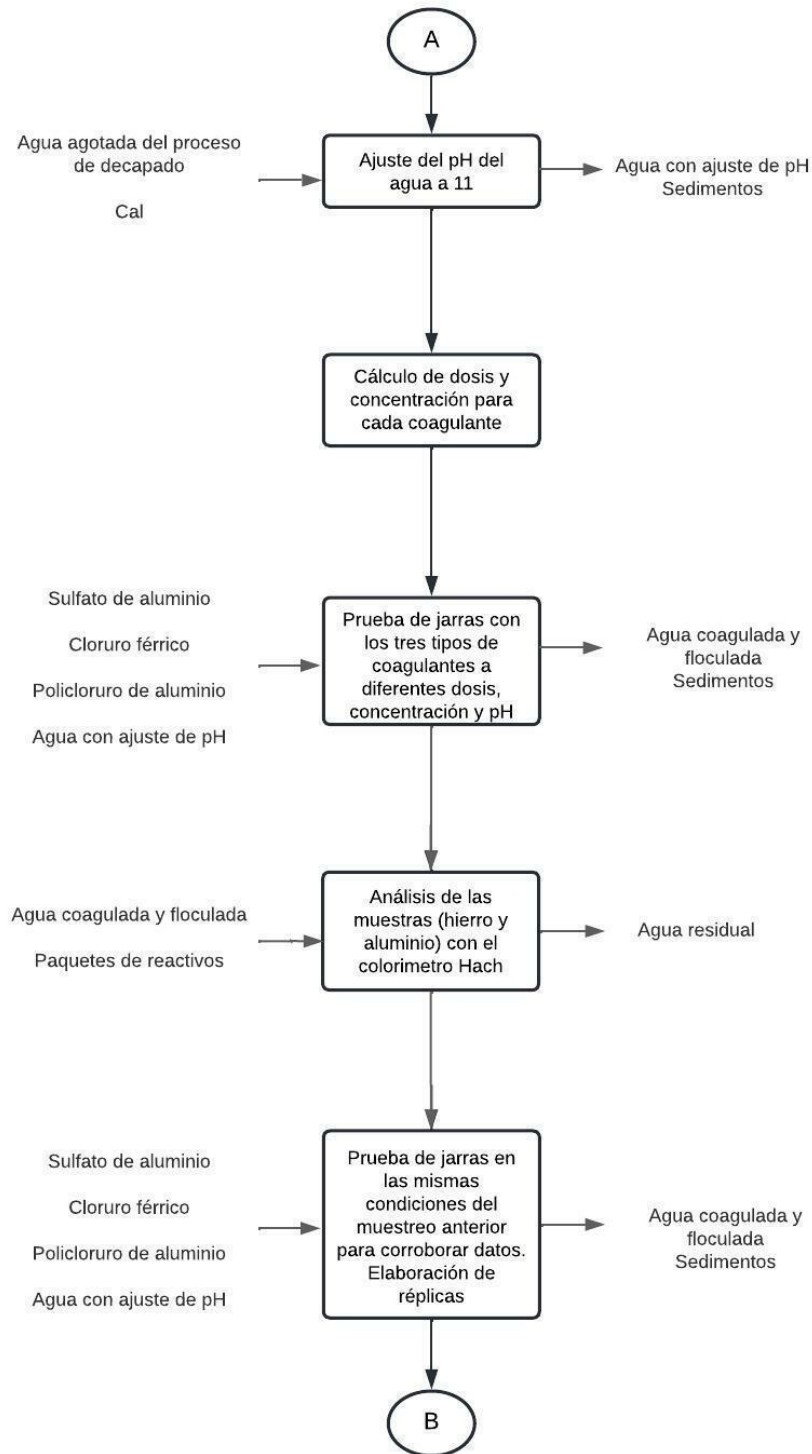
### 3.2.1. Diagrama de proceso

En la ilustración 3, 4 y 5, se indica el proceso a seguir en el presente estudio, el mismo que será detallado en los siguientes apartados.



*Ilustración 3. Diagrama explicativo del desarrollo práctico del estudio*

*Elaborado por: Autoras, 2022*



*Ilustración 4. Diagrama explicativo del desarrollo práctico del estudio*

*Elaborado por: Autoras, 2022*

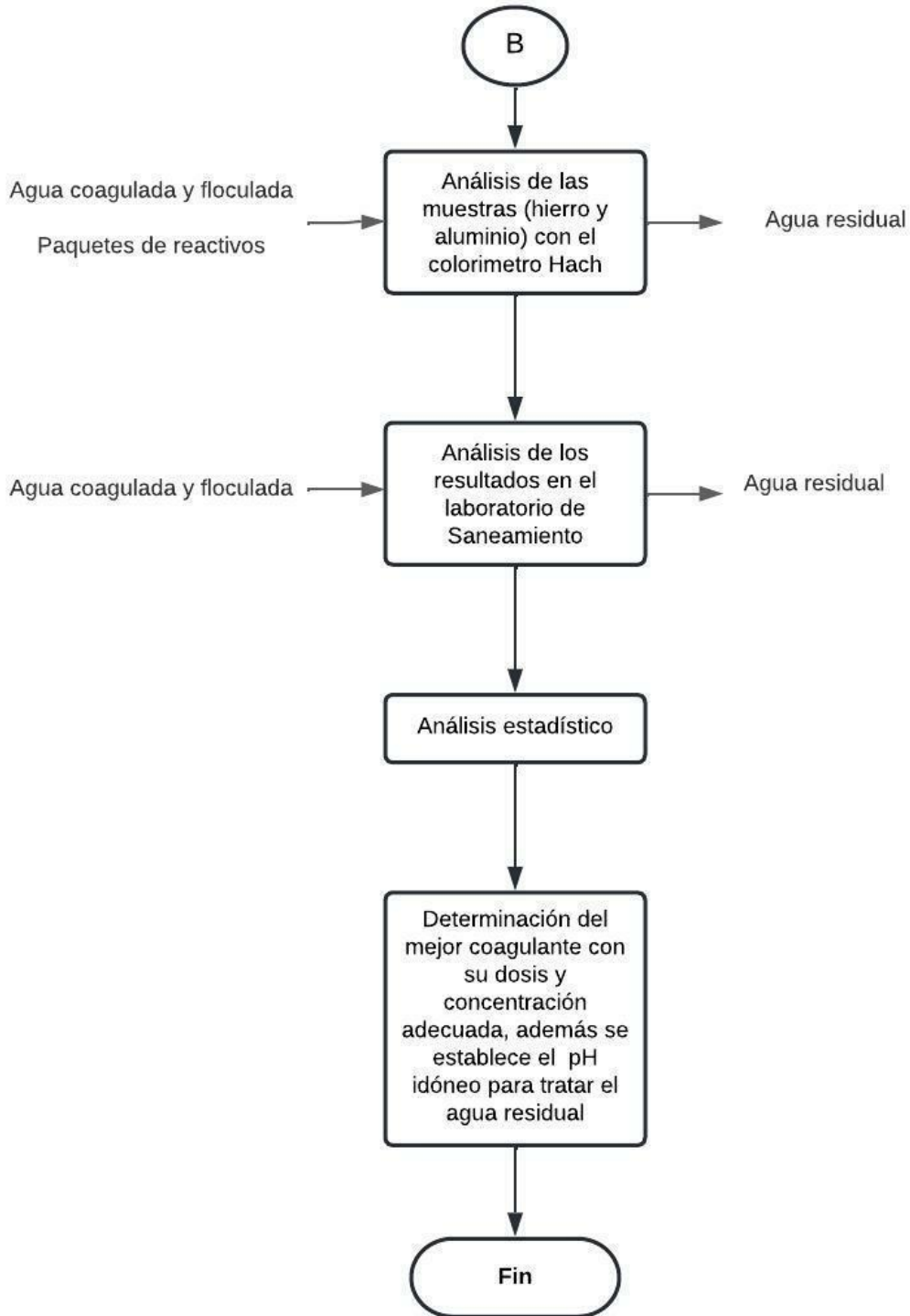


Ilustración 5. Diagrama explicativo del desarrollo práctico del estudio

*Elaborado por: Autoras, 2022*

## 3.2.2 Recolección de muestras

Las muestras recolectadas de agua residual, agua con pH ajustado y agua tratada con coagulantes fueron muestras simples. Las muestras simples son tomadas en un tiempo y lugar determinado para posteriormente realizar un análisis de manera individual (Otzen & Manterola, 2017). Dichas muestras fueron tomadas una vez agotado el agua del baño de decapado, en la empresa GALVÁNICA CIA. LTDA., lo cual permitió considerar la composición del agua original, el lugar, tiempo y circunstancias particulares (Instituto de toxicología de la Defensa, 2010). Para el muestreo se utilizó la Norma Técnica Ecuatoriana NTE INEN 2176:2013 AGUA. CALIDAD DEL AGUA. MUESTREO. TÉCNICAS DE MUESTREO. Siguiendo las directrices de la Norma técnica las muestras fueron puntuales, las cuales fueron recogidas de manera manual, indicando solamente la calidad del agua en el tiempo y en el lugar en que fue tomada. Se tomaron muestras puntuales, debido a que el estudio tuvo como uno de los objetivos comparar la calidad del agua con parámetros establecidos en la normativa nacional.

Para la toma de las muestras se utilizó recipientes que protegen la composición del agua, evitando contaminación por sustancias extrañas. Los recipientes utilizados fueron de plástico con una capacidad de 4 litros. Una vez que se realizó la toma de muestras se procedió a rotular cada recipiente, en donde se especificó la localización, la fecha y hora de recolección, el método usado, el nombre de la persona que realizó el muestreo, el nombre de la muestra y el análisis que se realizó en el laboratorio.

Para el manejo y conservación de las muestras de agua residual y agua con pH ajustado se utilizó la Norma Técnica Ecuatoriana NTE INEN 2169:2013 AGUA CALIDAD DEL AGUA. MUESTREO. MANEJO Y CONSERVACIÓN DE MUESTRAS. Se conservó adecuadamente las muestras evitando que se oxiden o que absorban dióxido de carbono. Se evitó en su totalidad que existan cambios en las muestras a causa de condiciones ambientales.

Para transportar las muestras, los recipientes fueron debidamente sellados y protegidos para así evitar que exista una pérdida en el momento de desplazar de un sitio a otro. Para la conservación de las mismas se utilizó un cooler, donde se colocó las muestras para luego trasladar al laboratorio. Una vez que fueron llevadas al laboratorio estuvieron conservadas bajo condiciones idóneas para evitar contaminaciones externas y cambios en su composición.

### 3.2.3. Análisis de laboratorio

Para comenzar el estudio, primero se caracterizó el agua residual de la cuba de decapado, tomando una muestra simple y llevándola al laboratorio de ETAPA. Posteriormente, se tomó otra muestra simple y se realizó el ajuste de pH al agua residual en el laboratorio de Análisis Ambiental de la Universidad de Cuenca, consecuentemente una parte de la muestra fue trasladada para una nueva caracterización en el laboratorio de ETAPA. Finalmente, el agua con pH ajustado fue usado para realizar las pruebas de jarras correspondientes con los diferentes coagulantes. Una vez acabado el proceso de coagulación y floculación experimental realizado en el laboratorio de la Universidad de Cuenca, se tomó muestras simples del agua tratada, las cuales fueron analizadas en el laboratorio de ETAPA. Los análisis del agua residual y agua con pH ajustado se realizaron para conocer los datos iniciales de aluminio y hierro total.

En el laboratorio de Saneamiento de ETAPA EP, se utilizó el método PEE/LS/FQ/07 para la determinación del pH. Este método se puede aplicar para aguas naturales, residuales o de consumo, la técnica que utiliza es electrometría (Servicio de Acreditación, 2006). Para la determinación del aluminio el laboratorio de ETAPA utilizó el método SM 3120 ICP. Este método tiene como base el Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater Edición 22 (Reinoso, 2014). Para la determinación de la cantidad de hierro, el laboratorio de ETAPA utilizó el método PEE/LS/AL/04, el cual consiste en aplicar la técnica de espectrofotometría óptica (Jaimes, 2020). Los resultados obtenidos fueron comparados con la normativa nacional vigente TULSMA, la sección de descargas de aguas residuales a un cuerpo de agua dulce, estos parámetros se encuentran en el libro VI, Anexo 1, tabla N°9.

### **3.3. Aplicación del test de jarras probando los coagulantes: sulfato de aluminio, policloruro de aluminio y cloruro férrico que permitirá remover la carga contaminante y metales del agua.**

#### **3.3.1. Ajuste de pH**

En el Laboratorio de Análisis Ambiental de la Universidad de Cuenca se efectuó un ajuste de pH del agua de decapado, puesto que, la misma estaba saturada con ácido clorhídrico, teniendo un pH inicial de 2.6. El volumen ocupado para el proceso fue de 20 l, el procedimiento se realizó a escala piloto de manera manual. El ajuste de pH fue de manera gradual con cal en polvo, para esto se utilizó la metodología realizada por Domínguez

(2012), en donde se utilizó una concentración de 9% de cal. Aunque en el trabajo realizado por Rojas & López. (2015), menciona que se debe ocupar del 1 al 4% de cal. Para este estudio se utilizó el 7.5% de cal que representa 1.5 kg de cal y se agitó la mezcla manual durante 15 minutos en base al estudio de Rojas & López. (2015). Posteriormente se midió el pH, el mismo que aumentó a 6. Mientras que, para ajustar el pH a 11 se agregó 3.25 kg de cal y el tiempo de agitación fue de 40 minutos, en base al estudio realizado por Rojas & López. (2015). Una vez obtenido el valor de pH deseado, se dejó reposar durante una hora para estabilizar la muestra.

### 3.3.2. Coagulación/Floculación mediante jar test

El proceso de coagulación y floculación experimental fue realizado en el equipo jar test del laboratorio de Análisis Ambiental de la Universidad de Cuenca. Para lo cual, primero se realizó la preparación de la solución de cada coagulante al 4% y al 10%, en una balanza analítica se pesó 4 g y 10 g de cada coagulante (sulfato de aluminio, policloruro de aluminio y cloruro férrico) por separado, para después diluirse en 100 ml de agua destilada con ayuda de un balón de aforo y así obtener las concentraciones deseadas. Posteriormente, se calculó la dosis aproximada de coagulante para cada jarra mediante la ecuación 1.

$$V \cdot D = v \cdot C$$

*Ecuación 1*

*Donde:*

V=Volumen de la jarra (ml)

D=Dosis de cada coagulante en (mg/l de coagulante)

v=Volumen de la solución de cada coagulante que debe tomarse para añadir en la jarra(ml)

C=Concentración del coagulante (4% y 10%)

Se despejó el volumen de cada coagulante de la ecuación 1 para obtener la ecuación 2.

$$v = (V \cdot D) / C$$

*Ecuación 2*



Se añadió cada coagulante en un balón de aforo de 100 ml. Posteriormente se vertió cada solución en un vaso de precipitación y se los agitó con varillas hasta que se disolvió cada coagulante. Después, se realizaron las mediciones de hierro, aluminio y pH en el agua residual, ajuste de pH y tratada químicamente. Para las diferentes pruebas de jarras realizadas se calculó el volumen de cada coagulante que se aplicó a cada jarra, los cuales se presentan en la tabla 3. Luego de calculado el volumen de coagulante, este fue medido en una jeringuilla, la misma que representó la dosis necesaria.

*Tabla 3. Volumen aplicado de los tres coagulantes para la prueba de jarras*

N° de jarra	Volumen de la jarra (ml)	Dosis de cada coagulante en (mg/L de coagulante)	Volumen añadido de la solución de cada coagulante (ml)
1	800	300	6
2	800	400	8
3	800	300	2.4
4	800	400	3.2

*Elaborado por: Autoras, 2022*

Para realizar el jar-test se tomó la muestra de agua con el pH ajustado, colocando 800 ml en cada una de las cuatro jarras que tiene el equipo. Luego, se colocó las dosis de cada coagulante con ayuda de una jeringa y se cargó cada jarra con 800 ml de agua con pH ajustado. Después, cada jarra se situó en un lugar en el equipo y se colocó con la revolución máxima, a los 30 segundos, se añadió el coagulante que fue preparado previamente en la jeringa al 4% y 10% y se esperó durante 30 segundos más para una simulación de mezcla rápida. Posteriormente, la velocidad fue reducida durante 15 minutos. Al concluir con los tiempos en el equipo, la muestra reposó por un periodo de media hora para que la sedimentación fuera mayor. El número de réplicas fue un total de 24 pruebas de jarras.

### **3.3.3. Análisis del agua tratada en el jar test**

Después de cada ensayo en el jar test se tomaron muestras de cada jarra y se midió de manera in situ, en el laboratorio de la Universidad de Cuenca, hierro y aluminio, por medio del colorímetro HACH DR 890. Al final del proceso de coagulación y floculación, se seleccionó las muestras con mayor remoción de Fe, Al y fueron llevadas al laboratorio de ETAPA, para un análisis de los metales mencionados anteriormente, con el fin de

corroborar los datos. Posteriormente, se realizaron dos réplicas con el fin de evaluar diferentes situaciones, tales como cambios en el pH del agua residual, y corroborar resultados.

### 3.3.4. Equipos y reactivos para el análisis de los parámetros para evaluar la eficiencia de la coagulación-floculación

El proceso de coagulación y floculación fue llevado a cabo en el laboratorio de Análisis Ambiental de la Universidad de Cuenca, en donde, se determinaron hierro, aluminio y pH. A continuación, en la Tabla 4 se detallan algunos de los equipos y reactivos utilizados en el laboratorio de Análisis Ambiental, mientras que el registro fotográfico se encuentra en el Anexo 3.

*Tabla 4. Equipos usados en el Laboratorio de Análisis Ambiental*

Parámetro	Equipo/Reactivo	Método	Interpretación
pH	Multiparámetro modelo HACH	Detección mediante sonda	Medición de pH con la sonda que se especifica en el manual del equipo. En la pantalla se mostrará los valores de las soluciones.
Hierro	Colorímetro HACH DR/890	Método 8008	Rango de medición: 0 - 3.00 mg/l
Aluminio		Método 8012	Rango de medición: 0–0.80 mg/l
Hierro	Paquetes de reactivos para detección con Colorímetro Hach dr 890	Método Ferro Ver	El reactivo de hierro Ferro Ver, reaccionó con todas las formas solubles del hierro y la mayoría de las formas no solubles del hierro en la muestra, para producir hierro ferroso soluble.
Aluminio		Método Aluminón	El indicador de aluminio se combinó con el aluminio de la muestra para formar un color rojo anaranjado. La intensidad del color es proporcional a la concentración de aluminio. Se agregó ácido ascórbico para eliminar la interferencia de hierro.

Elaborado por: Autoras, 2022

Se utilizó la balanza SARTORIUS, para pesar correctamente la cantidad de cada coagulante a colocar en sus diferentes dosis. Para determinar el hierro y aluminio removido

en la prueba de jarras, se utilizó el Colorímetro HACH DR/890. Para realizar la medición de estos parámetros se colocó 25 ml de agua tratada en una celda de vidrio con su reactivo correspondiente y se colocó dentro del colorímetro, se cerró el cobertor para medir cada indicador. Otro equipo que se utilizó es el equipo Multiparámetros marca HACH, el cual permitió determinar el pH del agua antes y después del proceso de coagulación. También se utilizó el equipo de prueba de jarras, marca Orbeco Hellige que está constituido de diferentes partes: un agitador mecánico de cuatro paletas. iluminador de flóculos, cuatro vasos de precipitado de un litro cada uno y un microprocesador para programar los gradientes y el tiempo.

### **3.4. Selección del coagulante más adecuado en función de los resultados de las pruebas de jarras.**

#### **3.4.1. Análisis Multivariado de Varianza (MANOVA)**

Para realizar el análisis estadístico se planteó la siguiente hipótesis: la eficacia del porcentaje de remoción del aluminio y hierro dependen del tipo de coagulante usado, así como de su dosificación y concentración; además influye el pH del agua a tratar.

Para comenzar con el análisis estadístico, se realizó una tabla en donde se han colocado todos los parámetros los cuales son: tipo de coagulante, pH del agua residual, dosificación del coagulante, concentración del coagulante, porcentaje de remoción de hierro y aluminio. Una vez obtenido el porcentaje de remoción de cada metal con diferente coagulante, se procedió a realizar la prueba de MANOVA utilizando el software Rstudio versión 1.4.1.106.exe.

#### **a. Linealidad:**

Para esta prueba se determinó los supuestos del MANOVA, empezando con la determinación del coeficiente de correlación de Pearson usando el código:

```
cor(Datos)
```

Siendo "Datos" el nombre de los datos a utilizar (tipo de coagulante, pH del agua residual, dosis del coagulante, concentración del coagulante y porcentajes de remoción de hierro y aluminio) cargado al software Rstudio. Una vez realizado el coeficiente de Pearson y

determinado que existe una relación lineal entre las diversas variables planteadas se procedió al siguiente paso.

## b. Distancia Mahalanobis

Se realizó la distancia de Mahalanobis, para lo cual primero se generó un código en donde existe la relación entre las variables dependientes, el código es:

```
Var.dep <- cbind (Datos$`% Remoción de Fe`, Datos$`% Remoción de Al`)
```

En donde “Var.dep”, hace referencia a cómo se llama la relación entre las variables dependientes. Posteriormente, se ingresó el código para determinar la distancia Mahalanobis el cual es:

```
D2<- mahalanobis (Var.dep, center = colMeans(Var.dep), cov = var(Var.dep)); D2
```

En donde, D2 expresa el resultado de la distancia de Mahalanobis. Posteriormente, se determinó la distancia considerando que Mahalanobis sigue una distribución “chi cuadrada” con grados de libertad igual al número de variables que para este caso, son dos variables dependientes. Para ello se aplicó el código:

```
cutoff <- qchisq (p = 1-alpha, df = ncol(Var.dep)); cutoff
```

Siendo “alpha” el umbral el cual representa a 0.001, en donde si es mayor a dicho valor pues se consideran datos multivariados.

## c. Normalidad

A continuación, se procedió a realizar la prueba de normalidad en donde se utilizó el código:

```
boxM (Var.dep, Datos$`Tipo`*Datos$`Concentración (%)`*Datos$`Dosis (mg/l)`*Datos$`pH`, data = Datos)
```

Adicional, en el presente estudio se realizó una prueba de normalidad por medio de Shapiro-Wilk en donde se utilizó el código:

```
shapiro.test(Var.dep)
```

En el caso de que las condiciones de las diferentes variables no sean normales, se hubiera procedido a utilizar la prueba de Friedman.

## d. MANOVA

Una vez realizado todos los supuestos basados en Avendaño et al. (2014), se calculó MANOVA, en donde se analizó las variables dependientes que en este caso son %remoción de Fe y %remoción del Al, en relación con las variables independientes que para este caso son el tipo de coagulante, el pH, la concentración (%) y la dosis (mg/l), este análisis se realiza por medio del código:

```
modelo1 = manova (Var.dep ~ Datos$Tipo *Datos$`Concentración (%)` * Datos$`Dosis
(mg/l)` * Datos$pH)

summary(modelo1)
```

## e. ANOVA

Para realizar el análisis estadístico por medio de ANOVA primero se considera una variable dependiente y las variables independientes. Para este estudio se realizó dos análisis de ANOVA, considerando que se dispone de dos variables dependientes. La primera variable dependiente es el porcentaje de remoción de hierro y la segunda variable dependiente es el porcentaje de remoción de aluminio. Las variables independientes para los dos análisis son el tipo de coagulante, la dosis del coagulante a usar, la concentración del coagulante a usar y el pH del agua residual a tratar. En el software Rstudio realizó esta prueba estadística en donde se digitó los siguientes códigos:

```
modelo2 = anova (Datos$`% Remoción de Fe`, Datos$Tipo *Datos$`Concentración (%)` *
Datos$`Dosis (mg/l)` * Datos$pH)

modelo3 = anova (Datos$`% Remoción de Al`, Datos$Tipo *Datos$`Concentración (%)` *
Datos$`Dosis (mg/l)` * Datos$pH)
```

## f. Tukey-HSD

Para realizar una comparación entre los tres tipos de coagulantes utilizados en el presente estudio y la remoción de los metales, se ha basado en un estudio previo de ANOVA, en donde se dispone de dos variables. La variable independiente para este caso es el tipo de

# UCUENCA

coagulante y la variable dependiente es el porcentaje de remoción de hierro y aluminio por separado, para lo cual se aplicó los siguientes códigos:

modelo 4 = aov (%Remoción de Fe ~ Tipo de Coagulante)

modelo 5 = aov (%Remoción de Al ~ Tipo de Coagulante)

Posteriormente se aplicó Tukey-HSD por medio de los códigos:

TukeyHSD (modelo4)

TukeyHSD (modelo5)

## Capítulo IV: Resultados y discusión

### 4.1. Resultados

#### 4.1.1. Resultados del análisis de pH, hierro y aluminio en el agua residual y con pH ajustado y su comparación con la normativa nacional.

En la Tabla 5 se puede observar los resultados de pH, hierro y aluminio de la fase de agua residual que fueron determinados en el laboratorio, los cuales fueron comparados con el límite máximo permisible según la Normativa Legal Vigente. En el Libro VI, Anexo 1, tabla 9 del Texto Unificado de Legislación Secundaria del Ministerio del Ambiente (TULSMA), se encuentra los criterios referentes a descarga de efluentes a un cuerpo de agua dulce, así como el límite máximo permisible de los parámetros hierro y aluminio que fueron analizados.

En lo referente al aluminio, el agua residual del proceso de decapado tuvo un valor de 64.46 mg/l, mientras que el agua con ajuste de pH obtuvo un valor de 34.34 mg/l, es decir se dio una reducción de 30.12 mg/l. Por otro lado, el contenido de hierro en agua residual del mismo proceso fue de 137139.06 mg/l, en tanto, el agua con pH ajustado tuvo un valor de 117700 mg/l, disminuyendo un total de 19439.06 mg/l. Se puede observar que después del ajuste de pH con cal, disminuyó la concentración de hierro y aluminio, es decir, al existir un aumento de pH la cantidad de estos metales pesados disminuyó. Sin embargo, ni en el agua residual ni en el agua con pH ajustado cumplió el límite máximo permisible, tal como se observa en la tabla 5. En base a los resultados obtenidos y de acuerdo con lo establecido en el TULSMA, se procedió a realizar el tratamiento de coagulación/floculación, cuyos resultados fueron analizados en incisos posteriores.

*Tabla 5. Resultados para agua residual y con ajuste de pH*

Tipo de Agua	pH	Aluminio (mg/l)	Hierro (mg/l)	Límite máximo permisible Hierro (mg/l)	Límite máximo permisible Aluminio (mg/l)	Cumplimiento Normativa	
						Si	No
Residual	<4	64.46	137139.06	10	5		X
pH ajustado	5.10	34.34	117700.00				X

Elaborado por: Autoras, 2022

## 4.1.2. Resultados de pH, hierro y aluminio del agua tratada

En las Tablas 6,7 y 8 se indican los resultados obtenidos en la remoción de aluminio y hierro luego de la prueba de jarras usando los tres diferentes coagulantes: cloruro férrico, sulfato de aluminio y policloruro de aluminio respectivamente. Los coagulantes fueron escogidos debido a su mayor capacidad de remoción según el estado de arte analizado anteriormente. Los valores de remoción fueron obtenidos luego de la prueba de jarras usando diferentes dosis y concentraciones de coagulante, así como a diferente pH que fueron determinados en el laboratorio. Además, en la tabla 9 se señalan los valores máximos y mínimos de cada una de las réplicas de los tres coagulantes que fueron realizadas para una mejor precisión. Al igual que en el inciso 4.1.1 estos resultados, fueron comparados con Libro VI, Anexo 1, tabla 9 del Texto Unificado de Legislación Secundaria del Ministerio del Ambiente (TULSMA), con los criterios referente a descarga de efluentes a un cuerpo de agua dulce.

La Tabla 6 se indica los valores de hierro y aluminio residual, así como el porcentaje de remoción de estos metales usando el coagulante sulfato de aluminio. Para el hierro el valor máximo obtenido durante las pruebas de jarras fue de 9736.48 mg/l y el resultado más bajo fue de 2456.78 mg/l. El porcentaje de remoción para el agua con pH ajustado fue de 91.73% y 97.91% respectivamente. En el estudio realizado por Regalado et al. (2004), los valores resultantes también fueron reducidos en gran medida por el sulfato de aluminio con un porcentaje de remoción de 99.67%. Regalado et al. (2004) mencionó que, el coagulante con mejor efectividad para la remoción de hierro fue el cloruro férrico (99.81% de remoción), sin embargo, en el presente estudio el sulfato de aluminio fue el que tuvo un mayor poder de remoción de este metal.

El aluminio después del tratamiento con el sulfato de aluminio obtuvo un valor máximo de 9.89 mg/l y el valor más bajo fue de 2.373 mg/l. El porcentaje de remoción para este metal fue de 71.19% y 93.09% respectivamente. Lee & Kim (2020) en su estudio determinaron que la concentración de aluminio se redujo (76.5% de remoción), sin embargo, no tuvo un cambio significativo en su estudio por lo que sugiere aumentar la dosis del coagulante para comprobar su eficiencia.

En el trabajo realizado por Vargas & Romero (2010), en donde se ha analizado varios coagulantes para el tratamiento de aguas residuales entre ellos el sulfato de aluminio y el cloruro férrico, se destacó el sulfato de aluminio por sus características, además se mencionó que el pH adecuado del agua residual estuvo entre 6 a 7.3.

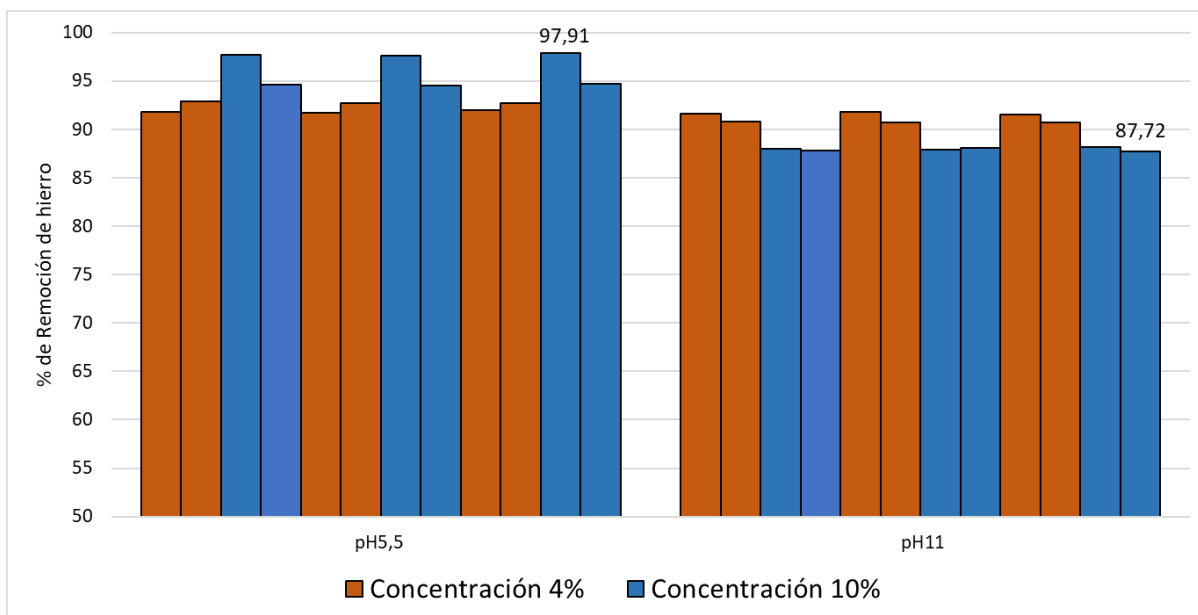


Tabla 6. Resultados de remoción de hierro y aluminio aplicando Sulfato de aluminio

Sulfato de Aluminio	Concentración (%)	Dosis (mg/l)	pH	Hierro (mg/l)	Aluminio (mg/l)	% Remoción de Fe	% Remoción de Al
1	4	300	5.5	9622.63	9.89	91.82	71.19
1	4	400	5.5	8405.31	8.28	92.86	75.89
1	10	300	5.5	2724.48	2.47	97.69	92.81
1	10	400	5.5	6318.47	5.89	94.63	82.85
1	4	300	11	4936.80	5.76	91.61	66.46
1	4	400	11	5396.04	6.61	90.83	61.46
1	10	300	11	7072.25	7.63	87.98	55.54
1	10	400	11	7164.10	9.10	87.83	47.00
2	4	300	5.5	9736.48	9.83	91.73	71.37
2	4	400	5.5	8602.45	7.61	92.69	77.85
2	10	300	5.5	2815.76	2.37	97.61	93.09
2	10	400	5.5	6456.64	5.35	94.51	84.43
2	4	300	11	4843.21	5.91	91.77	65.59
2	4	400	11	5487.36	7.00	90.68	59.23
2	10	300	11	7148.52	7.80	87.85	54.55
2	10	400	11	7037.24	9.15	88.04	46.69
3	4	300	5.5	9432.25	9.63	91.99	71.97
3	4	400	5.5	8568.12	8.52	92.72	75.19
3	10	300	5.5	2456.78	2.56	97.91	92.54
3	10	400	5.5	6268.79	5.71	94.67	83.39
3	4	300	11	5008.97	5.79	91.49	66.25
3	4	400	11	5478.64	6.60	90.69	61.55
3	10	300	11	6989.04	7.90	88.12	53.97
3	10	400	11	7229.33	9.08	87.72	47.10

Elaborado por: Autoras, 2022

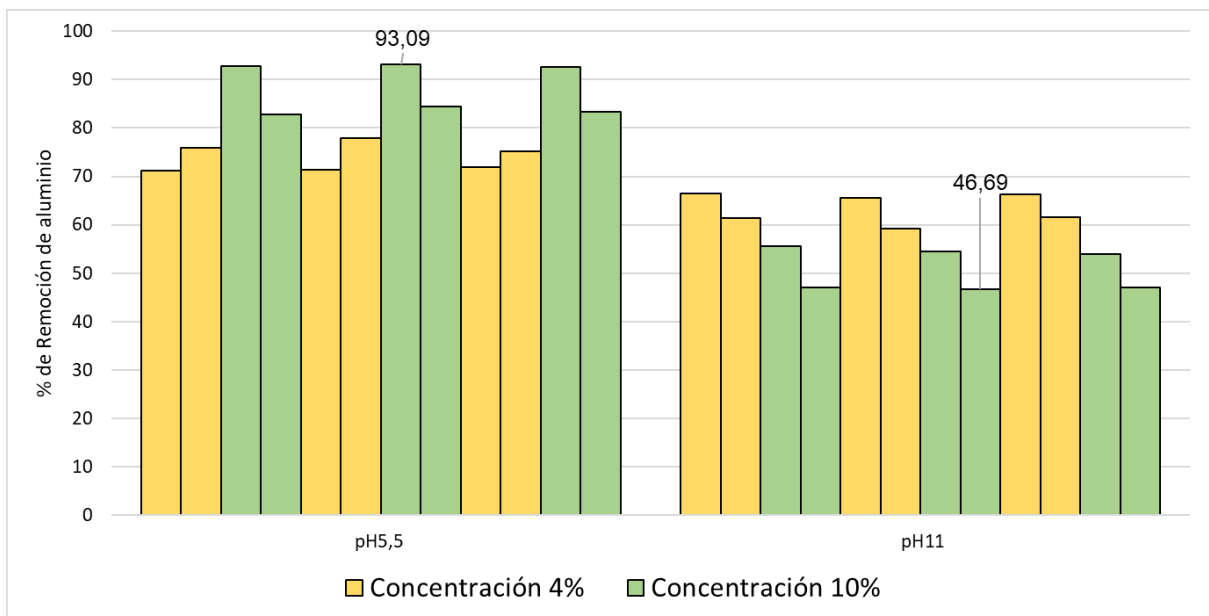
En las ilustraciones 6 y 7 se puede observar con mayor detalle, los porcentajes de remoción máximos y mínimos de hierro y aluminio a diferentes pH y concentraciones analizadas con el sulfato de aluminio. Tanto en el caso del hierro como del aluminio, los mejores resultados se obtuvieron con un pH de 5.5 y una concentración del 10%. La remoción más baja de hierro con sulfato de aluminio fue de 87.72% (7229.33 mg/l) y la remoción máxima fue de 97.91% (2456.78 mg/l). Si bien, la cantidad de hierro disminuyó en gran medida luego del tratamiento con el coagulante, no cumplió el límite máximo permisible (10 mg/l) establecido con la Normativa Nacional.



*Ilustración 6. Porcentaje de remoción de hierro luego de la aplicación de Sulfato de Aluminio*

Elaborado por: Autoras, 2022

Mientras que, en el caso del aluminio (Ilustración 7) de todos los análisis realizados, cuatro de las 12 réplicas cumplieron con lo planteado en el TULSMA, y los 8 restantes superaron el límite de 5 mg/l por valores mínimos. En este caso, con una concentración del 10% y pH de 5.5, se obtuvo una mayor eficiencia con una remoción de 93.09% (2.373 mg/l), siendo el mejor resultado obtenido a esa concentración y pH de los tres coagulantes. Mientras que el porcentaje de remoción más bajo fue de 46.69% (9.154 mg/l) el cuál no cumple con el límite máximo permisible para la descarga a cuerpos de agua dulce.



*Ilustración 7. Porcentaje de remoción de aluminio luego de la aplicación de Sulfato de Aluminio*

Elaborado por: Autoras, 2022

En la Tabla 7 se presentan los resultados de hierro y aluminio residual obtenidos en el jar test utilizando el policloruro de aluminio (PAC). En el caso del hierro el valor más alto fue de 24134.76 mg/l, mientras que el valor más bajo fue de 4625.13 mg/l. El porcentaje de remoción de los valores mencionados anteriormente es de 79.49% y 92.14% respectivamente para este metal. En el trabajo realizado por Durán (2016) aplicando PAC como coagulante se logró obtener una mayor remoción de hierro (97.8%) con un pH de 9.5, al igual que en el presente estudio, en donde se obtuvo mejores resultados de remoción con un pH de 11. Es importante mencionar que para el uso de PAC como coagulante es mejor que sea aplicado en aguas con basicidad alta, ya que, mientras mayor sea la dosificación de PAC, este se hidroliza y provoca una disminución del pH (González, 2012).

Para la eliminación de aluminio en el agua tratada con el PAC como coagulante, se obtuvo un valor máximo de 6.52 mg/l y 1.35 mg/l como valor mínimo de las muestras durante el estudio. El porcentaje de remoción mínimo y máximo es correspondiente a 81.01% y 96.07% respectivamente. En el estudio de Durán (2016), la presencia de aluminio también se redujo de manera significativa después de la aplicación de PAC con una reducción del 97.7% y obtuvo mejores resultados con un pH de alrededor de 5 a 7. Se pudo observar que

no hubo una diferencia significativa en los valores de remoción de aluminio obtenidos con un pH básico tanto en el trabajo mencionado como en el presente estudio.

También en el estudio realizado por Moscoso (2016), en donde de igual manera se utilizó PAC como coagulante a un pH de 6.8 para remover aluminio y hierro, pero se obtuvo como resultados una eliminación del 66% para hierro y 81% para aluminio, por lo que se determinó que este coagulante es más efectivo para la remoción de aluminio.

*Tabla 7. Resultados de remoción de hierro y aluminio aplicando Policloruro de Aluminio*

PAC	Concentración (%)	Dosis (mg/l)	pH	Hierro (mg/l)	Aluminio (mg/l)	% Remoción de Fe	% Remoción de Al
1	4	300	5.5	24072.24	6.44	79.55	81.24
1	4	400	5.5	21956.00	1.44	81.35	95.82
1	10	300	5.5	17191.96	3.10	85.39	90.96
1	10	400	5.5	16136.34	3.89	86.29	88.66
1	4	300	11	7586.53	2.04	87.11	88.12
1	4	400	11	6419.37	2.14	89.09	87.56
1	10	300	11	4752.00	2.28	91.93	86.71
1	10	400	11	7086.32	3.04	87.96	82.32
2	4	300	5.5	24134.76	6.21	79.49	81.92
2	4	400	5.5	22017.74	1.35	81.29	96.07
2	10	300	5.5	17098.76	3.40	85.47	90.10
2	10	400	5.5	16286.47	3.96	86.16	88.47
2	4	300	11	7624.48	2.09	87.04	87.83
2	4	400	11	6541.12	2.16	88.89	87.42
2	10	300	11	4625.13	2.21	92.14	87.13
2	10	400	11	6957.14	3.23	88.18	81.19
3	4	300	5.5	24104.65	6.52	79.52	81.01
3	4	400	5.5	21998.14	1.49	81.31	95.66

Continuación de la Tabla 7

3	10	300	5.5	17185.02	3.07	85.40	91.06
3	10	400	5.5	16203.75	3.68	86.23	89.28
3	4	300	11	7512.03	1.97	87.24	88.53
3	4	400	11	6498.11	2.17	88.96	87.36
3	10	300	11	4718.51	2.31	91.98	86.55
3	10	400	11	7069.16	3.16	87.99	81.60

Elaborado por: Autoras, 2022

En la ilustración 8, se identifican los porcentajes de remoción máximos y mínimos a pH 5.5 y 11 y las concentraciones usadas de policloruro de aluminio. El hierro obtuvo mejores resultados con una remoción de 92.14%, en este caso el pH fue de 11, una concentración de 10% y dosis de 300 mg/l, sin embargo, no cumple con la normativa para descarga de efluentes a un cuerpo de agua dulce. Mientras que el porcentaje de remoción más bajo fue de 79.49%, el pH fue de 5.5, con una concentración de 4% y una dosificación de 300 mg/l.

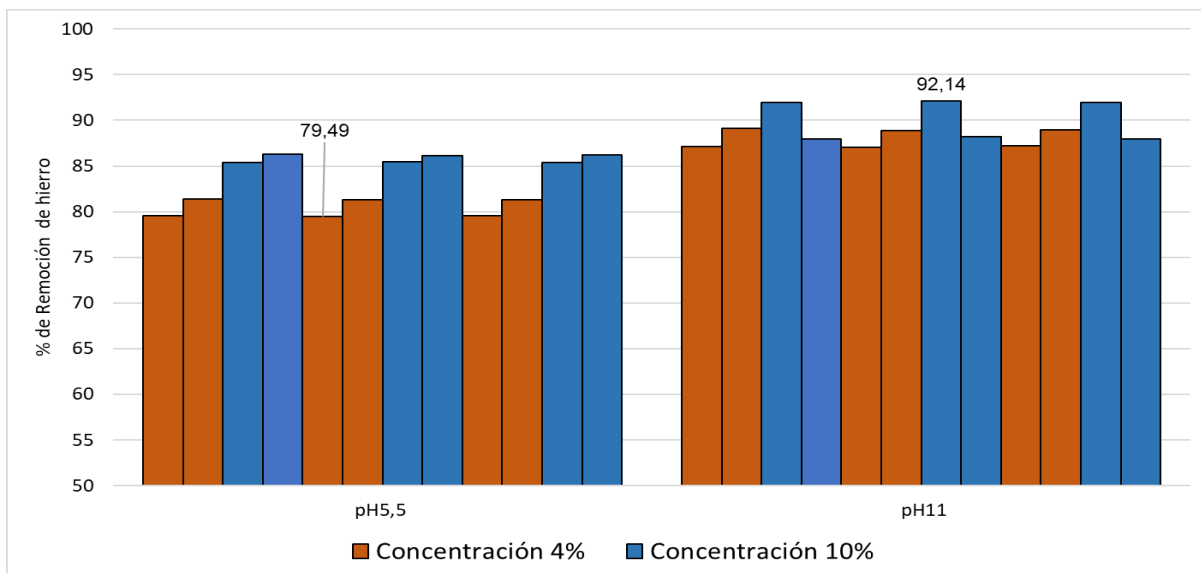
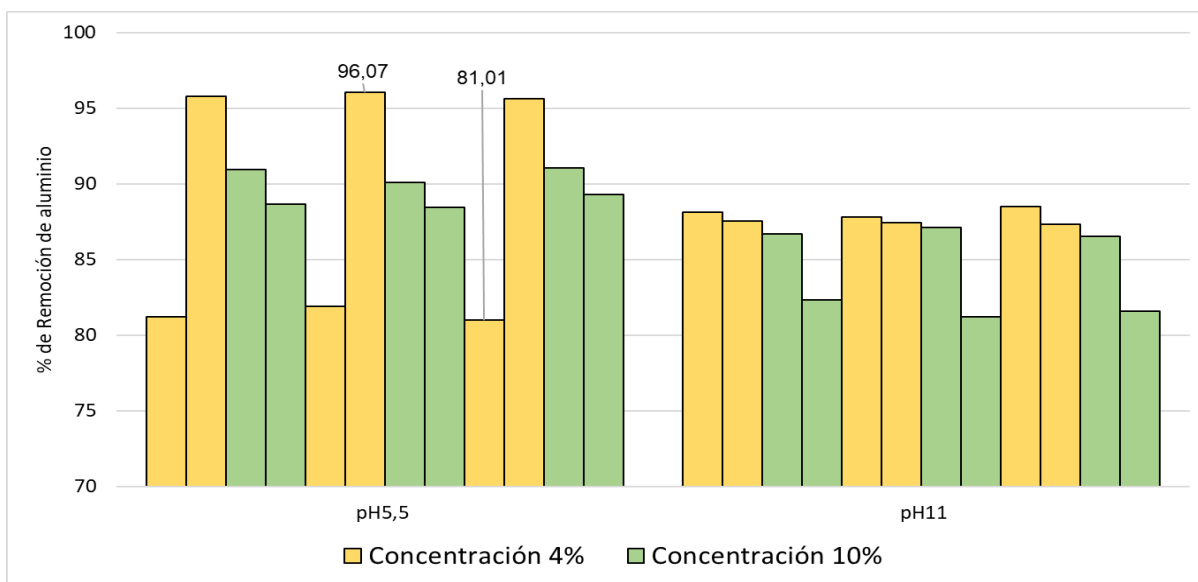


Ilustración 8. Porcentaje de remoción de hierro luego de la aplicación de Policloruro de Aluminio

Elaborado por: Autoras, 2022

En la ilustración 9 se identifican los porcentajes de remoción para el aluminio con el policloruro de aluminio. En este caso los valores de aluminio obtenidos luego del proceso

de coagulación/floculación cumple con la normativa en la mayoría de las muestras, el mejor porcentaje de remoción obtenido fue de 96.07% y el menor porcentaje fue de 81.01%. Estos dos porcentajes antes mencionados fueron obtenidos para un pH del agua de 5.5 y una concentración de PAC de 4%, sin embargo, la diferencia radica en la dosis ya que se obtuvo mejor resultado de remoción con la dosificación de 400 mg/l.



*Ilustración 9. Porcentaje de remoción de aluminio luego de la aplicación de Policloruro de Aluminio*

Elaborado por: Autoras, 2022

En la Tabla 8 se identifican los valores resultantes luego del tratamiento realizado con cloruro férrico como coagulante. El valor máximo de hierro fue de 91054.21 mg/l y el valor mínimo fue de 36298.53 mg/l. El porcentaje de remoción para los valores anteriores fue de 16.58% y 38.32%. En el estudio de Regalado et al. (2004) se identificó al cloruro férrico como el mejor coagulante para la remoción de hierro (99.81%), en este trabajo este coagulante obtuvo deficientes resultados en todas las muestras triplicadas.

La remoción de aluminio obtuvo mejores resultados aplicando cloruro férrico, el valor máximo luego del proceso de coagulación/floculación fue de 3.81 mg/l y 0.53 mg/l como valor mínimo. Con respecto a este metal, el porcentaje de remoción de los valores mencionados fue de 88.89% y 96.91%. En el estudio de Durán (2016) se indica que para este metal con un pH de 6.5, también se obtuvo resultados favorables con el cloruro férrico (93.6% de remoción) con respecto a otro tipo de coagulantes usados para su análisis.

A pesar de demostrar un excelente porcentaje de remoción de aluminio, no es un coagulante adecuado para trabajar en la remoción de ambos metales, debido al bajo porcentaje de remoción para el hierro. A diferencia del trabajo realizado por Caviedes et al. (2015), en donde se utilizó dicho coagulante para tratar aguas cargadas con metales pesados, se obtuvo una remoción de hierro del 83%. En el trabajo de Caviedes et al. (2015) se utilizó un pH de 7 para tratar el agua y en el presente trabajo se utilizó un pH de 5.5 y 11. A pesar de tener variabilidad en el pH en el presente estudio, no se ha obtenido un resultado factible con el coagulante cloruro férrico para la remoción de hierro.

*Tabla 8. Resultados de remoción de hierro y aluminio aplicando Cloruro férrico*

Cloruro férrico	Concentración (%)	Dosis (mg/l)	pH	Hierro (mg/l)	Aluminio (mg/l)	% Remoción de Fe	% Remoción de Al
1	4	300	5.5	90967.93	3.81	22.71	88.89
1	4	400	5.5	79596.94	3.05	32.37	91.11
1	10	300	5.5	72648.00	1.63	38.27	95.25
1	10	400	5.5	73279.72	1.26	37.74	96.32
1	4	300	11	36778.97	0.66	38.32	96.15
1	4	400	11	36432.00	1.10	38.09	93.56
1	10	300	11	43718.40	1.21	25.71	92.93
1	10	400	11	48922.97	1.31	16.86	92.37
2	4	300	5.5	91032.72	3.44	22.65	89.98
2	4	400	5.5	79468.04	2.87	32.48	91.64
2	10	300	5.5	72699.69	1.84	38.23	94.64
2	10	400	5.5	73312.07	1.57	37.71	95.42
2	4	300	11	36298.53	0.53	38.32	96.91
2	4	400	11	36607.73	1.19	37.79	93.07
2	10	300	11	43610.95	1.23	25.89	92.83

Continuación de la Tabla 8

2	10	400	11	49087.43	1.41	16.58	91.78
3	4	300	5.5	91054.21	3.63	22.63	89.43
3	4	400	5.5	80043.03	3.28	31.99	90.44
3	10	300	5.5	72689.17	1.61	38.24	95.31
3	10	400	5.5	73469.03	1.4	37.57	95.92
3	4	300	11	36506.19	0.69	37.96	95.98
3	4	400	11	36515.47	1.16	37.95	93.24
3	10	300	11	43895.09	1.39	25.41	91.90
3	10	400	11	48896.29	1.38	16.91	91.96

Elaborado por: Autoras, 2022

En la ilustración 10 se presentan los porcentajes de remoción de hierro máximos y mínimos obtenidos para un pH de agua de 5.5 y 11, las concentraciones usadas de cloruro férrico fueron de 4 y 10%. El hierro obtuvo mejores resultados (remoción de 38.32%) con un pH de agua de 11, aplicando una concentración de cloruro férrico de 4% y dosis de 300 mg/l. Sin embargo, este valor de remoción fue muy bajo con respecto a los resultados obtenidos con los otros dos coagulantes, siendo evidente que no cumple con los resultados esperados para la remoción de hierro.

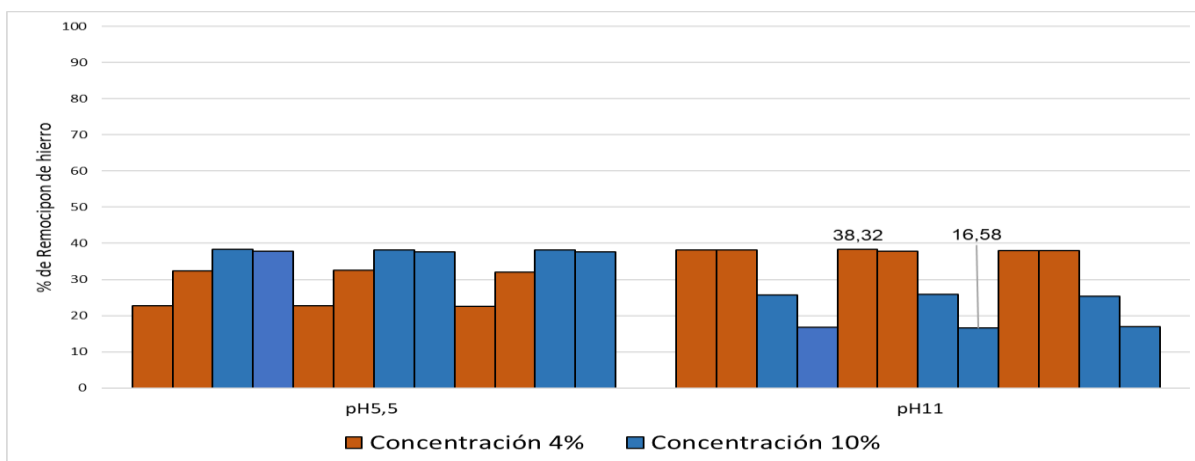
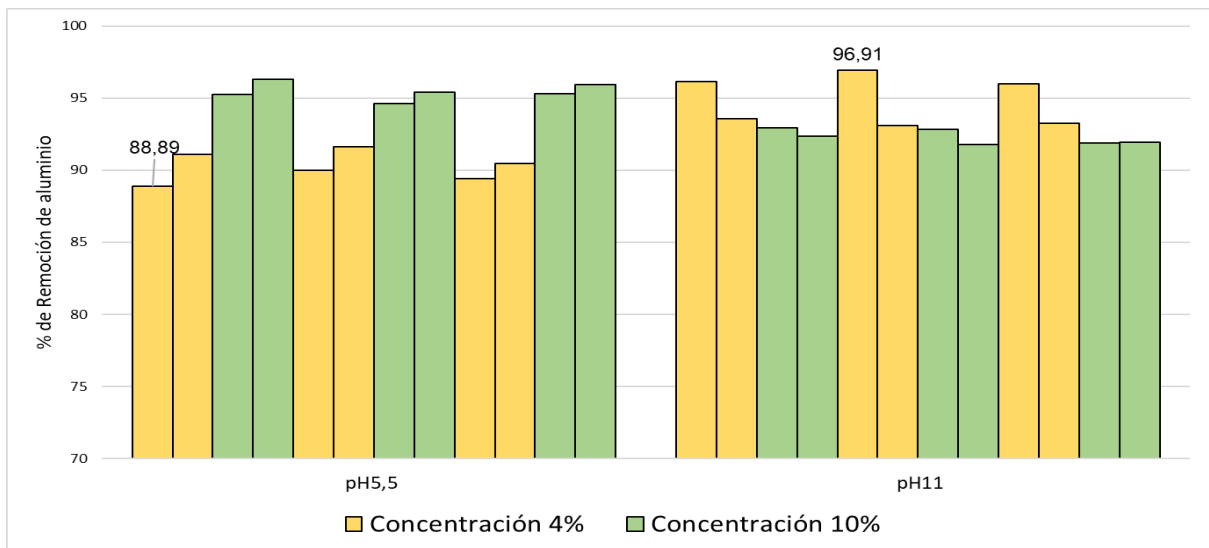


Ilustración 10. Porcentaje de remoción de hierro luego de la aplicación de Cloruro férrico

Elaborado por: Autoras, 2022



En la ilustración 11 se identifica el porcentaje de remoción de aluminio, este metal obtuvo mejores resultados de eliminación en comparación con los otros dos coagulantes, la mayor remoción fue de 96.91% con un pH de 11, concentración de 4% y dosificación de 300 mg/l, mientras que el resultado con menor remoción fue de 88.89%, esta muestra tuvo un pH de 5.5, concentración de 4% y dosis de 300 mg/l. Sin embargo, en los dos casos se cumplió con la normativa legal y se considera ampliamente efectivo para la remoción de este metal.



*Ilustración 11. Porcentaje de remoción de aluminio aplicando cloruro férrico*

Elaborado por: Autoras, 2022

En la tabla 9 se expresan los valores de aluminio y hierro obtenidos en el agua residual, el mejor valor una vez aplicado el test de jarras obtenido de cada coagulante y los valores aceptados por la normativa nacional vigente. Como se puede observar todos los coagulantes permiten cumplir la normativa del aluminio, sin embargo, la cantidad de hierro obtenida es demasiado alta lo cual no permite cumplir la normativa. Razón por la cual, se ha seleccionado como mejor coagulante al sulfato de aluminio pues es el que menor valor de hierro se obtuvo.

Tabla 9. Resumen de valores iniciales y finales con cada coagulante

Tipo de Agua	pH agua	Conc. coagulante (%)	Dosis coagulante (mg/l)	Al (mg/l)	Fe (mg/l)	Límite máximo permisible Al (mg/l)	Límite máximo permisible Fe (mg/l)
Agua residual	>4	-	-	64.46	137139.06	5	10
Agua coagulada con sulfato de aluminio	5.5	10	300	2.47	2724.48		
Agua coagulada con policloruro de aluminio	11	10	300	2.21	4625.13		
Agua coagulada con cloruro férrico	11	4	300	0.66	36778.97		

Elaborado por: Autoras, 2022

### 4.1.3. Análisis estadístico

#### a. Linealidad

En la tabla 10 se puede observar que existe una relación alta entre el tipo de coagulante a utilizar y el porcentaje de remoción de cada metal. Pues mientras más se aproxime a 1 existe una relación más alta. En este caso existió una relación mayor entre el tipo de coagulante a usar y el porcentaje de remoción del aluminio. También se puede observar que la concentración es otro parámetro que se encuentra relacionado con los porcentajes de remoción de los dos metales.

Tabla 10. Prueba de Linealidad

	% Remoción de Fe	% Remoción de Al
Tipo de coagulante	-0.89	0.73
Concentración del coagulante (%)	0.01	0.01
Dosis del coagulante (mg/l)	-0.01	-0.04
pH	-0.01	-0.33
% Remoción de Fe	1	-0.51
% Remoción de Al	-0.51	1

Elaborado por: Autoras, 2022

## b. Distancia de Mahalanobis

Al realizar la prueba de Distancia de Mahalanobis se han obtenido 72 resultados representados en la tabla 11 considerando un valor de significancia de 0.001, obteniendo un umbral de corte 13.81 y considerando que el valor más alto obtenido de la Distancia Mahalanobis es de 7.98, es decir, no supera el umbral pues se establece que no existen datos multivariados. Por lo tanto, no se dispone de variables dependientes que tengan el mismo resultado lo cual es bueno, por lo que cada variable dependiente se relaciona de diferente manera con respecto a las variables independientes.

Tabla 11. Distancia de Mahalanobis

1	7.98	7.84	7.81	4.94	4.74
6	4.89	3.74	3.68	3.66	3.18
11	3.07	3.03	3.02	2.99	2.96
16	2.93	2.59	2.57	2.53	2.47
21	2.45	1.96	1.906	1.87	1.84
26	1.78	1.76	1.72	1.60	1.57
31	1.51	1.49	1.47	1.46	1.45
36	1.43	1.39	1.38	1.35	1.32
41	1.31	1.31	1.30	1.28	1.28

*Continuación de la Tabla 11*

46	1.20	1.19	1.16	1.15	1.09
51	1.07	1.07	1.06	1.04	1.04
56	1.02	1.01	0.99	0.97	0.95
61	0.95	0.93	0.88	0.72	0.01
66	0.67	0.51	0.48	0.48	0.13
71	0.12	0.12			

*Elaborado por: Autoras, 2022*

### **c. MANOVA**

Los datos obtenidos en la prueba estadística MANOVA se encuentran expresados en la tabla 12. La columna “Pr(<F)” hace referencia a los parámetros que tienen significancia con el porcentaje de remoción de los metales, aquellos resultados que se encuentran con asterisco indica que tiene relación, mientras más asteriscos contenga significa que más relación posee. Por lo tanto, se ha podido comprobar que el pH del agua y el tipo de coagulante usado genera una alta relación en el porcentaje de remoción del metal.

Los parámetros que se encuentran relacionados fuertemente entre sí son: el tipo de coagulante con el pH, la concentración del coagulante con el pH y el tipo de coagulante con la concentración del coagulante y el pH. Aquellos que se encuentran medianamente relacionados son: la dosis del coagulante con el pH, el tipo de coagulante la dosis y la concentración del coagulante y el pH con la concentración y dosis del coagulante. En base a estos resultados se ha determinado que existe una relación directa y fuerte entre el tipo de coagulante a utilizar con el pH del agua y la concentración de coagulante a aplicar.

Tabla 12. Resultados de MANOVA

Parámetros	Df	Pillai	approx F	num Df	den Df	Pr(>F)
Tipo de coagulante	1	0.98	1405.68	2	55	< 2.2e-16 ***
Concentración (%) del coagulante	1	0.01	0.07	2	55	0.93
Dosis (mg/l) de coagulante	1	0.03	0.96	2	55	0.39
pH del agua	1	0.75	83.15	2	55	< 2.2e-16 ***
Tipo de coagulante - Concentración (%) del coagulante	1	0.02	0.53	2	55	0.59
Tipo del coagulante - Dosis (mg/l) de coagulante	1	0.093	2.81	2	55	0.07
Concentración (%) del coagulante - Dosis (mg/l) de coagulante	1	0.18	6.00	2	55	0.01 **
Tipo del coagulante - pH del agua	1	0.80	108.86	2	55	< 2.2e-16 ***
Concentración (%) del coagulante - pH del agua	1	0.50	27.06	2	55	6.57e-09 ***
Dosis (mg/l) de coagulante - pH del agua	1	0.17	5.74	2	55	0.01 **
Tipo del coagulante - Concentración (%) del coagulante - Dosis (mg/l) de coagulante	1	0.18	6.11	2	55	0.01**
Tipo del coagulante - Concentración (%) del coagulante - pH del agua	1	0.52	29.78	2	55	1.72e-09 ***
Tipo del coagulante - Dosis (mg/l) de coagulante - pH del agua	1	0.03	0.96	2	55	0.39
Concentración (%) del coagulante - Dosis (mg/l) de coagulante - pH del agua	1	0.16	5.48	2	55	0.01 **
Tipo del coagulante - Concentración (%) del coagulante - Dosis (mg/l) de coagulante - pH del agua	1	0.02	0.64	2	55	0.53

Elaborado por: Autoras, 2022

Al realizar el análisis estadístico por medio de ANOVA se obtuvieron los resultados expresados en la tabla 13 y 14. La tabla 13 hace referencia a la relación entre el porcentaje de remoción del hierro, siendo esta la variable dependiente, en tanto, las variables independientes son el pH del agua residual, el tipo de coagulante, la concentración y dosis de cada coagulante. En el estudio realizado por Nuñez & Peña (2011) se aplicó ANOVA, este estudio indica que el pH del agua residual influye significativamente en la remoción de metales cuando se usa sulfato de aluminio como coagulante. En el estudio antes mencionado se obtuvo un valor de 0.008, el cual al ser menor a 0.05 señala que es un parámetro estadísticamente significativo. De la misma manera en el presente estudio se obtuvo un valor menor a  $2.16 \times 10^{-16}$  lo cual indica que también existe una significancia estadística en el pH.

En la tabla 14 se exponen los resultados obtenidos al realizar la prueba de ANOVA en donde como variable dependiente se colocó el porcentaje de remoción de aluminio y como variables independientes están el pH del agua residual, el tipo de coagulante, la concentración y dosis de cada coagulante. En el estudio realizado por Duarte & Vizcaíno (2015), al realizar el análisis estadístico para la remoción de metales en el agua se demostró que existe una relación entre la concentración y el tratamiento aplicado, para realizar dicho análisis utilizaron ANOVA en donde se obtuvo un valor de significancia de 0.00 lo cual es menor a 0.05 demostrando así la relación existente. Por otro lado, en el presente estudio se obtuvo un valor menor a  $2.16 \times 10^{-16}$  en el tipo de coagulante y de  $1.92 \times 10^{-10}$  en pH, demostrando que es menor a 0.05 e indicando una relación directa entre el tipo de coagulante a usar y el pH del agua residual para la remoción de aluminio.

Tabla 13. Resultados de ANOVA remoción de Fe

Parámetros	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)
Tipo de coagulante	1	44238	44238	239.46	< 2.2X10 <sup>16</sup> ***
Concentración (%) del coagulante	1	1	1	0.01	0.93
Dosis (mg/l) de coagulante	1	1	1	0.01	0.94
pH del agua	1	7	7	55	0.85
Tipo de coagulante - Concentración (%) del coagulante	1	36	36	0.03	0.66
Tipo del coagulante - Dosis (mg/l) de coagulante	1	2	2	0.19	0.92
Concentración (%) del coagulante - Dosis (mg/l) de coagulante	1	105	105	0.01	0.45
Tipo del coagulante - pH del agua	1	8	8	0.57	0.84
Concentración (%) del coagulante - pH del agua	1	716	716	0.04	0.05
Dosis (mg/l) de coagulante - pH del agua	1	58	58	3.88	0.58
Tipo del coagulante - Concentración (%) del coagulante - Dosis (mg/l) de coagulante	1	46	46	0.32	0.62
Tipo del coagulante - Concentración (%) del coagulante - pH del agua	1	305	305	0.25	0.2
Tipo del coagulante - Dosis (mg/l) de coagulante - pH del agua	1	70	70	1.65	0.34
Concentración (%) del coagulante - Dosis (mg/l) de coagulante - pH del agua	1	0	0	0.001	0.97
Tipo del coagulante - Concentración (%) del coagulante - Dosis (mg/l) de coagulante - pH del agua	1	2	2	0.01	0.92

Elaborado por: Autoras, 2022

Tabla 14. Resultados de ANOVA remoción de Al

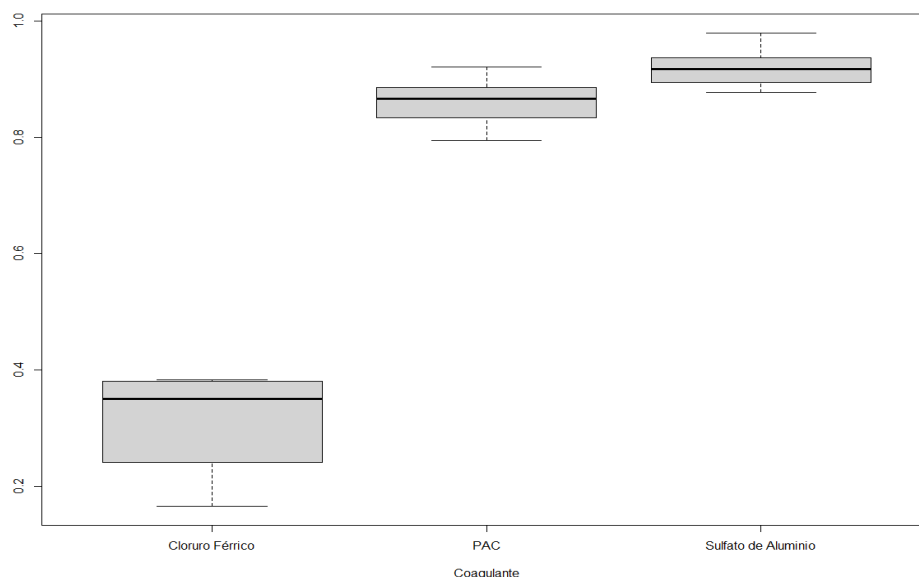
Parámetros	Df	SumSq	MeanSq	Fvalue	Pr(>F)
Tipo de coagulante	1	6988.2	6988.2	302.01	< 2.2X10 <sup>-16</sup> ***
Concentración (%) del coagulante	1	1.9	1.9	0.08	0.77
Dosis (mg/l) de coagulante	1	17.8	17.8	0.77	0.38
pH del agua	1	1393.7	1393.7	60.23	1.92 X10 <sup>-10</sup> ***
Tipo de coagulante - Concentración (%) del coagulante	1	0.8	0.8	0.04	0.85
Tipo del coagulante - Dosis (mg/l) de coagulante	1	50.7	50.7	2.19	0.14
Concentración (%) del coagulante - Dosis (mg/l) de coagulante	1	157.3	157.3	6.79	0.01
Tipo del coagulante - pH del agua	1	1819.2	1819.2	78.61	2.96 X10 <sup>-12</sup> ***
Concentración (%) del coagulante - pH del agua	1	773.3	773.3	33.42	3.44 X10 <sup>-7</sup> ***
Dosis (mg/l) de coagulante - pH del agua	1	136.4	136.4	5.89	0.02
Tipo del coagulante - Concentración (%) del coagulante - Dosis (mg/l) de coagulante	1	62	62	2.68	0.11
Tipo del coagulante - Concentración (%) del coagulante - pH del agua	1	274.8	274.8	11.88	0.001
Tipo del coagulante - Dosis (mg/l) de coagulante - pH del agua	1	1.3	1.3	0.06	0.81
Concentración (%) del coagulante - Dosis (mg/l) de coagulante - pH del agua	1	91.1	91.1	3.94	0.52
Tipo del coagulante - Concentración (%) del coagulante - Dosis (mg/l) de coagulante - pH del agua	1	13	13	0.56	0.46

Elaborado por: Autoras, 2022



En la ilustración 12 se puede observar que, al realizar el análisis estadístico entre los coagulantes utilizados con su eficiencia en el porcentaje de remoción, ninguno de ellos es similar entre sí. A pesar de que, el PAC y el sulfato de aluminio señalan porcentajes de remoción con valores parecidos, el sulfato de aluminio indica valores más altos de remoción que el PAC. Además, visualmente se puede deducir que el coagulante que brinda mayor eficiencia de remoción de hierro es el sulfato de aluminio. Para determinar lo antes mencionado de manera estadística se puede observar la tabla 15, en la cual se ha relacionado cada coagulante entre sí para determinar su similitud, obteniendo como resultado con un nivel de confianza del 95% y en la columna “p adj” se observa que ningún valor es mayor a 0.05, siendo así, que ningún coagulante brinda resultados similares.

En el estudio realizado por Cuadros (2020), en donde se utilizó Tukey-HSD para determinar estadísticamente el mejor coagulante para la remoción de turbiedad, sus resultados fueron que el sulfato de aluminio y el cloruro férrico son mejores a comparación de un coagulante natural obtenido del cactus. Estos resultados son similares a los obtenidos en el presente estudio, pues en la remoción de hierro y aluminio el coagulante idóneo es el sulfato de aluminio. Al analizar de manera individual la remoción del hierro y aluminio presentes en la cuba de decapado, el mejor coagulante es el sulfato de aluminio y el cloruro férrico respectivamente para cada metal.



*Ilustración 12. Relación entre los tres tipos de coagulantes utilizados y remoción de Fe*

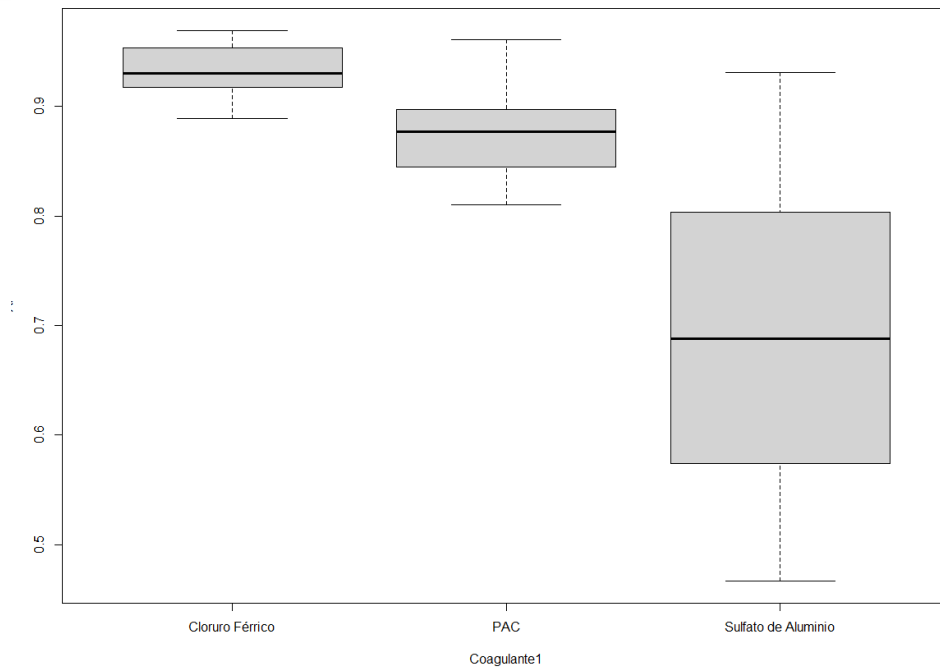
Elaborado por: Autoras, 2022

Tabla 15. Análisis estadístico entre los tres tipos de coagulantes y la remoción de Fe

Tukey multiple comparisons of means 95% family-wise confidence level				
Coagulantes	diff	lwr	upr	p adj
PAC - Cloruro férrico	0.55	0.51	0.59	0.000
Sulfato de aluminio - Cloruro férrico	0.61	0.57	0.64	0.000
Sulfato de aluminio - PAC	0.06	0.02	0.09	0.001

Elaborado por: Autoras, 2022

En la ilustración 13 se puede observar que al realizar un análisis entre los tres tipos de coagulantes utilizados y la remoción de aluminio generada, ninguno se asemeja, si bien existen rangos en los que se encuentran valores similares, específicamente entre el coagulante cloruro férrico y PAC, no se produce una semejanza significativa. Al realizar el estudio estadístico utilizando Tukey-HSD en el software Rstudio se pudo obtener los datos expresados en la tabla 16 con un nivel de confianza del 95%, dichos resultados expresados en la fila “p adj”, ninguno es mayor a 0.05, demostrando estadísticamente que cada coagulante actúa de manera diferente, brindando resultados de remoción diferentes. En el estudio realizado por Acosta et al. (2018), en donde realizó una comparación estadística entre el coagulante cloruro férrico y quitosano, por medio del código Tukey-HSD demostró que dichos coagulantes no se asemejan en la efectividad de sus resultados. Acosta et al. (2018) en su estudio asegura que el cloruro férrico es un coagulante que trabaja de manera excelente en un rango muy amplio de pH, lo cual no dio es este caso de estudio. Si bien, se obtuvieron buenos resultados con el cloruro férrico para la remoción de aluminio, no se obtuvieron resultados similares para la remoción de hierro en el agua residual de la empresa metalúrgica. Es por ello que, se ha seleccionado como mejor coagulante para la remoción de aluminio y hierro en el área de decapado al sulfato de aluminio, pues a más de ser económicamente rentable para la empresa, es un excelente coagulante para remover metales pesados en aguas residuales y su eficiencia es alta.



*Ilustración 13. Relación entre los tres tipos de coagulantes utilizados y la remoción de Al*

Elaborado por: Autoras, 2022

*Tabla 16. Análisis estadístico entre los tres tipos de coagulantes y la remoción de Al*

<b>Tukey multiple comparisons of means 95% family-wise confidence level</b>				
<b>Coagulantes</b>	<b>diff</b>	<b>lwr</b>	<b>upr</b>	<b>p adj</b>
PAC - Cloruro férrico	-0.06	-0.12	0.01	0.049
Sulfato de aluminio - Cloruro férrico	-0.24	-0.30	-0.18	0.000
Sulfato de aluminio - PAC	-0.19	-0.25	-0.12	0.001

Elaborado por: Autoras, 2022

Este estudio permitirá que la empresa aplique una correcta disposición final de su agua residual en el área de decapado. Evitar contaminar directamente a cuerpos de agua dulce cercanos a la industria y cargarlos de metales pesados, protegiendo de esta manera los ecosistemas del lugar. Además, podrá ser la base para la creación de una planta de tratamiento de agua residual interna. También es una guía para empresas o estudios similares en donde se desee eliminar o disminuir la cantidad de metales pesados presentes en el agua residual del área de decapado de una empresa metalúrgica o similares.

### 5.1. Conclusiones

- En el presente trabajo se caracterizó la calidad del agua residual del área de decapado de una empresa de galvanía, determinando que la cantidad de hierro y aluminio presentes en la misma es demasiado alta obteniendo unos valores de 137139.06 mg/l de hierro y 64.46 mg/l de aluminio. El análisis de aluminio, hierro y pH ha permitido caracterizar el estado actual del agua en dicha área. El hierro y aluminio sobrepasan los límites permitidos por la normativa nacional vigente para la descarga a un cuerpo de agua dulce, los cuales son 10 mg/l de hierro y 5 mg/l de aluminio. Razón por la cual, no se debe descargar directamente a un cuerpo receptor, siendo necesario un tratamiento de este efluente.
- Mediante el test de jarras y aplicando tres coagulantes: sulfato de aluminio, policloruro de aluminio y cloruro férrico con sus respectivas réplicas, se pudo disminuir la cantidad de hierro y aluminio presentes en el agua residual de la cuba de decapado de una empresa de galvanía. Además, se determinó que el pH adecuado para realizar un tratamiento con este tipo de efluente es de 5.5, puesto que, a este valor los coagulantes reaccionan de mejor manera. Se establecieron los parámetros adecuados de tratamiento, cada coagulante debe ser utilizado con una dosis y concentración adecuada para obtener una correcta remoción de hierro y aluminio. La cantidad de cal necesaria para obtener un pH de 5.5 en 900 l de agua residual es de 67.5 kg, es decir una concentración de 7.5%.
- Una vez realizado las diferentes pruebas con sus respectivos análisis se logró determinar que, el coagulante idóneo para la remoción de hierro y aluminio del agua residual de la empresa Galvánica Cía. LTDA. es el sulfato de aluminio, ajustando el agua a un pH de 5.5, aplicando una dosificación de 300 mg/l y una concentración al 10% del coagulante. Con los factores antes mencionados, se logró una remoción del 97.69% y 92.81% de hierro y aluminio respectivamente, siendo estos los valores más altos obtenidos en este estudio. Cumpliendo de esta manera con la Normativa Nacional vigente en el límite permisible del aluminio; sin embargo, para el hierro no se obtuvo un cumplimiento de la norma a pesar de tener la remoción más alta, puesto que hubo una concentración elevada de este metal en el agua residual de decapado.

- Al utilizar la prueba estadística MANOVA se determinó una relación existente entre el porcentaje de remoción de hierro, aluminio, el tipo de coagulante, dosis del coagulante, concentración del coagulante y pH del agua a tratar. Se demostró estadísticamente que existe una relación fuerte y directa entre el tipo de coagulante, su concentración y el pH del agua. Al realizar ANOVA se pudo comprobar que tanto la remoción de hierro y aluminio se ven relacionadas por el tipo de coagulante a usar y el pH del agua residual.
- Se optimizó de manera adecuada el proceso de coagulación - floculación dentro de la empresa Galvánica Cía. LTDA., utilizando el test de jarras y herramientas estadísticas como MANOVA y ANOVA, así como también el uso del software Rstudio. Mediante los parámetros previamente establecidos y el coagulante seleccionado (sulfato de aluminio), los operarios de la empresa podrán realizar el tratamiento sin ningún percance y de manera efectiva.

## 5.2. Recomendaciones

- Las descargas de aguas residuales industriales de tipo galvánico deben tener un mejor enfoque, pues no se debería desembocar en cuerpos de agua dulce, especialmente en aquellos que son fuente hídrica de una comunidad.
- Verificar la correcta calibración de los equipos a utilizar durante el proceso de análisis tanto de manera ex situ como in situ.
- Aplicar otras técnicas de tratamientos para la remoción de metales, como el uso de un filtro de carbón activado luego del proceso de coagulación/floculación o mayor tiempo de sedimentación del floc y, así llegar a cumplir con el límite máximo permisible para la descarga de un cuerpo de agua dulce.
- Esta investigación puede ser complementada con el estudio de las otras áreas presentes en la etapa del galvanizado, para así establecer un correcto tratamiento de aguas residuales industriales. Además, incluir en el análisis otros parámetros como DQO, zinc y sólidos suspendidos totales.

### 6. Referencias bibliográficas

Abad, J. (2014). *Estudio de la recuperación del zinc presente en los baños agotados de decapado procedentes de las industrias de galvanizado de zinc en caliente mediante técnicas electroquímicas*. Universitat Politècnica de València.

Acosta, A., Príncipe, Y., Saldaña, S., & Zurita, A. (2018). *Efecto del tiempo de agitación y dosis entre coagulantes de exoesqueleto de camarón y chatarra de hierro en la remoción de turbiedad del Río Santa*. Universidad César Vallejo.

Acosta, G., Coy, C., Bourdón, A., & Cuervo, E. (2013). La electrocoagulación como un tratamiento eficiente para la remoción de metales pesados. *Facultad de Ciencias Básicas*, 9(2), 306-317.

Andrade, F. (2014). *Tratamiento de aguas residuales mediante la combinación de técnicas avanzadas de oxidación y biofiltros*. 525.

Asociación Española de Aluminio. (2008). *El aluminio en el Ambiente*.

Avendaño, B., Avendaño, G., Cruz, W., & Cárdenas, A. (2014). *Guía de referencia para investigadores no expertos en el uso de estadística multivariada*. 10(1), 13-27.

Basurto, C. (2017). *Mejoramiento en el proceso productivo en la fabricación de ventanas de aluminio y vidrio*. Universidad de Guayaquil.

Bermejo, D. (2016). *REMOCIÓN DE PLOMO Y CADMIO PRESENTE EN AGUAS RESIDUALES MINERAS MEDIANTE BIOSORCIÓN EN COLUMNAS CON BAGAZO DE CAÑA Y CÁSCARA DE CACAO*. Universidad de Cuenca.

Brito, E., Fonseca, J., & Guamán, A. (2011). *Proceso de galvanizado en caliente con recubrimiento de zinc para piezas metálicas*.  
<http://repositorio.unemi.edu.ec/handle/123456789/253>

Cardozo, E. (2018). *Diseño de un GPC con Restricciones Basado en un Modelo ANFIS para el Control del Proceso de Neutralización del pH en los Efluentes Residuales de una Planta Concentradora de Minerales Polimetálicos*. PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ.

Castrillón, D., & Giraldo, M. (2012). *Determinación de las dosis óptimas del coagulante sulfato de aluminio granulado tipo b en función de la turbiedad y el color para la potabilización del agua en la planta de tratamiento de Villa Santana*. <https://hdl.handle.net/11059/3146>

Caviedes, D., Muñoz, R., Perdomo, A., Rodríguez, D., & Sandoval, J. (2015). *Tratamientos para la Remoción de Metales Pesados Comúnmente Presentes en Aguas Residuales Industriales. Una Revisión*. 13(1), 73-90.

Cedeño, J. (2013). *Copia de COSTOS DE ANALISIS AGOSTO 26 DE 2013*. Scribd. <https://es.scribd.com/document/451238907/Copia-de-COSTOS-DE-ANALISIS-AGOSTO-26-DE-2013>

Chama, J. (2017). Evaluación del poder coagulante del almidón de papa (*Solanum tuberosum*) var. Única y el policloruro de aluminio para la remoción de la turbidez al ingreso de las aguas a la planta de tratamiento Samegua, Moquegua 2016. *Universidad José Carlos Mariátegui*. <https://repositorio.ujcm.edu.pe/handle/20.500.12819/202>

Comisión Chilena del Cobre. (2016). *Mercado internacional del hierro y el acero*. <https://www.cochilco.cl/Mercado%20de%20Metales/Mercado%20internacional%20Hierro%20y%20Acero.pdf>

Corporación Financiera Nacional. (2021). *Industrias Manufactureras*.

Coyoy, A. (2013). *DISEÑO Y MANUAL DE OPERACIÓN Y MANTENIMIENTO DE UNA PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES ÁCIDAS DE UNA PLANTA DE GALVANIZADO*. 95.

Cuadros, L. (2020). *Evaluación de la Remoción de la Turbidez del Agua del Rio Fucha por Medio del Fruto de la Planta Arbustiva Cactus (Opuntia ficus indica) como Coagulante Natural*. Universidad Nacional Abierta y a Distancia – UNAD.

Dagnino, J. (2014). Análisis de varianza. *Revista chilena de anestesia*, 43, 306-310.

Danguillecourt, E. (1998). *Caracterización de las reacciones de precipitación del óxido de cobalto (III) hidratado en presencia del dióxígeno del aire* [Tesis, Universidad de Oriente]. <http://ninive.ismm.edu.cu/handle/123456789/1324>

Díaz, E., Alvarado, A., & Camacho, K. (2014). *El tratamiento de agua residual doméstica para el desarrollo local sostenible: El caso de la técnica del sistema unitario de tratamiento de aguas, nutrientes y energía (SUTRANE) en San Miguel Almaya, México*. 14(1), 78-97.

Domínguez, E. (2012). *Tratamiento y gestión de baños ácidos tratamiento y gestión de baños ácidos de decapado de decapado*. Universidad de Valladolid.

Duarte, E., & Vizcaíno, C. (2015). *Estudio comparativo entre la implementación de la zeolita y la resina de intercambio iónico en la remoción de hierro y dureza en un agua sintética que simula el agua para uso industrial*. Universidad de la Salle.

Duque, P. (2012). *Estudio de la influencia de la adición de Cloruro Férrico en la sedimentabilidad de los fangos activados*. <https://riunet.upv.es/handle/10251/17975>

Durán, J. (2016). Remoción del Aluminio, Manganeso y Hierro de las aguas del río Auqui, para su potabilización en la planta de tratamiento de agua potable de Bellavista, Huaraz – Ancash julio 2014 – junio 2015. *Universidad Nacional Santiago Antúnez de Mayolo*. <http://repositorio.unasam.edu.pe/handle/UNASAM/1455>

Escalante, C. L. (2000). Estrategias empresariales para la introducción de tecnologías ambientales en la industria galvanizadora de Guadalajara. *Revista Mexicana de Sociología*, 62(3), 51-68. <https://doi.org/10.2307/3541304>

Flores, C., & Flores, K. (2021). *Pruebas para comprobar la normalidad de datos en procesos productivos: Anderson-darling, ryan-joiner, shapiro-wilk y kolmogórov-smirnov*. 23(2).

Fonseca, J., & Guamán, A. (2011). Proceso de galvanizado en caliente con recubrimiento de zinc para piezas metálicas. *Repositorio de la Universidad Estatal de Milagro*. <http://repositorio.unemi.edu.ec/handle/123456789/253>

Fu, Z. (2016). *Análisis del coste de vida en China*. Universidad de Granada.

Fúquene, D. M., & Yate, A. V. (2018). Ensayo de jarras para el control del proceso de coagulación en el tratamiento de aguas residuales industriales. *Documentos de Trabajo ECAPMA*, 1, Article 1. <https://doi.org/10.22490/ECAPMA.2771>

Gómez, S., Neira, D., Cárdena, E., Parra, C., Guaicha, E., & Bueno, J. (2015). *Actualización del Plan de Desarrollo y Ordenamiento Territorial de la parroquia Nulti*.



González, M. (2012). *Determinación de la combinación y dosis óptimas de policloruro de aluminio y polímero floculante para el tratamiento del influente de la planta potabilizadora los berros*. Universidad Nacional Autónoma de México.

González, Y., Pires, L., & António, Z. (2016). *Propuesta de mejora ambiental en el proyecto de una Planta de Producción de Acero Galvanizado en Angola*. 12.

Guillen, J., Jaramillo, A., & Córdova, R. (2021). Estudio de los procesos de remoción de hierro y manganeso en aguas subterráneas: Una revisión. *Polo del Conocimiento*, 6(9), 1384-1407.

Ibarra, D. (2020). *ANÁLISIS INTEGRAL Y OPTIMIZACIÓN DE UN PROCESO DE FLOCULACIÓN-COAGULACIÓN EMPLEANDO PECTINA DE NOPAL PARA EL TRATAMIENTO DE AGUAS CONTAMINADAS CON METALES DE LA INDUSTRIA DE LA GALVANOPLASTÍA*. Centro de Investigación y Desarrollo Tecnológico en Electroquímica.

IBM. (2021, diciembre 7). *Análisis multivariante de varianza (MANOVA)*. <https://prod.ibmdocs-production-dal-6099123ce774e592a519d7c33db8265e-0000.us-south.containers.appdomain.cloud/docs/es/spss-statistics/beta?topic=statistics-multivariate-analysis-variance-manova>

Instituto de toxicología de la Defensa. (2010). *Protocolo de toma de muestras de agua residual*.

Jaimes, C. (2020). *Evaluación del contenido de metales disueltos (Cd, Co, Cu, Mn, Pb y Zn) en aguas de La Bahía de Santa Marta, empleando un ICP-OES previa concentración y limpieza con resina NOBIAS Chelate-PA1*. Universidad Abierta y a Distancia.

Lee, A., & Kim, K. (2020). New Approach to Remove Heavy Metals from Wastewater by the Coagulation of Alginate-Rhamnolipid Solution with Aluminum Sulfate. *Water*, 12(12), 3406. <https://doi.org/10.3390/w12123406>

Lorenzo, Y. (2006). Estado del arte del tratamiento de aguas por coagulación-floculación. *Instituto Cubano de Investigaciones de los Derivados de la Caña de Azúcar*, 40(2), 10-17.

Marín, R. (2008). *Características físicas, químicas y biológicas de las aguas*.

Mateos, R., López, P., García, D., Alonso, R., & Morán, A. (2016). *Eliminación de cobre en aguas residuales mediante sistemas bioelectroquímicos.*

<https://www.aguasresiduales.info/revista/articulos/eliminacion-de-cobre-en-aguas-residuales-mediante-sistemas-bioelectroquimicos>

Medina, J. (2017). *Influencia de la dilución del Sulfato de Aluminio en la eficiencia de la coagulación en la potabilización del agua.* Escuela Politécnica Nacional.

Ministerio del Ambiente, Agua y Transición Ecológica. (2013). *La industria de galvanoplastia.*

<https://www.ambiente.gob.ec/wp-content/uploads/downloads/2013/03/PART4.pdf>

Moscoso, R. (2016). *Evaluación del uso de ortofosfato y policloruro de aluminio para mejorar la calidad del agua en Zamorano, Honduras.* <http://hdl.handle.net/11036/5741>

Muzo, D. (2015). *Desarrollo de una formulación para decapado químico en una industria metal química.* Universidad Central del Ecuador.

Navarro, N. (2019). *Prueba de Jarras – ISA.* <https://isa.ec/prueba-de-jarras/>

Nguyen, T. T., Yoo, K., Jha, M. K., Park, J., Choi, U., Choe, H., & Lee, J. (2018). Removal of Heavy Metals from Tailing in Citrate Solution with Ferric Chloride. *Materials Transactions*, 59(10), 1665-1668. <https://doi.org/10.2320/matertrans.M2018152>

Núñez, J., & Peña, M. (2011). *Recuperación de sulfato de aluminio a partir de lodos generados en la planta de potabilización de la empresa aguas de Cartagena S.A E.S. P y estudio de la viabilidad económica de su reutilización como coagulante.* Universidad de Cartagena.

Núñez, M. (2015). *Definición de opciones de mejora en una planta de agua potable.* Universidad Central del Ecuador.

Obras Sanitarias del Estado. (2014). *Operadores de Plantas Potabilizadoras de aguas superficiales.*

Ocampo, L., Gallego, D., Carvajal, E., Arroyave, D., Suárez, P., Díaz, Á., Toro, L., Pizarro, S., & Hormaza, A. (2020). *Diagnóstico de proceso y caracterización de residuos en la industria de recubrimientos metálicos en el sur del Valle de Aburra.* 26.

Otzen, T., & Manterola, C. (2017). Técnicas de Muestreo sobre una Población a Estudio. *International Journal of Morphology*, 35(1), 227-232. <https://doi.org/10.4067/S0717-95022017000100037>

Oviedo, Y. R. (2012). Estructura y caracterización de los recubrimientos galvanizados por inmersión en caliente, sobre aceros. *Revista Digital de Investigación y Postgrado*, 2(4), 368-378.

Pilca, D. (2011). *Tecnología para la aplicación del policloruro de aluminio en procesamiento de aguas*. <http://repositorio.ug.edu.ec/handle/redug/4678>

Porras, Á. C., Montenegro, D. L. C., & Granados, É. A. O. (2009). UNA ALTERNATIVA LIMPIA PARA EL TRATAMIENTO DE LAS AGUAS RESIDUALES GALVÁNICAS: REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA. *Revista Ingenierías Universidad de Medellín*, 14, 12.

Porras, J. (2016). *Comparación de Pruebas de Normalidad Multivariada | Anales Científicos*. 77(2). <https://revistas.lamolina.edu.pe/index.php/acu/article/view/483>

Pütz, P. (2008). *Eliminación y determinación de fosfato*.

Quintero, K. (2015). *Importancia de Los Coagulantes, Floculantes y Agentes Deshidratantes de Lodos* [Universidad Francisco de Paula Santander]. <https://es.scribd.com/document/265756851/Importancia-de-Los-Coagulantes-floculantes-y-agentes-deshidratantes-de-lodos>

Raffo, E., & Ruiz, E. (2014). Caracterización de las aguas residuales y la demanda bioquímica de oxígeno. *Industrial Data*, 17(1), 71. <https://doi.org/10.15381/idata.v17i1.12035>

Regalado, E. S., Ramírez, T. L., Castillo, J. M. B., & Rodríguez, M. A. (2004). *Remoción de metales pesados en aguas residuales mediante agentes químicos*. 23, 6.

Reinoso, J. (2014). *Determinación de toxicidad de aluminio presente en el sistema de alcantarillado de aguas residuales de la planta de tratamiento de Ucubamba de la Universidad de Cuenca*.

Rodríguez, Á. (2020). *Informe de monitoreo de descargas GALVÁNICA CIA. LTDA*.

Rojas, R. (2002). *Sistemas de Tratamiento de Aguas Residuales*.

Rojas, Y., & López, M. (2015). *Evaluación de alcalinizantes en el proceso de ajuste del ph para el agua tratada del río Cauca*. Universidad del Valle.

Rubio, D., & Saravia, J. (2020). *Optimización en la remoción de turbidez mediante prueba de jarras empleando Quitosano a partir de las escamas del Trachurus Murphyi*. Universidad Peruana Unión.

Ruiz, L. (2019). *Coeficiente de correlación de Pearson: Qué es y cómo se usa*. <https://psicologiyamente.com/miscelanea/coeficiente-correlacion-pearson>

Samaniego, H. (2006). Valorización de efluentes de decapado ácido metálico. Recuperación de zinc [Ph.D. Thesis, Universidad de Cantabria]. En *TDR (Tesis Doctorales en Red)*. <http://www.tdx.cat/handle/10803/10688>

Santibañéz, L. (2002). Precipitación química y adsorción en el tratamiento de efluentes conteniendo metales disueltos. *Revista del Instituto de Investigación de la Facultad de geología, minas, metalurgia y Ciencias Geográficas*, 5(9). [https://sisbib.unmsm.edu.pe/bibvirtual/publicaciones/geologia/v05\\_n9/preci\\_quimi.htm](https://sisbib.unmsm.edu.pe/bibvirtual/publicaciones/geologia/v05_n9/preci_quimi.htm)

Seoáñez, M. (2012). *Manual de aguas residuales industriales*. McGRAW HILL. <https://www.casadellibro.com/libro-manual-de-aguas-residuales-industrias/9788448183370/2013393>

Servicio de Acreditación. (2006). *Alcance de Acreditación*.

Soto, E., Miranda, R. del C., Sosa, C. A., & Loredó, J. A. (2006). Optimización del Proceso de Remoción de Metales Pesados de Agua Residual de la Industria Galvánica por Precipitación Química. *Información tecnológica*, 17(2), 33-42. <https://doi.org/10.4067/S0718-07642006000200006>

Soto, J. (2010). La dureza del agua como indicador básico de la presencia de incrustaciones en instalaciones domésticas sanitarias. *Ingeniería, investigación y tecnología*, 11(2), 167-177.

Suarez, V., & Trujillo, D. (2011). *Diseño y construcción de un equipo de prueba de jarras para la tratabilidad de aguas residuales*. Escuela Superior Politécnica de Chimborazo.

Tafur, E. (2017). *“Evaluación del cloruro férrico y sulfato de aluminio, como coagulantes en el proceso de potabilización, en términos de turbidez y potencial de hidrógeno, de las aguas de la quebrada Rumiyacu, distrito de Moyobamba”*. UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN MARTÍN -TARAPOTO.

Tafur, E. (2018). Evaluación del cloruro férrico y sulfato de aluminio, como coagulantes en el proceso de potabilización, en términos de turbidez y potencial de hidrógeno, de las aguas de la quebrada Rumiyacu, distrito de Moyobamba. *Universidad Nacional de San Martín-Tarapoto*. <http://repositorio.unsm.edu.pe/handle/11458/3044>

Tafur, L., & Quevedo, R. (2014). *Alternativa para el tratamiento de aguas residuales cromadas con quitosano extraído del exoesqueleto del camarón*.

Torra, A., Valero, F., Bisbal, J., & Tous, J. (1998). *Policloruro de aluminio en el proceso de potabilización de aguas superficiales*.

Vargas, M., & Romero, L. (2010). *Desarrollo de coagulantes y floculantes para el tratamiento de aguas en países en desarrollo*. <https://repositoriotec.tec.ac.cr/handle/2238/5784>

Vásquez, R. (2019). *Optimización del coagulante Sulfato de Aluminio en el Tratamiento de Potabilización del Agua de la Planta de Chota-Cajamarca*. <http://repositorio.unprg.edu.pe/handle/20.500.12893/3347>

Velazco, P., Ríos, L., Zorrilla, M., Moya, F., Hernández, O., & Moreno, L. (2015). Evaluación y acciones de producción más limpia en taller galvánico de la provincia de Villa Clara. *Centro Azúcar*, 42(4), 1-13.

Véliz, L., Ocaña, J., Bataller, M., & Fernandez, L. (2010). *Evaluación de la eficiencia de los procesos de coagulación-floculación y ozonización a escala de laboratorio en el tratamiento de aguas residuales municipales*. 41(1), 9.

Vera, D., & Rosas, L. (2017). *MODELAR LA CONTAMINACIÓN DEL AGUA DE LA REPRESA DE AGUADA BLANCA POR HIERRO Y MANGANESO ENTRE LA TEMPORADA DE LLUVIAS Y EL ESTIAJE PARA PROPORCIONAR AGUA DE CALIDAD A LA POBLACIÓN DE AREQUIPA*. 177.

Villacis, A. (2011). *Estudio de un Sistema de Depuración de Aguas Residuales para reducir la contaminación de Río Ambato y los sectores aledaños, en el sector de Pisocucho, de la parroquia Izamba, del Cantón Ambato, Provincia de Tungurahua*. Universidad Técnica de Ambato.

Yanza, J., Rivera, R., Gómez, L., & Zafra, C. (2019). Evaluación de FeCl<sub>3</sub> y PAC para la potabilización de agua con alto contenido de color y baja turbiedad. *TecnoLógicas*, 22(45), 11-23. <https://doi.org/10.22430/22565337.1085>

Zambrano, E. (2009). *Aguas residuales: Clasificación, características y composición*.

Zerbatto, M., Carrera, E., Eliggi, M. S., Modini, L., Vaira, S., Nosedá, J. C., & Abramovich, B. (2009). Cloruro Férrico para la coagulación optimizada y remoción de enteroparásitos en agua. *AUGMDOMUS*, 1. <http://sedici.unlp.edu.ar/handle/10915/15890>

## ANEXOS

### Anexo 1. Análisis de la prueba estadística MANOVA en R Studio

```

****Linealidad****
cor(Var.dep)

****Distancia de Mahalanobis****
D2<- mahalanobis(Var.dep, center = colMeans(Var.dep), cov = var(Var.dep)); D2
sort(D2, decreasing = T)

alpha = 0.001
cutoff <- qchisq(p = 1-alpha, df = ncol(Var.dep)); cutoff

****Normalidad****
boxM(Var.dep, Datos$`Tipo`*Datos$`Concentración (%)`*Datos$`Dosis (mg/l)`*Datos$`pH` , data = Datos)
shapiro.test(Var.dep)

****verificar que no existen datos multivariados**
which(D2 > cutoff)

****MANOVA****
modelo1 = manova(Var.dep ~ Datos$Tipo *Datos$`Concentración (%)` * Datos$`Dosis (mg/l)` * Datos$pH)
summary(modelo1)

```

### Anexo 2. Datos de remoción de hierro y aluminio para Tukey-HSD

Tipo de Coagulante	Concentración (%)	Dosis (mg/l)	pH	% Remoción de Fe	% Remoción de Al
1	4	300	5.5	91.82	71.19
1	4	400	5.5	92.86	75.89
1	10	300	5.5	97.69	92.81
1	10	400	5.5	94.63	82.85
1	4	300	11	91.61	66.46
1	4	400	11	90.83	61.46
1	10	300	11	87.98	55.54
1	10	400	11	87.83	47.00
1	4	300	5.5	91.73	71.37
1	4	400	5.5	92.69	77.85
1	10	300	5.5	97.61	93.09
1	10	400	5.5	94.51	84.43
1	4	300	11	91.77	65.59
1	4	400	11	90.68	59.23

Continuación del Anexo 2

1	10	300	11	87.85	54.55
1	10	400	11	88.04	46.69
1	4	300	5.5	91.99	71.97
1	4	400	5.5	92.72	75.19
1	10	300	5.5	97.91	92.54
1	10	400	5.5	94.67	83.39
1	4	300	11	91.49	66.25
1	4	400	11	90.69	61.55
1	10	300	11	88.12	53.97
1	10	400	11	87.72	47.10
2	4	300	5.5	79.55	81.24
2	4	400	5.5	81.35	95.82
2	10	300	5.5	85.39	90.96
2	10	400	5.5	86.29	88.66
2	4	300	11	87.11	88.12
2	4	400	11	89.09	87.56
2	10	300	11	91.93	86.71
2	10	400	11	87.96	82.32
2	4	300	5.5	79.49	81.92
2	4	400	5.5	81.29	96.07
2	10	300	5.5	85.47	90.10
2	10	400	5.5	86.16	88.47
2	4	300	11	87.04	87.83
2	4	400	11	88.89	87.42
2	10	300	11	92.14	87.13
2	10	400	11	88.18	81.19



2	4	300	5.5	79.52	81.01
2	4	400	5.5	81.31	95.66
2	10	300	5.5	85.40	91.06
2	10	400	5.5	86.23	89.28
2	4	300	11	87.24	88.53

**Anexo 3. Registro fotográfico de la obtención de muestras in situ.**

3.1. Agua del proceso de decapado agotada



3.2. Proceso de ajuste de pH en cuba de decapado



### 3.3. Agua de decapado ajustada el pH 5.5



### 3.4 Toma de muestras para análisis



### 3.5 Muestras tomadas para análisis en el Laboratorio de Saneamiento



4.1 Ajuste de pH a 11



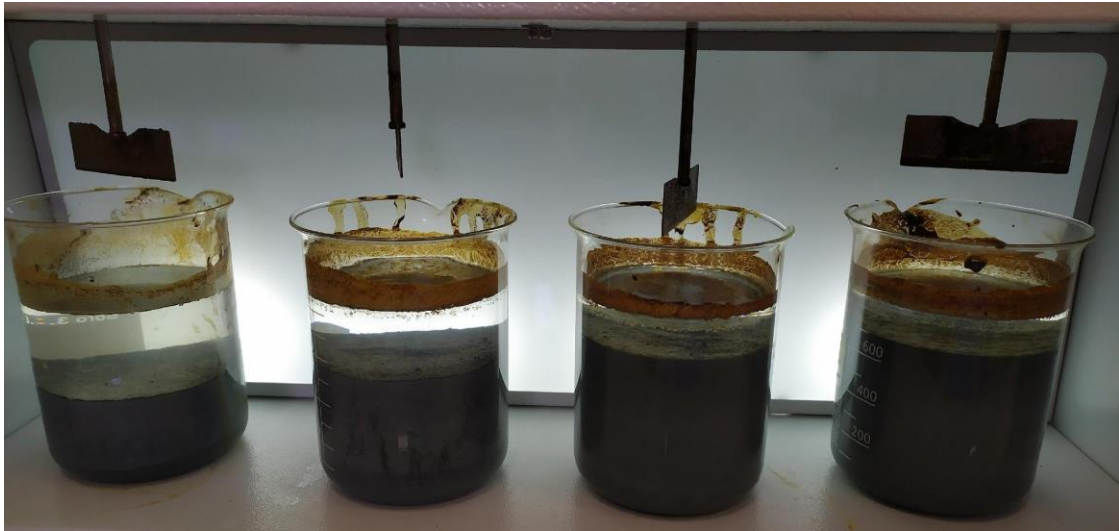
4.2 Pesaje de coagulante sulfato de aluminio



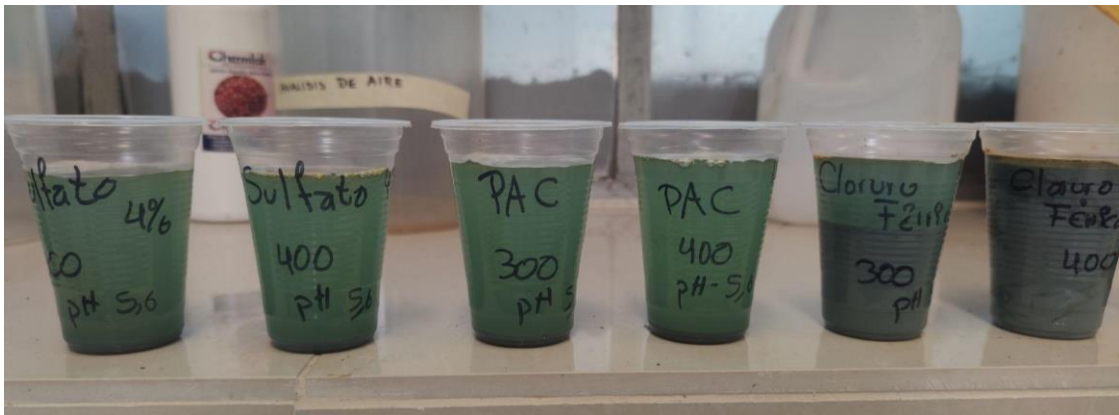
4.3 Pesaje de coagulante sulfato de aluminio



## 4.4 Prueba de jarras



## 4.5 Sedimentación



## 4.6 Muestras tomadas para análisis en el Laboratorio de Saneamiento



## Anexo 5. Resultados obtenidos del Laboratorio de Saneamiento de ETAPA EP

<b>LABORATORIO DE SANEAMIENTO</b> Panamericana Norte Km. 5 y 1/2. - Cuenca Telf : 4175568	Laboratorio de Ensayo Acreditado por el SAE con Acreditación N° SAE LEN 06-004	<b>INFORME DE RESULTADOS</b> Página 1 de 2
---	--	---

FECHA: 20/10/2021

INFORME N°: 410/02/21

### DATOS PROPORCIONADOS POR EL CLIENTE

NOMBRE: GALVANICA CIA. LTDA.  
 SOLICITADO POR: GALVANICA CIA LTDA  
 DIRECCIÓN: MONAY EL AGUACATE MONAY

MUESTRA  
 CÓDIGO: 410/01-02/21  
 DESCRIPCIÓN (Fuente): EFLUENTE DE PROCESO  
 PROCEDENCIA (Lugar): GALVANICA  
 FECHA DE RECEPCIÓN: 13/10/2021  
 ENTREGADAS EN EL LABORATORIO POR: ING. ANGELA RODRIGUEZ

### RESULTADOS

PARÁMETRO	MÉTODO	FECHA REALIZACIÓN	UNIDAD	DECAPADO 410/01/21
* CIANURO LIBRE	SM 4500CN D	13/10/2021	mg/l	<1
* CONDUCTIVIDAD	SM 2510 B	13/10/2021	uS/cm	187700
DEMANDA BIOQUIMICA DE OXIGENO	PEE/LS/FQ/01	13/10/2021 18/10/2021	mg/l	2001
* DEMANDA QUIMICA DE OXIGENO	PEE/LS/FQ/06	13/10/2021	mg/l	102714
pH	PEE/LS/FQ/07	13/10/2021		<4
SOLIDOS SUSPENDIDOS TOTALES	PEE/LS/FQ/04	13/10/2021	mg/l	2596
* SUSTANCIAS SOLUBLES AL HEXANO	SM 5520 D	13/10/2021 15/10/2021	mg/l	23.2
* ALUMINIO	SM 3120 ICP	13/10/2021 19/10/2021	ug/l	64460
* HIERRO	PEE/LS/AI/04	13/10/2021 19/10/2021	ug/l	137139062.5

PARÁMETRO	MÉTODO	FECHA REALIZACIÓN	UNIDAD	ENFRIAMIENTO 410/02/21
* CONDUCTIVIDAD	SM 2510 B	13/10/2021	uS/cm	156.2
DEMANDA BIOQUIMICA DE OXIGENO	PEE/LS/FQ/01	13/10/2021 18/10/2021	mg/l	11
DEMANDA QUIMICA DE OXIGENO	PEE/LS/FQ/06	13/10/2021	mg/l	75
pH	PEE/LS/FQ/07	13/10/2021		7.5
SOLIDOS SUSPENDIDOS TOTALES	PEE/LS/FQ/04	13/10/2021	mg/l	54
* ALUMINIO	SM 3120 ICP	13/10/2021 19/10/2021	ug/l	674.19
* HIERRO	PEE/LS/AI/04	13/10/2021 19/10/2021	ug/l	49082
* ZINC	SM 3120 ICP	13/10/2021 19/10/2021	ug/l	18161

<u>Parámetros</u>	<u>DBO</u>	<u>DOO rango bajo</u>	<u>DOO rango alto</u>	<u>pH</u>	<u>SOL. SUSP. TOTALES</u>	<u>HIERRO</u>
Incertidumbre	30.15% 95% k=1.96	22.21% 95% k=2	13.25% 95% k=2	3.03% 95% K=2.01	30.02% 95% k=1.96	23.52% 95% k=2

MC0406-16

<b>LABORATORIO DE SANEAMIENTO</b> Panamericana Norte Km. 5 y 1/2. - Cuenca Telf : 4175568	Laboratorio de Ensayo Acreditado por el SAE con Acreditación N° SAE LEN 06-004	<b>INFORME DE RESULTADOS</b> Página 1 de 1
---	--	---

FECHA: 28/01/2022

INFORME N°: 043/01/22

**DATOS PROPORCIONADOS POR EL CLIENTE**

NOMBRE: GALVANICA CIA. LTDA.  
 SOLICITADO POR: ING. ANGELA RODRIGUEZ  
 DIRECCIÓN: MONAY EL AGUACATE MONAY

**MUESTRA**

CÓDIGO: 043/01/22  
 DESCRIPCIÓN (Fuente): AGUA DE DECAPADO NEUTRALIZADA  
 PROCEDENCIA (Lugar): GALVANICA  
 FECHA DE RECEPCIÓN: 21/01/2022  
 ENTREGADAS EN EL LABORATORIO POR: BELÉN ALVARADO

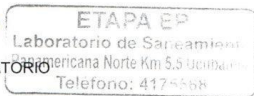
**RESULTADOS**

PARÁMETRO	MÉTODO	FECHA REALIZACIÓN	UNIDAD	AGUA DE DECAPADO NEL 043/01/22
DIANURO LIBRE	SM 4500CN D	21/01/2022	mg/l	Interferencia
DEMANDA BIOQUIMICA DE OXIGENO	PEE/LS/FQ/01	21/01/2022 26/01/2022	mg/l	5001
* DEMANDA QUIMICA DE OXIGENO	PEE/LS/FQ/06	21/01/2022	mg/l	43960
pH	PEE/LS/FQ/07	21/01/2022		5.10
* SOLIDOS SUSPENDIDOS TOTALES	PEE/LS/FQ/04	21/01/2022	mg/l	47242.85
* ALUMINIO	SM 3120 ICP	25/01/2022	ug/l	34342
* HIERRO	PEE/LS/AI/04	25/01/2022	ug/l	117700000
* ZINC	SM 3120 ICP	25/01/2022	ug/l	16731000

parámetros	DBO	DDO rango bajo	DDO rango alto	pH	SOL. SUSP. TOTALES	HIERRO
certidumbre	30.15% 95% k=1.96	22.21% 95% k=2	13.25% 95% k=2	3.03% 95% K=2.01	30.02% 95% k=1.96	23.52% 95% k=2

Atentamente,

  
 BQF. María José Chérrez T.  
 RESPONSABLE DEL LABORATORIO



Los resultados contenidos en el presente informe solo afectan a los objetos sometidos al ensayo.

Este informe no deberá reproducirse parcialmente sin la aprobación por escrito del laboratorio.

**Los ensayos marcados con (\*) NO están incluidos en el alcance de acreditación del SAE**

El laboratorio se descarga de responsabilidad debido a que la información del objeto de ensayo es proporcionada íntegramente por el cliente.

Los resultados son aplicados a la muestra tal y como se recibió.

La Declaración de conformidad queda excluida del informe de resultados.

El Laboratorio es responsable de la gestión de toda la información obtenida por el cliente y será tratada como estrictamente confidencial.

MC0406-16

<b>LABORATORIO DE SANEAMIENTO</b> Panamericana Norte Km. 5 y 1/2. - Cuenca Telf : 4175568	Laboratorio de Ensayo Acreditado por el SAE con Acreditación N° SAE LEN 06-004	<b>INFORME DE RESULTADOS</b> Página 1 de 2
---	--	---

FECHA: 09/03/2022

INFORME N°: 087/06/22

**DATOS PROPORCIONADOS POR EL CLIENTE**

 NOMBRE GALVANICA CIA. LTDA.  
 SOLICITADO POR: GALVANICA CIA. LTDA.  
 DIRECCIÓN: MONAY EL AGUACATE MONAY

**MUESTRA**

 CÓDIGO: 087/01-06/22  
 DESCRIPCIÓN (Fuente): EFLUENTE DE PROCESO  
 PROCEDENCIA (Lugar): DECAPADO (COAGULANTE)  
 FECHA DE RECEPCIÓN: 02/03/2022  
 ENTREGADAS EN EL LABORATORIO POR: ING. BELEN ALVARADO

**RESULTADOS**

PARÁMETRO	MÉTODO	FECHA REALIZACIÓN	UNIDAD	AGUA TRATADA SULFATO 087/01/22
* ALUMINIO	SM 3120 ICP	09/03/2022	ug/l	2469.5
* HIERRO	PEE/LS/AI/04	09/03/2022	ug/l	2724480
* ZINC	SM 3120 ICP	09/03/2022	ug/l	1442540

PARÁMETRO	MÉTODO	FECHA REALIZACIÓN	UNIDAD	AGUA TRATADA PAC pH 11 087/02/22
* ALUMINIO	SM 3120 ICP	09/03/2022	ug/l	2282.5
* HIERRO	PEE/LS/AI/04	09/03/2022	ug/l	47520000
* ZINC	SM 3120 ICP	09/03/2022	ug/l	4029520

PARÁMETRO	MÉTODO	FECHA REALIZACIÓN	UNIDAD	AGUA TRATADA CLORURO 087/03/22
* ALUMINIO	SM 3120 ICP	09/03/2022	ug/l	1630.75
* HIERRO	PEE/LS/AI/04	09/03/2022	ug/l	72648000
* ZINC	SM 3120 ICP	09/03/2022	ug/l	4046680

PARÁMETRO	MÉTODO	FECHA REALIZACIÓN	UNIDAD	AGUA TRATADA PAC pH5.8 087/04/22
* ALUMINIO	SM 3120 ICP	09/03/2022	ug/l	1436.6
* HIERRO	PEE/LS/AI/04	09/03/2022	ug/l	219560000
* ZINC	SM 3120 ICP	09/03/2022	ug/l	9693200

PARÁMETRO	MÉTODO	FECHA REALIZACIÓN	UNIDAD	AGUA TRATADA CLORURO 087/05/22
* ALUMINIO	SM 3120 ICP	09/03/2022	ug/l	1104.95
* HIERRO	PEE/LS/AI/04	09/03/2022	ug/l	36432000
* ZINC	SM 3120 ICP	09/03/2022	ug/l	1167760