



Universidad Nacional

**SAN LUIS GONZAGA**



## [Reconocimiento-NoComercial-CompartirIgual 4.0 Internacional](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)

Esta licencia permite a otras combinar, retocar, y crear a partir de su obra de forma no comercial, siempre y cuando den crédito y licencia a nuevas creaciones bajo los mismos términos.

[http://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0](http://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)



FACULTAD DE INGENIERÍA QUÍMICA Y PETROQUÍMICA  
UNIVERSIDAD NACIONAL SAN LUIS GONZAGA  
EVALUACIÓN DE ORIGINALIDAD

**CONSTANCIA**

El que subscribe, deja constancia que se ha realizado el análisis con el software de verificación de similitud al documento cuyo título es:

**"INFLUENCIA DE LA CONCENTRACIÓN DE SULFATO DE ALUMINIO EN LA CALIDAD DEL AGUA POTABLE OBTENIDA A PARTIR DEL AGUA SUPERFICIAL CON ALTA CARGA DE ARCILLA"**

Presentado por:

**Bach.**

**SALVATIERRA FLORES AZUCENA LIZBETH**

Autor de la Tesis del nivel de **PREGRADO** de la Facultad de **INGENIERÍA QUÍMICA Y PETROQUÍMICA**. El Resultado obtenido es 3% (PORCENTAJE DE SIMILITUD) por lo cual, se otorga el calificativo de:

**APROBADO**, según Reglamento de Evaluación de la Originalidad.

Se adjunta al presente el reporte de evaluación con el software de verificación de originalidad.

Observaciones:

El porcentaje de similitud es menor del 20%, establecido como máximo por Reglamento de Evaluación de originalidad.

Ica, 20 de enero de 2025

  
UNIVERSIDAD NACIONAL SAN LUIS GONZAGA  
**Dr. FERNANDO EDUARDO CANO LEGUA**  
DIRECTOR DE LA UNIDAD DE INVESTIGACIÓN  
DE LA FACULTAD DE INGENIERÍA QUÍMICA Y PETROQUÍMICA

UNIVERSIDAD NACIONAL “SAN LUIS GONZAGA”

**VICERRECTORADO DE INVESTIGACIÓN**  
**Facultad de Ingeniería Química y Petroquímica**



**“Influencia de la concentración de sulfato de aluminio en la  
calidad del agua potable obtenida a partir del agua superficial  
con alta carga de arcilla”**

Línea de investigación: Ciencias naturales, ingeniería y tecnologías  
sostenibles.

**Tesis para optar el Título Profesional de Ingeniero Químico**

Autora: SALVATIERRA FLORES AZUCENA LIZBETH

Asesor: Mg. Jorge Enrique Espinoza La Rosa

Ica – Perú

2024

**DEDICATORIA**

A Dios por ser el forjador de mi camino, el que me acompaña. A mis padres, por todo su apoyo a lo largo de mi carrera.

### **AGRADECIMIENTOS**

Mi agradecimiento eterno a todos mis docentes quienes durante la carrera cultivaron en mí sus conocimientos y su visión de crecimiento profesional. Agradecer especialmente a mi Asesor, Mg. Jorge Espinoza La Rosa, por el apoyo constante y paciencia que me brindó durante su asesoría.

## INDICE DE CONTENIDOS

	Pág.
PORTADA	01
DEDICATORIA	02
AGRADECIMIENTO	03
ÍNDICE DE CONTENIDOS	04
ÍNDICE DE TABLAS	05
ÍNDICE DE FIGURAS	06
RESUMEN	07
ABSTRACT	08
I. INTRODUCCIÓN	09
II. ESTRATEGIA METODOLOGICA	12
2.1. Antecedentes.	12
2.2. Marco teórico.	13
2.3. Marco conceptual.	23
2.4. Estrategia metodológica.	24
2.5. Procedimiento experimental.	25
III. RESULTADOS	31
IV. DISCUSIÓN.	53
V. CONCLUSIONES	55
VI. RECOMENDACIONES.	56
VII. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.	57
VIII. ANEXOS.	58

## INDICE DE TABLAS

	<b>Pág.</b>
Tabla 3.1. Resultados del análisis fisicoquímico.	31
Tabla 3.2. Variación del pH del agua al agregar el $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$	32
Tabla 3.3. Variación del pH modificado del agua con NaOH al agregar el $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$	33
Tabla 3.4. Variación del pH modificado del agua con $\text{CaCO}_3$ al agregar el $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$	34
Tabla 3.5. Variación del pH modificado del agua con CaO al agregar el $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$	35
Tabla 3.6. Remoción de los SST con 50 mg/L de $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$	36
Tabla 3.7. Remoción de los SST con 75 mg/L de $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$	37
Tabla 3.8. Remoción de los SST con 100 mg/L de $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$	38
Tabla 3.9. Remoción de los SST con 125 mg/L de $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$	39
Tabla 3.10. Remoción de los SST con 150 mg/L de $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$	40
Tabla 3.11. Remoción de los SST con 180 mg/L de $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$	41
Tabla 3.12. SST eliminado según la concentración del $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$	42
Tabla 3.13. SST eliminado según la concentración del $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$	43
Tabla 3.14. SST eliminado y residual según la concentración del $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$	44
Tabla 3.15. Aluminio en el sobrenadante de la coagulación con 50 mg/L de $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$	45
Tabla 3.16. Aluminio en el sobrenadante de la coagulación con 75 mg/L de $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$	46
Tabla 3.17. Aluminio en el sobrenadante de la coagulación con 100 mg/L de $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$	47
Tabla 3.18. Aluminio en el sobrenadante de la coagulación con 125 mg/L de $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$	48
Tabla 3.19. Aluminio en el sobrenadante de la coagulación con 150 mg/L de $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$	49
Tabla 3.20. Aluminio en el sobrenadante de la coagulación con 175 mg/L de $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$	50
Tabla 3.21. Aluminio en el sobrenadante de la coagulación con 180 mg/L de $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$	51
Tabla 3.22. Aluminio en el sobrenadante de la coagulación con diversas concentraciones de $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$	52

## INDICE DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Foto de tres arcillas: roja, amarilla y blanca.	14
Figura 2. Estructura típica de los filosilicatos.	15
Figura 3. Estructura de las unidades básicas de arcillas.	15
Figura 4. Turbidez del agua ocasionada por la arcilla.	16
Figura 5. Proceso de clarificación del agua superficial.	17
Figura 6. Capas eléctricas que se forman en torno al coloide.	18
Figura 7. Potencial zeta de la partícula coloidal.	18
Figura 8. Microfotografía mostrando el aspecto de un flóculo.	19
Figura 9. Coagulación de las arcillas.	20
Figura 10. Adición del floculante al agua.	22
Figura 11. Potenciómetro digital con termómetro.	25
Figura 12. Equipo para determinar SST.	27
Figura 13. Picnómetro para determinar densidad.	28
Figura 14. Equipo para el ensayo de Jar-test.	29

## RESUMEN

La tesis cuyo título es “**Influencia de la concentración de sulfato de aluminio en la calidad del agua potable obtenida a partir del agua superficial con alta carga de arcilla**”, es un estudio teórico experimental de tipo aplicado, de nivel explicativo y de diseño experimental, en el cual se aborda el estudio de la floculación de las aguas superficiales que arrastran gran cantidad de arcilla, con sulfato de aluminio. Para demostrar la hipótesis planteada se desarrollaron pruebas experimentales en base a dos parámetros fundamentales del proceso: el pH y la concentración del reactivo, los resultados reportan que el sulfato de aluminio como coagulante posee un amplio rango de pH dentro de los cuales puede trabajar, mostrando su mayor eficiencia en un pH que está en el límite de 5,5 y 7,8, dentro de los cuales ejerce mejor su actividad coagulante a la vez que se precipita como hidróxido casi en su totalidad quedando en el agua tratada un mínimo de la sal. Mediante la dosificación de CaO se ha elevado el pH del agua a 8,3 con lo que se ha logrado que tratando el agua con alta carga de arcilla con 180 mg/L de  $Al_2(SO_4)_3$  quede en el agua tratada solo 0,4 mg/L de Al. De esta manera en esta tesis se ha analizado la calidad del agua en función a la cantidad de aluminio que hay en ella ya que este metal pesado influye en la salud de los consumidores especialmente afectando el sistema nervioso, considerándose uno de los responsables del Alzheimer.

Palabras claves: Sulfato de aluminio, coagulación, floculación, coloides.

## ABSTRACT

The thesis whose title is "Influence of the concentration of aluminum sulfate on the quality of drinking water obtained from surface water with a high clay load", is an experimental theoretical study of an applied type, with an explanatory level and an experimental design, in which the study of the flocculation of surface waters that carry a large amount of clay is addressed, with aluminum sulfate. To demonstrate the proposed hypothesis, experimental tests were developed based on two fundamental parameters of the process: the pH and the concentration of the reagent. The results report that aluminum sulfate as a coagulant has a wide range of pH within which it can work, showing its greatest efficiency at a pH that is on the limit of 5.5 and 7.8, within which it best exerts its coagulant activity while it precipitates as hydroxide almost entirely, leaving a minimum of the treated water. salt. By dosing CaO, the pH of the water has been raised to 8.3, which has achieved that by treating the water with a high clay load with 180 mg/L of  $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ , only 0.4 mg/L of Al. In this way, in this thesis, the quality of the water has been analyzed based on the amount of aluminum in it since this heavy metal influences the health of consumers, especially affecting the nervous system, considering one of those responsible for Alzheimer's.

Keywords: Aluminum sulfate, coagulation, flocculation, colloids.

## I. INTRODUCCIÓN

El aluminio que es detectado en el agua potable llega a esta debido al uso del sulfato de aluminio y otras sales de este metal en el tratamiento que se sigue para obtener agua potable. Estos compuestos se emplean como coagulantes durante la etapa de tratamiento primario del agua potable. Los coagulantes actúan primero como desestabilizadores de las partículas finas y los coloides que se encuentran diseminadas en el agua pero que no se sedimentan debido a su pequeñísimo tamaño y a la presencia de una misma carga eléctrica que les impide aglutinarse cosa que se logra agregando sulfato de aluminio el cual cambia la carga eléctrica de las partículas permitiendo su desestabilización y luego su aglutinación en torno a la partícula con carga positiva formando un coagulo más grande y pesado que se sedimenta gracias a la fuerza de la gravedad.

Terminada la coagulación-floculación la cantidad de aluminio que debe quedar en el agua potable debe estar dentro de los límites permitidos por las normas nacionales e internacionales. La dosis de coagulante utilizada, el pH del agua, la sedimentación y filtración son algunos de los factores más relevantes del que depende la cantidad de aluminio residual en el agua. En esta tesis se estudiará experimentalmente la posibilidad de disminuir al mínimo la cantidad de aluminio residual después del tratamiento de coagulación-floculación a fin de disminuir sus efectos negativos en la salud de los consumidores, es decir, en esta tesis se considera como un indicador de la calidad del agua.

### **Situación problemática.**

Es común que el agua superficial que discurre por los ríos de nuestro país en verano, debido a las lluvias que se generan en la sierra y que causan los huaycos y deslizamientos de tierra por la erosión del suelo debido a la fuerza del agua, ésta tenga una coloración marrón, lo que indica una alta carga de partículas de arcilla, las cuales son finísimas y es imposible separarlas por métodos físicos como la filtración o la decantación, en el caso de esta última, cuando no se emplean floculantes es demasiado lenta y no se pueden separar la totalidad de las partículas de arcilla ya que se mantienen las más finas en constante movimiento en todo el volumen del agua (movimiento browniano). Por estos motivos generalmente se emplean floculantes, que son sustancias químicas cuya función es modificar la carga eléctrica de las partículas permitiendo la formación de flóculos los mismos que por su tamaño y peso son decantados, separándose de esta manera del líquido sobrenadante que queda totalmente transparente. Una de las sustancias químicas empleadas como floculantes es el sulfato de aluminio, muy usado en el tratamiento del agua potable, sin embargo, su uso en cantidades excesivas para lograr la eliminación total de la turbidez del agua puede causar problemas en la salud de los consumidores. El aluminio disuelto como sulfato de aluminio con el fluoruro que hay en el agua forma complejos biodisponibles que son fácilmente absorbidos por el intestino delgado, causando según datos médicos una serie de enfermedades nerviosas entre ellas el Alzheimer. Hay que tener en cuenta que el aluminio es un metal pesado y por lo tanto su consumo sostenido puede producir enfermedades como el cáncer.

### **Problema general.**

¿La concentración de sulfato de aluminio influye en la calidad del agua potable obtenida a partir del agua superficial con alta carga de arcilla?

### **Problemas específicos:**

- ¿Es posible optimizar el efecto del sulfato de aluminio, a fin de disminuir su dosificación en el tratamiento de la turbidez del agua?
- ¿Cuál es la concentración promedio del aluminio en el agua potable que contenía una alta carga de arcilla?

### **Objetivo general**

Determinar la influencia de la concentración de sulfato de aluminio en la calidad del agua potable obtenida a partir del agua superficial con alta carga de arcilla.

### **Objetivos específicos:**

- Verificar si es posible optimizar el efecto del sulfato de aluminio, a fin de disminuir su dosificación en el tratamiento de la turbidez del agua.
- Determinar la concentración promedio del aluminio en el agua potable que contenía una alta carga de arcilla.

### **Hipótesis general.**

La concentración de sulfato de aluminio influye directamente en la calidad del agua potable obtenida a partir del agua superficial con alta carga de arcilla.

### **Hipótesis específicas:**

- La optimización del efecto del sulfato de aluminio, a fin de disminuir su dosificación en el tratamiento de la turbidez del agua es posible.
- La concentración promedio del aluminio en el agua potable que contenía una alta carga de arcilla es alta.

### **Variables:**

#### **Variable independiente:**

Concentración del sulfato de aluminio

#### **Variable dependiente.**

Calidad del agua obtenida a partir de agua superficial con alta carga de arcilla.

### **Justificación e importancia de la investigación.**

#### **Justificación teórica:**

Teóricamente la presente investigación se justifica porque aborda el estudio de un coagulante muy usado en la clarificación pero que no se ha realizado los estudios correspondientes para establecer su efecto en el organismo humano y los daños que esta sal puede causarle.

**Justificación metodológica:**

Desde la perspectiva metodológica, la investigación planteada es aplicada y de diseño experimental, para demostrar la hipótesis planteada se llevarán a cabo ensayos tendientes establecer parámetros para la floculación eficiente sin emplear exceso de reactivo sulfato de aluminio.

**Justificación práctica:**

Desde la perspectiva práctica, la investigación se justifica porque empleará métodos del análisis y procedimientos experimentales sencillos como es la prueba de jarras y el reconocimiento del aluminio mediante métodos de la química analítica clásica.

**II. ESTRATEGIA METODOLÓGICA****2.1. Antecedentes.**

### **A nivel internacional:**

R. Trejo y V. Hernández [1] publicaron su artículo en el cual se hace un estudio sobre los riesgos del aluminio para la salud de las personas. La investigación es teórica o básica, descriptiva por su nivel y de diseño no experimental, en la cual se ha hecho una síntesis de los estudios médicos realizados alrededor del mundo que más han sobresalido. En este trabajo se afirma que si bien es cierto el sulfato de aluminio se emplea en el tratamiento del agua potable, en muchos de los trabajos sobre esta partícula no se hace hincapié en los posibles daños que puede afectar este metal pesado en el organismo humano. Se considera como una de las enfermedades más peligrosas que puede ocasionar el aluminio al Alzheimer y otras enfermedades del sistema nervioso. En este artículo se hace un resumen de los resultados obtenidos en la ciencia médica al tratar pacientes que han consumido durante mucho tiempo agua potable con alto contenido de aluminio, el mismo que no ha sido controlado en el proceso de clarificación del agua.

M. Barquero, R. Vargas y R. Blanco [2] publicaron su artículo científico titulado “Neurotoxicidad y enfermedades óseas provocadas por la contaminación con aluminio de soluciones de diálisis renal”, el cual por los mismos autores se considera una revisión bibliográfica ya que es una investigación básica, no experimental, realizada en gabinete, cuyo objetivo fue revisar las evidencias más importantes de la neurotoxicidad in vitro del aluminio, y ciertos reportes del estudio de cerebros de pacientes con la enfermedad de Alzheimer, así mismo en este trabajo se revisan investigaciones realizadas en pacientes con afecciones renales, ya que en este órgano se desarrolla las ostodistrofias causados por aluminio. Las concentraciones peligrosas o superiores a los límites máximos permitidos son muy pequeñas por lo que para analizar su presencia en los fluidos humanos se requiere de métodos de análisis instrumentales como la espectrofotometría electrotérmica de absorción atómica ETAS, y métodos voltamperométricos con agentes acomplejantes; que permiten adsorción sobre electrodos sólidos o de gota suspendida de mercurio.

### **A nivel nacional.**

J. Claros [3], presentó su tesis de doctorado que aborda un tema relacionado con las propiedades fisicoquímicas del agua y su relación con el polihidroxiclورو de aluminio, el cual afecta la velocidad de agitación y el pH de la turbidez del agua de los ríos. Y la posibilidad de la potabilización. La investigación es aplicada, en ella se estudia el proceso de clarificación (coagulación, floculación y sedimentación), Su nivel es explicativo, su diseño es experimental. Los ensayos consistieron en tratar de eliminar la turbidez del agua a la cual se le agregó ciertas concentraciones de polihidroxiclورو de aluminio, (10 y 50 mL), se trabajó a un rpm de 50 y 100 y un pH 6 y 7. Siendo la turbidez la variable dependiente. Los ensayos se realizaron con el equipo de Jar test. Como resultado de la aplicación del método propuesto se obtuvo una remoción de la turbidez igual a un 86,67%.

R. Vásquez [4] presentó su tesis sobre un método para optimizar el efecto coagulante del sulfato de aluminio en el tratamiento del agua potable en una planta cajamarquina, el objetivo de la tesis fue evaluar el comportamiento del sulfato de aluminio bajo ciertas condiciones fisicoquímicas previamente establecidas en el agua a ensayar, los parámetros analizados fueron: pH, dureza y concentración del reactivo. Se pudo comprobar que a un pH 7 la actividad del sulfato es más efectiva, y lo mismo sucede cuando se eleva su concentración. Para modificar el pH del agua empleada en los ensayos se empleó ácido cítrico para darle un pH entre 6 y 7,4 y óxido de cal para darle carácter básico al agua ensayada. El autor concluye en primer lugar que el coagulante sulfato de aluminio es más eficiente a un pH 7, en el cual es capaz de eliminar hasta un 86% de sólidos suspendidos. Con un pH ácido de 6 se logra remover solo el 26% de los sólidos y a un pH 7,8 esta remoción alcanza como máximo el 85%. Siendo 86% el porcentaje promedio de remoción.

#### **A nivel local.**

No se encontró ninguna investigación relacionada a este plan.

## **2.2. Marco teórico.**

### **2.2.1. Arcilla.**

La arcilla desde el punto de vista mineralógico se considera una roca sedimentaria en cuya composición hay agregados de silicatos de aluminio hidratados que proceden de las rocas que en su estructura tiene feldespato y granito. El color de la arcilla es muy variado y depende de la impureza de su contenido variando desde un rojo anaranjado hasta el blanco. Las arcillas se consideran coloides, sus partículas son muy pequeñas de un diámetro menor a 0,0039mm que poseen una superficie lisa. Medidas inferiores a 0.0039mm suelen ser los diámetros de las partículas de la arcilla. En su estructura se encuentran partículas que no son de naturaleza mineral, entre ellos los fitolitos. Desde el punto de vista químico la arcilla es un silicato de aluminio hidratado que tiene la siguiente fórmula química es:  $Al_2O_3 \cdot 2SiO_2 \cdot 2H_2O$ . Una de sus propiedades fisicoquímicas más saltantes es su plasticidad al mezclarse con el agua. Cuando esa masa que se adquiere al mezclarla con el agua se seca se vuelve dura y su dureza aumenta cuando se somete a temperaturas muy altas (por encima de los 800°C)

Las arcillas se pueden clasificar de diferente manera dependiendo de varios factores, y en este punto, de acuerdo con el objetivo de la tesis nos interesa la clasificación de acuerdo con su origen según la cual las arcillas pueden ser: residuales, coluviales y transportadas.

Estos tres tipos de arcillas son las que ingresan al agua sobre todo en época de lluvias como resultado del lavado de los terrenos, obteniéndose un agua totalmente turbia de un color marrón oscuro.



Figura 1. Foto de tres arcillas: roja, amarilla y blanca.

#### Arcillas residuales:

Estas arcillas se forman en el mismo lugar de la alteración de la roca gracias a la meteorización mecánica o química de los compuestos de aluminio (especialmente los feldspatos) que conforman las rocas eruptivas. Este proceso es generado por causas externas o internas, entre ellas los procesos hidrotermales de baja temperatura (aguas ácidas ricas en dióxido de carbono). Estas arcillas se subclasifican en cuatro clases:

- Arcillas residuales generadas por meteorización superficial, en un proceso que implica solución, desintegración o descomposición de los silicatos.
- Arcillas residuales blancas generadas por la acción de aguas ascendentes ricas en dióxido de carbono, posiblemente de origen hidrotermal.
- Arcillas residuales blancas formadas por acción de las soluciones descendentes en las aguas de percolación.
- Arcillas residuales blancas formadas por reemplazamiento in situ, debido a la acción de aguas meteóricas (agua de lluvia)

#### Arcillas Coluviales.

Son las arcillas formadas por lavado de anteriores depósitos arcillosos y nuevamente depositadas in situ. Son arcillas refractarias.

#### Arcillas transportadas.

Las arcillas que han sido nuevamente depositadas en un sitio diferente al de su formación original y que puede ser depositadas en aguas de diferentes cuerpos de agua entre ellos los

ríos. También incluyen las arcillas depositadas por el viento, y las arcillas de precipitación química.

### Química y estructura

Las arcillas están compuestas de láminas de tetraedros con una composición química general de  $\text{Si}_2\text{O}_5$ , en donde cada tetraedro ( $\text{SiO}_4$ ) está unido por sus vértices a otros tres, formando una red hexagonal. Átomos de aluminio y hierro pueden reemplazar parcialmente al silicio en la estructura.

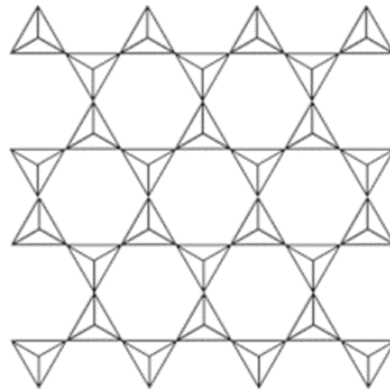


Figura 2. Estructura típica de los filosilicatos: red hexagonal de tetraedros unidos por sus vértices

Los átomos de oxígeno ubicados en los ápices de los tetraedros de estas láminas pueden, formar parte de otra lámina paralela compuesta por octaedros que suelen estar coordinados por cationes de Al,  $\text{Fe}^{3+}$  y  $\text{Fe}^{2+}$ , es decir, los átomos de estos elementos ocupan la posición central del octaedro.

Las grandes superficies de los minerales de la arcilla suelen estar cargadas de electricidad estática lo que las hacen capaces de absorber iones y moléculas.

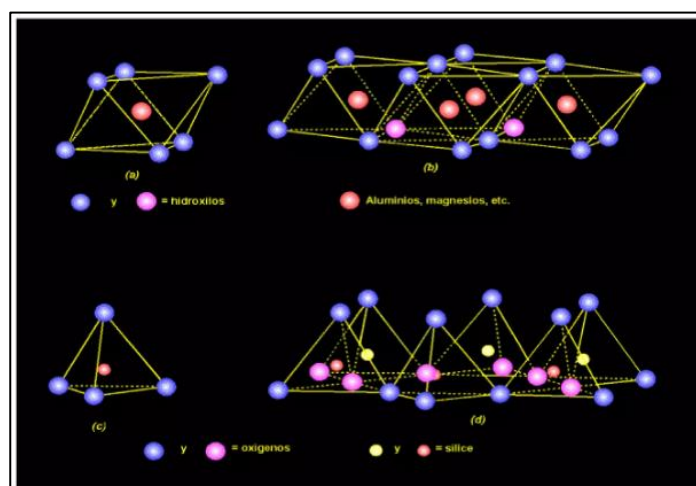


Figura 3. Estructura de las unidades básicas de arcillas: a) Octahédrica, (b) capa octahédrica, (c) tetrahédrica y (d) capa tetrahédrica.

La mayoría de los minerales arcillosos se diferencian entre ellos por la cantidad de sílice contenida en la fórmula, de esta manera se diferencian minerales del grupo de la caolinita, dickita, haloisita y nacrita. -ciertos autores consideran dentro de estos minerales a la serpentina y al grupo de la esmectita.

Desde el punto de vista granulométrico las arcillas tienen un diámetro menor a 0,0039 mm.



Figura 4. Turbidez del agua ocasionada por la arcilla.

Los sólidos suspendidos de las aguas superficiales resultan en primer lugar de la erosión de las rocas sedimentarias, la disolución de minerales en las aguas ácidas, la fragmentación y descomposición de la flora además de ciertos vertidos de desechos domésticos e industriales. Cuando se habla de los sólidos suspendidos en las aguas superficiales se consideran dentro de estas tanto material inorgánico como orgánico dentro de este último se incluyen los microorganismos entre ellos: bacterias, algas o virus. Estos sólidos suspendidos son los responsables del color y la turbidez del agua, además de disminuir su calidad con contaminantes que pueden ser incluso peligrosos y tóxicos, por lo que para el caso de las aguas que están destinadas al consumo humano se exige su eliminación total.

Para eliminar estos sólidos suspendidos de las aguas superficiales se realiza la clarificación de estas, que es uno de las primeras etapas del tratamiento primario de las aguas y que consta de operaciones sencillas cuya finalidad es atrapar mediante tratamiento físico o químico las partículas que por sí solas no van a lograr separarse debido a la condición física que le otorga carga negativa la cual impide que estas partículas se puedan aglutinar y muy por el contrario se rechazan viajando erráticamente por todo el volumen del líquido por tiempo indefinido, siendo necesario emplear métodos que permitan cambiar la carga negativa mediante el uso de ciertos reactivos en un proceso denominado coagulación y floculación.

La clarificación de las aguas consta de las etapas que a continuación se citan: coagulación, floculación, decantación y filtración, tal como podemos ver en el siguiente esquema:

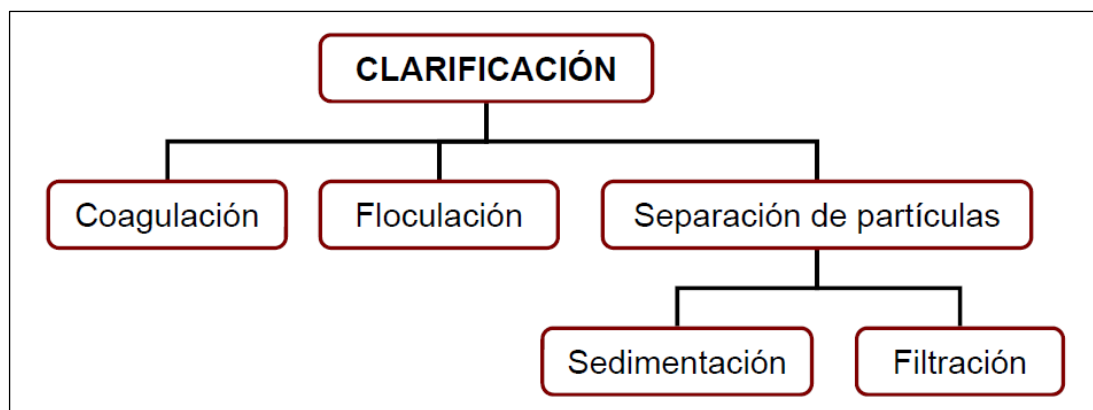


Figura 5. Proceso de clarificación del agua superficial.

### **Suspensiones coloidales.**

El estudio teórico de los sólidos suspendidos en el agua tiene mucho que ver con el estudio de las suspensiones coloidales de las cuales nos ocuparemos previamente de manera resumida en este acápite.

Suspensiones coloidales o coloides se denominan a los sistemas fisicoquímicos que poseen dos fases: continua fluida y dispersa sólida, siendo la primera la de mayor proporción y la segunda de menor proporción, ambas fases se encuentran en equilibrio y estables. La estabilidad de los coloides está fundamentada en la teoría de la doble capa. Esta teoría se basa en que las cargas superficiales de la partícula coloidal atraen iones de carga opuesta, generándose un estado de carga neutra entre la partícula coloidal y su entorno más próximo. En la zona de carga neutra, debido al movimiento de las moléculas de agua se genera una capa difusa de cargas eléctricas extendiéndose al interior del líquido, dando origen a tres zonas bien definidas que son las siguientes:

- a) Capa superficial que envuelve al coloide con carga eléctrica negativa, con un potencial eléctrico conocido como Potencial de Nernst
- b) Capa de Stern, con carga de signo positivo, que son atraídas con fuerza por la superficie del coloide, su potencial eléctrico es el potencial de Stern.
- c) Capa difusa de Gouy-Chapman, conformada por iones que se mueven hasta la superficie neutra del liquido

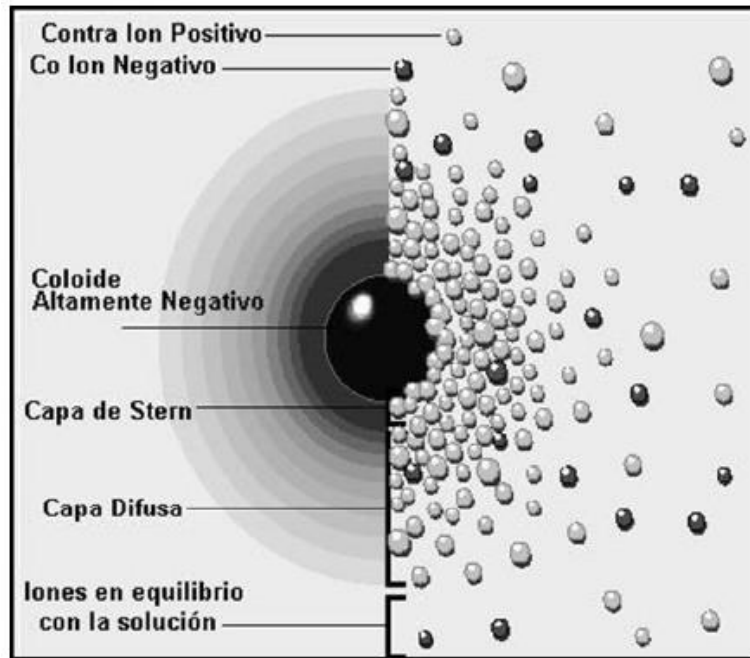


Figura 6. Capas eléctricas que se forman en torno al coloide.

**Potencial Zeta.**

Se llama así al valor de la diferencia de potencial entre el límite de la solución rígidamente unida a la partícula y la masa del líquido.

Para entender que es el potencial Zeta hay que tener en cuenta que la partícula tiene un cierto potencial con relación a la solución neutra en la que está, pero que este potencial va disminuyendo conforme nos alejamos de la partícula hasta ser no detectable en la masa del líquido, tal como se aprecia en el diagrama adjunto.

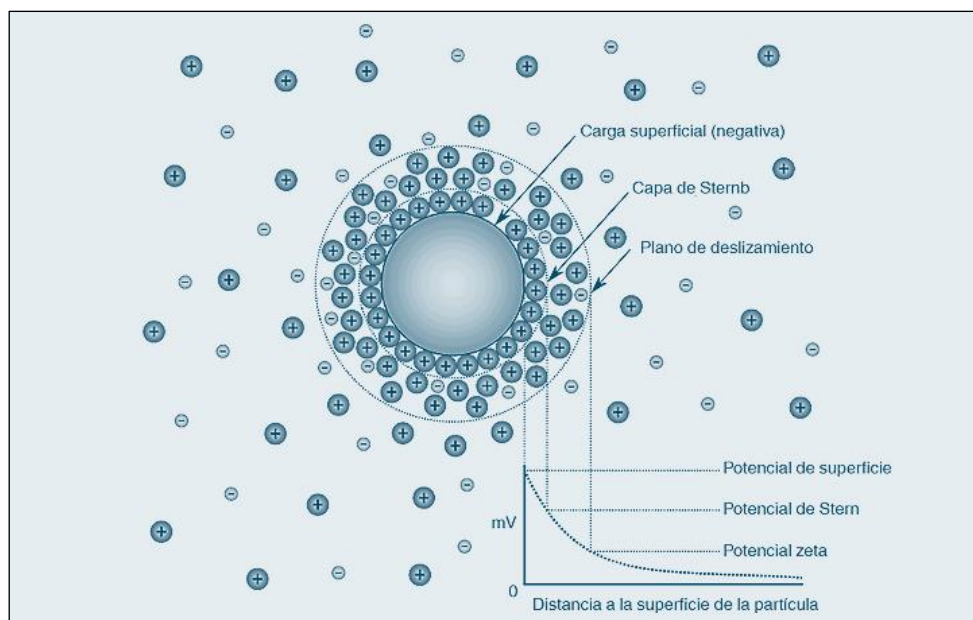


Figura 7. Potencial zeta de la partícula coloidal.

La generación del potencial Zeta y de la capa doble alrededor de la partícula coloidal es lo que impide que la aproximación de las partículas sólidas sean lo suficiente para que las fuerzas atractivas de Van Der Waals puedan entrar en acción agrupando a los coloides. Junto a este fenómeno físico se da la repulsión electrostática entre cargas de igual signo, lo que contribuye a la estabilidad del sistema. Para formar flóculos se debe de romper esta estabilidad, es decir se debe desestabilizar y reducir la doble capa y la potencial zeta.

### **Coagulación.**

La coagulación es un proceso químico de desestabilización de las cargas negativas de las partículas coloidales, en otras palabras, las cargas negativas constituyen las fuerzas repulsivas que impiden que las partículas coloidales choquen y formen agregados de mayor tamaño que puedan sedimentarse. Mediante la coagulación se rompe la barrera de las cargas negativas que impiden que las partículas choquen entre sí para aglutinarse. La finalidad de la coagulación es modificar las propiedades eléctricas de las partículas suspendidas de tal forma que ellas no se repelan y se vayan poco a poco aglutinando, formando finalmente los flóculos que son más fáciles de separar, debido a que estos flóculos son mucho más grandes y pesados.

Las partículas suspendidas que se encuentran en el agua turbia por presencia de arcilla tienen los siguientes diámetros:

- Partículas que están en forma de *suspensión*, de tamaño  $>10^{-7}$  m,
- Las que forman *solución coloidal*, de tamaño entre  $10^{-7}$  y  $10^{-9}$  m.
- Aquellas que forman una verdadera *solución*, de tamaño  $<10^{-9}$  m

La coagulación actúa principalmente en las partículas cuyos diámetros están entre  $10^{-4}$  y  $10^{-9}$  m (partículas en suspensión y soluciones coloidales), que no se separan por decantación (gravedad) o mediante la filtración.

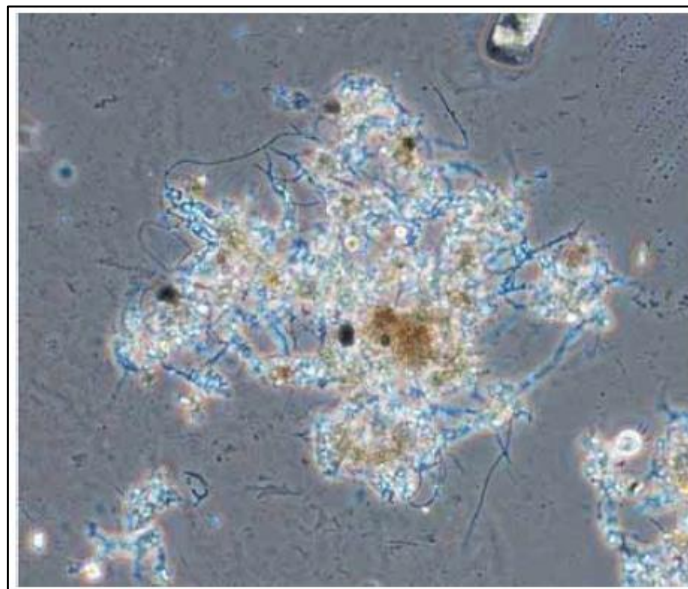


Figura 8. Microfotografía mostrando el aspecto de un flóculo.

La coagulación se considera un proceso químico porque para eliminar las fuerzas repulsivas y permitir que se formen los flóculos lo suficientemente grandes para que decanten por su propio peso se emplean reactivos químicos y aditivos, entre ellos los que tienen mayor aplicación son los siguientes:

**Coagulantes primarios:** sales de aluminio, sales de hierro, etc.

**Coadyuvantes:** sílice activada y polielectrolitos no iónicos, aniónicos o catiónicos.

**Agentes alcalinos:**  $\text{CaCO}_3$ , dolomita (58%  $\text{CaO}$ , 40%  $\text{MgO}$ ),  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ,  $\text{MgO}$ ,  $\text{Na}_2\text{CO}_3$ ,  $\text{NaOH}$

**Agentes que incrementan la concentración coloidal y la densidad de los flóculos:** bentonita, caolín, arcillas.



Figura 9. Coagulación de las arcillas.

Para llevar a cabo la coagulación de manera eficiente se requiere de ciertas condiciones las cuales deben de cumplirse rigurosamente:

- pH:  
El pH del agua a la cual se agregará el coagulante debe estar en un valor adecuado para permitir la rápida y total disolución del reactivo. Esto quiere decir que la solubilidad del coagulante depende del pH si este no se encuentra en el rango óptimo la solubilidad del coagulante va a ser menor y por tanto la formación del flóculo va a demorar o no se va a producir.
- Turbidez:  
La turbidez del agua a tratar y la cantidad de coagulante a usar se encuentran en una relación directa, esto quiere decir que, se deben utilizar en iguales proporciones para lograr que todas partículas suspendidas que ocasionan la turbidez se aglutinen formando flóculos y luego sedimenten por su propio peso.

- **Agitación y mezcla:**  
Mediante la agitación y mezcla se busca la distribución homogénea del coagulante en todo el volumen del líquido, esto asegura una buena coagulación. En este caso hay que controlar la velocidad de agitación y el tiempo que debe durar para distribuir uniformemente el reactivo y evitar que los flóculos que se formen inicialmente se desintegren por efecto de la agitación.
- **Tamaño de las partículas:**  
Múltiples estudios experimentales han reportado que cuanto más pequeñas son las partículas suspendidas, se requiere de una mayor dosificación de coagulante.
- **Dosis de Coagulante:**  
La dosis necesaria de coagulante que se utiliza en el proceso debe ser la adecuada y suficiente para producir la coagulación sin dejar residuo a fin de no contaminar el agua potable con el aluminio o el hierro, según sea el caso.

### **Sulfato de aluminio**

El sulfato de aluminio es un compuesto inorgánico que se presenta como sustancia cristalina de fórmula química  $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 18\text{H}_2\text{O}$ , muy soluble en agua y tiene reacción ácida debido a la hidrólisis. Al precipitar el hidróxido de aluminio en el líquido queda el ácido formado, por este motivo disminuye el pH de la solución. La reacción es la siguiente:



El sulfato de aluminio tiene la capacidad de formar sulfatos básicos cuando se le somete a ebullición junto con el hidróxido de aluminio  $\text{Al}(\text{OH})_3$ . Cuando el sulfato de aluminio se mezcla con el bicarbonato de sodio se forma dióxido de carbono e hidróxido de aluminio que vuelve estable las burbujas que se generan en la reacción, debido a estas propiedades esta reacción se emplea para generar espuma contra incendios en el combate contra incendios provocados por la combustión del petróleo y sus derivados.

Comercialmente al sulfato de aluminio se le conoce como alumbre y su principal uso es en el tratamiento de aguas de uso doméstico como coagulante para eliminar la turbiedad. En este proceso el mecanismo químico del sulfato de aluminio es el siguiente:

- **Hidrólisis del ion metálico  $\text{Al}^{3+}$**   
 $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 + \text{H}_2\text{O} \leftrightarrow [\text{Al}(\text{H}_2\text{O})_6]^{3+} + \text{SO}_4^{2-}$
- **Reacción con la alcalinidad del agua**  
 $[\text{Al}(\text{H}_2\text{O})_6]^{3+} + \text{CO}_3^{2-} \leftrightarrow [\text{Al}(\text{H}_2\text{O})_5](\text{OH})^{2+} + \text{HCO}_3^-$
- **Compuesto inestable, se hidroliza y forma complejos polinucleares:**  
 $[\text{Al}_2(\text{OH})_2]^{4+}$ ,  
 $\text{Al}_7(\text{OH})_{17}^{4+}$ ,

$\text{Al}_{13}(\text{OH})_3^{5+}$ , etc.

Estos son hidróxidos de aluminio insolubles que al precipitar arrastran las partículas de micelas.

### **Floculación.**

Se denomina floculación al proceso químico posterior a la coagulación, que tiene como función aglutinar los coágulos dispersos en el agua resultantes de la coagulación formando los flóculos más grandes que por su peso se decantan

Los floculantes (o coadyuvantes de coagulación) son sustancias químicas que actúan como puente o unión para captar mecánicamente las partículas en suspensión favoreciendo la formación de flóculo. El coagulante y floculante se diferencian en que el coagulante desestabiliza la carga eléctrica del coloide (anula las cargas repulsivas) permitiéndoles que se junten formando coágulos, mientras que el floculante reúne los micro coágulos formados para dar paso a los flóculos que tienen mayor tamaño y más peso, lo que les permite sedimentar solos con mayor facilidad y rapidez.

Los floculantes se usan generalmente en las plantas de tratamiento de agua ya que permite con rapidez tratar mayores cantidades de agua, también permite mejorar la floculación en circunstancias en que los cambios de temperatura o la calidad del agua que ingresa a la planta es mala.



Figura 10. Adición del floculante al agua.

En la clarificación del agua los floculantes que más se usan en pruebas de laboratorio y en las plantas de tratamiento son los que a continuación se citan:

- 1) *Agentes adsorbentes.* Estos son minerales o tierras especiales que tienen la capacidad de adsorber sobre su superficie los coágulos que se forman después de la coagulación, de esta manera adquieren mayor peso que les permite sedimentar. Entre estos adsorbentes figuran las bentonitas. Las bentonitas también adsorben partículas coloidales, formando un flóculo inicial, que rápidamente aumenta de volumen, este es el caso del carbón activado o de la tierra de diatomeas.
- 2) *Sílice activa.* Obtenida a partir del silicato de sódico ( $\text{Na}_2\text{SiO}_3$ ) disuelto, el cual es neutralizado con ácido con el fin de activarlo. Presenta alta efectividad como auxiliar del tratamiento con sulfato de alúmina (alumbre)

### **Separación de flóculos**

Después de la coagulación floculación el agua tratada se deja reposar a fin de que se produzca la decantación, en esta etapa se puede observar que los flóculos se decantan con mayor rapidez, quedando en la parte superior un líquido límpido que se filtra a fin de eliminar cualquier tipo de sólido suspendido.

## **2.3. Marco conceptual.**

### **Agua cruda**

Es el agua de cualquier cuerpo de agua subterránea o superficial, que no ha sido tratada en ninguna planta.

### **Agua potable**

Es el agua que está destinada al consumo humano y por lo tanto está libre de patógenos y de cualquier sustancia contaminante que ponga en riesgo la salud y la vida de los consumidores.

### **Alcalinidad**

La capacidad del agua para neutralizar un ácido desde el punto de vista cuantitativa y se expresa en mg /L de carbonato de calcio equivalente.

### **Alumbre**

Es el nombre comercial del sulfato de aluminio [ $\text{Al}_2 (\text{SO}_4)_3 \cdot 14\text{H}_2\text{O}$ ], empleado como coagulante en la clarificación del agua.

### **Coagulante**

Sal metálica o polímero que puede ser de carga positiva, negativa o neutra, se emplea para desestabilizar las partículas coloidales del agua y separarlas de ella.

### **Coágulos**

Son coloides desestabilizados eléctricamente que pueden juntarse debido a que o existe las fuerzas repulsivas.

### **Coloide**

Partículas sólidas muy pequeñas que tienen carga negativa y un peso ínfimo, que permanecen suspendidas en el agua ya que no se pueden sedimentar. Típicamente tienen entre 0.1 y 0.001 micras de diámetro, necesita de coagulación antes de filtrarse.

**Contaminación**

Es la inclusión de cualquier sustancia física, química, biológica o radiológica que se introduzca al agua y cambie sus características.

**Filtración**

Operación unitaria de separación, que permite separar partículas sólidas que están mezcladas con un fluido al pasar por un medio filtrante.

**pH**

Es una medida de acidez o alcalinidad de una disolución, e indica la concentración de iones de hidrógeno presente en una solución.

**Sedimentación**

Es la separación de las partículas sólidas por efecto de la presión atmosférica. La sedimentación natural es aquella que se realiza con ayuda de la presión atmosférica.

**Sólidos suspendidos totales (SST)**

Son las partículas sólidas no sedimentables que permanecen flotando en el líquido.

**Sólidos totales (ST)**

Es el residuo que permanece luego de la evaporación y secado de una muestra de agua a una temperatura de 105 °C-

**Turbiedad**

Mide la cantidad de materia suspendida en el agua, que causa la dispersión y absorción de los rayos de luz, lo que hace que el agua sea más opaca. Generalmente se reporta en unidades de turbidez nefelométricas (NTU) y se determina por mediciones de dispersión de luz.

**Unidad de turbidez nefelométrica (NTU)**

Utilizada para medir la turbidez en el agua.

**2.4. Estrategia metodológica.**

Por su tipo la investigación propuesta en este plan de tesis es aplicada en tanto busca que dar a conocer que el exceso de aluminio en el agua potable es peligroso para la salud y busca el método para disminuir su concentración eliminando la turbidez con eficiencia. Por su nivel es explicativa y por su diseño es experimental ya que se manipula la variable independiente: Concentración del sulfato de aluminio. La población estuvo conformada por el agua superficial que en verano discurre por el río Ica y la muestra estuvo conformada por 20 litros de esta agua que se llevará al laboratorio para los ensayos correspondientes. El estudio abarca también la determinación y cuantificación de los diversos parámetros que se evalúan en el agua potable.

Para el desarrollo experimental se aplicarán técnicas del análisis químico y el instrumento será el análisis instrumental, el cual permitirá cuantificar la concentración del aluminio. Los

datos obtenidos serán tratados estadísticamente, seleccionados, tabulados, interpretados y discutidos.

## 2.5. Procedimiento experimental.

### TOMA DE MUESTRA.

La toma de muestra se hizo directamente del río Ica, tomándola del centro del caudal para evitar la captación de materiales sólidos que generalmente discurren en las orillas del río, con un balde de plástico al cual se le adaptó un contrapeso para poder introducirlo en las aguas, la extracción se repitió varias veces hasta completar los 20 litros de muestra. El agua colectada se envasó en 4 galoneras de PVC perfectamente limpias y secas, con cierre hermético, en las cuales se trasladó hasta el laboratorio de la Facultad de Ingeniería Química de la Universidad Nacional San Luís Gonzaga de Ica, donde se mantuvo en refrigeración hasta el momento de los análisis y las pruebas correspondientes a la parte práctica de la tesis.

### ANÁLISIS DE LA MUESTRA

Inmediatamente después de tomada la muestra, in situ, se midió el pH del agua, para tener un control de la variación de esta en el recipiente durante el tiempo que esté almacenada, para realizar dicho análisis se utilizó un potenciómetro digital, las mediciones se hicieron por triplicado para minimizar el error. De la misma manera se tomó la temperatura de la muestra recolectada.



Figura 11. Potenciómetro digital con termómetro.

Teniendo en cuenta que el objetivo de la tesis es determinar la concentración de aluminio en el agua superficial con alta carga de arcilla tratada mediante la coagulación y floculación con sulfato de aluminio, las pruebas necesarias para caracterizar el agua se consideraron las siguientes:

- a. Determinación de la temperatura.  
Se toma la temperatura en el lugar del muestreo, se emplea un termómetro de mercurio con escala interna. La temperatura que se registra debe ser tomada considerando que el bulbo del termómetro esté a 25 cm de la superficie del líquido. En el laboratorio la temperatura que se registra se toma de la misma manera en la galonera.
- b. Determinación del pH.  
El método aplicado se usa para la determinación del pH de todo tipo de agua natural, el agua se lleva a  $25^{\circ}\text{C} \pm 1^{\circ}\text{C}$  y se calibra el potenciómetro con tres buffers: pH 4, pH 7 y pH 10, las mediciones se hacen con una precisión de  $\pm 0,01$ . Las lecturas se hicieron después de 30 segundos de haber introducido el electrodo en el agua
- c. Determinación de la conductividad.  
Se empleó un conductímetro calibrado en una solución estándar de cloruro de potasio 0,01M a  $25^{\circ}\text{C}$  (debe dar una conductividad de  $1412\mu\text{S}/\text{cm}$ ) y la lectura fue directa en el agua tomada como muestra que estuvo a  $25^{\circ}\text{C}$ .
- d. Determinación de la dureza  
Método complexométrico, titulando con EDTA 0,01M, empleando negro-cromo T a un pH  $10 \pm 1$
- e. Determinación de sólidos suspendidos Totales (SST)  
Es el material retenido en el papel filtro secado luego a  $103 - 105^{\circ}\text{C}$  hasta peso constante y luego se pesa. Se calcula con la fórmula:  
$$\text{SST en mg/L} = [(A - B) \times 106] / \text{mL (muestra)}$$
  
A = Peso del filtro con el residuo, en g  
B = Peso del medio filtrante, g



Figura 12. Equipo para determinar SST.

f. Determinación de la densidad.

Método del picnómetro. Se determinó la densidad del agua en picnómetro de 25mL a 20°C en un baño a esa temperatura. La densidad se calcula:

$$G1 = M1 - M$$

$$G2 = M2 - M$$

$$D = G1 / G2$$

M1 = Masa del picnómetro con muestra.

M2 = Masa del picnómetro con agua,

M = Masa del picnómetro vacío.

G1 = Masa neta de la muestra problema.

G2 = Masa neta del agua.

d= Densidad relativa del aceite o grasa a temperatura.



Figura 13. Picnómetro para determinar densidad.

g. Determinación de aluminio.

Método volumétrico con 8-hidroxiquinoleína (oxina) modificado.

25mL de la muestra se trata con 125mL de agua a 60°C, se agrega la solución de oxina en exceso, se filtra, se titula con bromato de potasio 0,1N y luego con tiosulfato de sodio 0,1N, empleando almidón hidrosoluble como indicador. El cálculo se hace según la siguiente igualdad:

$$1\text{mL de KBrO}_2 \text{ N} = 0,002249 \text{ mg/L Al}$$

h. Pruebas de jarras.

La prueba de jarras va a permitir evaluar los parámetros que a continuación se detallan:

- a) Identificar el pH óptimo de floculación;
- b) Verificar la dosificación más baja del coagulante en el pH óptimo;
- c) Observar la velocidad de sedimentación de los finos;
- d) Analizar el sobrenadante, verificando principalmente la concentración de aluminio y sólidos suspendidos totales (SST).

Material necesario:

- a) Equipo de Jar-test;
- b) Vaso de precipitados de 1000 mL;
- c) Solución de poliacrilamida superfloc 8500;
- d) Solución de cal a 0,5%;
- e) Pipetas graduadas de 5 y 10 mL.



Figura.10. Equipo para el ensayo de Jar-test

Procedimiento 1

(Considerando que la muestra tenga alcalinidad natural suficiente y tenga también un pH óptimo de floculación).

- a) Poner 6 vasos de precipitados de 1 litro en la plataforma del equipo de Jar-Test;
- b) Llenar con agua bruta hasta los 1000mL;
- c) Conectar el equipo en la velocidad máxima 100 rpm;
- d) Paralelamente agregar en los vasos de precipitados la cantidad de coagulante (sulfato de aluminio) que haya sido calculada para cada vaso;
- e) Dejar agitando por 2 a 3 minutos (tiempo de detención en la cámara de mezcla rápida);

- f) Reducir la velocidad de agitación a 50 rpm por 10 a 30 minutos (tiempo de detención en los floculadores);
- g) Dejar las muestras decantar por 10 a 30 minutos.
- h) Recolectar el sobrenadante de todos los vasos y analizar los parámetros necesarios para determinar cuál presentó mejor resultado;
- i) Normalmente el mejor resultado es el que haya presentado mayor reducción de color y turbidez y se debe elegir esa dosificación.

#### Procedimiento 2

(Cuando la muestra no tiene alcalinidad natural suficiente y el pH óptimo de floculación es desconocido).

- a) Poner 6 vasos de precipitados de 1 litro en la plataforma del equipo de Jar-Test;
- b) Llenar con agua bruta hasta los 1000mL;
- c) Conectar el equipo en la velocidad máxima 100 rpm;
- d) Establecer diferentes pH en los vasos utilizándose álcali (cal hidratada);
- e) Aplicar una cantidad fija de floculante en todos los vasos y repetir los pasos e) a i) del procedimiento 1;
- f) Medir el pH del frasco que haya presentado mejor resultado;
- g) Llevar a cabo nuevo ensayo, fijando en todos los vasos el pH óptimo encontrado en el ítem anterior;
- h) Adicionar sulfato de aluminio en cada vaso, variando la concentración en valores cercanos (menor y mayor) de la dosificación utilizada en la letra e);
- i) Repetir los pasos de e) a i) del procedimiento 1.

#### Notas:

1. Cuando la muestra no tenga alcalinidad natural suficiente, usar cal hidratada u otro álcali para promover una alcalinidad artificial.
2. Cuando el agua no tenga un pH óptimo de floculación, crear esa condición, utilizándose ácidos o bases (álcalis).
3. El álcali más utilizado es la cal hidratada.
4. Normalmente se utiliza floculante a 1% y cal a 0,5% para los ensayos.
5. Las velocidades de agitación, los tiempos de agitación y el tiempo de decantación son dependientes de las dimensiones de las unidades de tratamiento y del vaciamiento de operación.

### III. RESULTADOS

#### 3.1. Resultados del análisis del agua superficial con alta carga de arcilla

Tabla 3.1

Resultados del análisis fisicoquímico

CARACTERÍSTICA	UNIDAD	RESULTADO
Temperatura,	°C	25,3
pH a 20°C	-	7,2
Conductividad a 25°C	μS/cm	1247
Dureza total, como CaCO <sub>3</sub>	mg/L	326
Densidad	g/mL	1,115
Sólidos Suspendidos Totales	mg/L	57,54
Aluminio	mg/L	0,001

Fuente: Datos experimentales

En la tabla 3.1 se reportan los resultados del análisis del agua superficial con alta carga de arcilla como vemos en los análisis se ha considerado como indispensables el análisis de los sólidos suspendidos totales que alcanza los 57,54 mg/L y de la concentración de aluminio que resultó ser 0,001mg/L, siendo el pH a 20°C 7,2, la conductividad 1247 μS/cm y la dureza total como carbonato de calcio 336 mg/L, La temperatura del agua muestreada en este caso fue de 25,3°C

Tabla 3.2

Variación del pH del agua al agregar el  $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$

$\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ , mg/L	pH inicial	pH final
50	7,2	6,5
75	7,2	6,2
100	7,2	5,9
125	7,2	5,6
150	7,2	5,3
175	7,2	4,9
200	7,2	4,5

Fuente: datos experimentales.

La tabla 3.2 muestra los resultados de las pruebas realizadas para determinar la variación del pH del agua cuando se agrega el sulfato de aluminio al agua, esta tiene una reacción ácida mostrándose un significativo descenso del pH, como se observa a mayor concentración de la sal mayor es el descenso del pH, cuando se agrega 200 mg/L de sulfato de aluminio el pH de la solución desciende hasta 4,5, un pH demasiado ácido para el agua potable.

Tabla 3.3

Variación del pH modificado del agua con NaOH al agregar el  $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$

$\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ , mg/L	pH inicial	pH modificado	pH final
50	7,2	8,3	7,9
75	7,2	8,3	7,7
100	7,2	8,3	7,4
125	7,2	8,3	7,1
150	7,2	8,3	6,7
175	7,2	8,3	6,3
200	7,2	8,3	5,8

Fuente: datos experimentales.

Modificador de pH: NaOH

La tabla 3.3 muestra los resultados de las pruebas realizadas para determinar la variación del pH modificado del agua con NaOH, cuando se agrega el sulfato de aluminio al agua, igualmente esta tiene una reacción ácida mostrándose un significativo descenso del pH, como se observa a mayor concentración de la sal mayor es el descenso del pH, cuando se agrega 200 mg/L de sulfato de aluminio el pH de la solución desciende hasta 5,8 un pH aun no aceptable para el agua potable.

Tabla 3.4

Variación del pH modificado del agua con  $\text{CaCO}_3$  al agregar el  $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$

$\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ , mg/L	pH inicial	pH modificado	pH final
50	7,2	8,1	7,7
75	7,2	8,1	7,5
100	7,2	8,1	7,3
125	7,2	8,1	6,9
150	7,2	8,1	6,4
175	7,2	8,1	6,0
200	7,2	8,1	5,5

Fuente: datos experimentales.

Modificador de pH:  $\text{CaCO}_3$

La tabla 3.4 muestra los resultados de las pruebas realizadas para determinar la variación del pH modificado del agua con  $\text{CaCO}_3$ , cuando se agrega el sulfato de aluminio al agua, igualmente esta tiene una reacción ácida mostrándose un significativo descenso del pH, como se observa a mayor concentración de la sal mayor es el descenso del pH, cuando se agrega 200 mg/L de sulfato de aluminio el pH de la solución desciende hasta 5,5 un pH no aceptable para el agua potable.

Tabla 3.5

Variación del pH modificado del agua con CaO al agregar el  $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$

$\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ , mg/L	pH inicial	pH modificado	pH final
50	7,2	8,4	8,1
75	7,2	8,4	7,8
100	7,2	8,4	7,5
125	7,2	8,4	7,2
150	7,2	8,4	6,7
175	7,2	8,4	6,3
200	7,2	8,4	5,8

Fuente: datos experimentales.

Modificador de pH: CaO

La tabla 3.5 muestra los resultados de las pruebas realizadas para determinar la variación del pH modificado del agua con CaO, cuando se agrega el sulfato de aluminio al agua, igualmente esta tiene una reacción ácida mostrándose un significativo descenso del pH, como se observa a mayor concentración de la sal mayor es el descenso del pH, cuando se agrega 200 mg/L de sulfato de aluminio el pH de la solución desciende hasta 5,8 un pH no aceptable para el agua potable.

Tabla 3.6

Remoción de los SST con 50 mg/L de  $Al_2(SO_4)_3$

N°	$Al_2(SO_4)_3$ , mg/L	pH inicial modificado	SST Inicial, mg/L	SST residual, mg/L	SST eliminado, mg/L
01	50	8,4	57,54	49,19	8,35
02	50	8,4	57,54	49,21	8,33
03	50	8,4	57,54	49,23	8,31
04	50	8,4	57,54	49,20	8,34
05	50	8,4	57,54	49,23	8,31
Promedio				49,21	8,33

Fuente: datos experimentales.

Modificador de pH: CaO

La tabla 3.6 muestra los resultados de las pruebas realizadas para eliminar los sólidos suspendidos totales del agua con una alta carga de arcilla empleando el sulfato de aluminio, como se observa con una dosificación de 50 mg/L de sulfato de aluminio se elimina en promedio 8,33mg/L de sólidos suspendidos totales quedando en el agua 49,21 mg/L, de un total de 57,54 mg/L.

Tabla 3.7

Remoción de los SST con 75 mg/L de  $Al_2(SO_4)_3$

N°	$Al_2(SO_4)_3$ , mg/L	pH inicial modificado	SST Inicial, mg/L	SST residual, mg/L	SST eliminado, mg/L
01	75	8,4	57,54	40,36	17,18
02	75	8,4	57,54	40,38	17,16
03	75	8,4	57,54	40,36	17,18
04	75	8,4	57,54	40,34	17,20
05	75	8,4	57,54	40,36	17,18
Promedio				40,36	17,18

Fuente: datos experimentales.

Modificador de pH: CaO

La tabla 3.7 muestra los resultados de las pruebas realizadas para eliminar los sólidos suspendidos totales del agua con una alta carga de arcilla empleando el sulfato de aluminio, como se observa con una dosificación de 75 mg/L de sulfato de aluminio se elimina en promedio 17,18mg/L de sólidos suspendidos totales quedando en el agua 40,36mg/L, de un total de 57,54 mg/L.

Tabla 3.8

Remoción de los SST con 100 mg/L de  $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$

N°	$\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ , mg/L	pH inicial modificado	SST Inicial, mg/L	SST residual, mg/L	SST eliminado, mg/L
01	100	8,4	57,54	31,47	26,07
02	100	8,4	57,54	31,46	26,08
03	100	8,4	57,54	31,47	26,07
04	100	8,4	57,54	31,48	26,06
05	100	8,4	57,54	31,47	26,07
Promedio				31,47	26,07

Fuente: datos experimentales.

Modificador de pH: CaO

La tabla 3.8 muestra los resultados de las pruebas realizadas para eliminar los sólidos suspendidos totales del agua con una alta carga de arcilla empleando el sulfato de aluminio, como se observa con una dosificación de 100mg/L de sulfato de aluminio se elimina en promedio 26,07mg/L de sólidos suspendidos totales quedando en el agua 31,47mg/L, de un total de 57,54 mg/L.

Tabla 3.9

Remoción de los SST con 125 mg/L de  $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$

N°	$\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ , mg/L	pH inicial modificado	SST Inicial, mg/L	SST residual, mg/L	SST eliminado, mg/L
01	125	8,4	57,54	23,65	33,89
02	125	8,4	57,54	23,66	33,88
03	125	8,4	57,54	23,66	33,88
04	125	8,4	57,54	23,64	33,90
05	125	8,4	57,54	23,65	33,89
Promedio				23,65	33,89

Fuente: datos experimentales.

Modificador de pH: CaO

La tabla 3.9 muestra los resultados de las pruebas realizadas para eliminar los sólidos suspendidos totales del agua con una alta carga de arcilla empleando el sulfato de aluminio, como se observa con una dosificación de 125mg/L de sulfato de aluminio se elimina en promedio 33,89mg/L de sólidos suspendidos totales quedando en el agua 23,65mg/L, de un total de 57,54 mg/L.

Tabla 3.10

Remoción de los SST con 150 mg/L de  $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$

N°	$\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ , mg/L	pH inicial modificado	SST Inicial, mg/L	SST residual, mg/L	SST eliminado, mg/L
01	150	8,4	57,54	11,41	46,13
02	150	8,4	57,54	11,43	46,11
03	150	8,4	57,54	11,41	46,13
04	150	8,4	57,54	11,42	46,12
05	150	8,4	57,54	11,42	46,12
Promedio				11,42	46,12

Fuente: datos experimentales.

Modificador de pH: CaO

La tabla 3.10 muestra los resultados de las pruebas realizadas para eliminar los sólidos suspendidos totales del agua con una alta carga de arcilla empleando el sulfato de aluminio, como se observa con una dosificación de 150mg/L de sulfato de aluminio se elimina en promedio 46,12mg/L de sólidos suspendidos totales quedando en el agua 11,42mg/L, de un total de 57,54 mg/L.

Tabla 3.11

Remoción de los SST con 175 mg/L de  $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$

N°	$\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ , mg/L	pH inicial modificado	SST Inicial, mg/L	SST residual, mg/L	SST eliminado, mg/L
01	175	8,4	57,54	3,19	54,35
02	175	8,4	57,54	3,17	54,37
03	175	8,4	57,54	3,17	54,37
04	175	8,4	57,54	3,18	54,36
05	175	8,4	57,54	3,18	54,36
Promedio				3,18	54,36

Fuente: datos experimentales.

Modificador de pH: CaO

La tabla 3.11 muestra los resultados de las pruebas realizadas para eliminar los sólidos suspendidos totales del agua con una alta carga de arcilla empleando el sulfato de aluminio, como se observa con una dosificación de 175mg/L de sulfato de aluminio se elimina en promedio 54,36mg/L de sólidos suspendidos totales quedando en el agua 3,18mg/L, de un total de 57,54 mg/L.

Tabla 3.12

Remoción de los SST con 180 mg/L de  $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$

N°	$\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ , mg/L	pH inicial modificado	SST Inicial, mg/L	SST residual, mg/L	SST eliminado, mg/L
01	180	8,4	57,54	0,29	57,25
02	180	8,4	57,54	0,26	57,28
03	180	8,4	57,54	0,28	57,26
04	180	8,4	57,54	0,28	57,26
05	180	8,4	57,54	0,27	57,27
Promedio				0,28	57,27

Fuente: datos experimentales.

Modificador de pH: CaO

La tabla 3.12 muestra los resultados de las pruebas realizadas para eliminar los sólidos suspendidos totales del agua con una alta carga de arcilla empleando el sulfato de aluminio, como se observa con una dosificación de 180mg/L de sulfato de aluminio se elimina en promedio 57,27mg/L de sólidos suspendidos totales quedando en el agua 0.28mg/L, de un total de 57,54 mg/L.

Tabla 3.13

SST eliminado según la concentración del  $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$

$\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ , mg/L	SST eliminado, mg/L
50	8,33
75	17,18
100	26,07
125	33,89
150	46,12
175	54,36
180	57,27

Fuente: Datos de las tablas 3.6 – 3.12

La tabla 3.13 muestra los resultados comparativos de los ensayos realizados con diferentes concentraciones de sulfato de aluminio y las cantidades de sólidos suspendidos totales (SST) que se eliminan en cada uno de ellos, como se puede observar conforme se aumenta la concentración del sulfato de aluminio, aumenta la cantidad de sólidos suspendidos totales, vemos que con una concentración de 50 mg/L de sulfato de aluminio se eliminan 8,33 mg/L de sólidos suspendidos totales y con 180 mg/L de la sal se eliminan 57,27 mg/L de SST.

Tabla 3.14

SST eliminado y residual según la concentración del  $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$

$\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ , mg/L	SST eliminado, mg/L	SST residual, mg/L
50	8,33	49,21
75	17,18	40,36
100	26,07	31,47
125	33,89	23,65
150	46,12	11,42
175	54,36	3,18
180	57,27	0,28

Fuente: Datos de las tablas 3.6 – 3.12

La tabla 3.13 muestra los resultados comparativos de los ensayos realizados con diferentes concentraciones de sulfato de aluminio y las cantidades de sólidos suspendidos totales (SST) que se eliminan en cada uno de ellos, como se puede observar conforme se aumenta la concentración del sulfato de aluminio, aumenta la cantidad de sólidos suspendidos totales, vemos que con una concentración de 50 mg/L de sulfato de aluminio se eliminan 8,33 mg/L de sólidos suspendidos totales y con 180 mg/L de la sal se eliminan 57,27 mg/L de SST. En el caso de los sólidos suspendidos totales se observa que cuanto mayor es la dosis de sulfato de aluminio menor es la concentración de SST residual; con 180 mg/L de la sal solo queda 0,28 mg/L de SST residual.

Tabla 3,15  
Aluminio en el sobrenadante de la coagulación  
con 50 mg/L de  $Al_2(SO_4)_3$

N°	Al, mg/L
01	4,9
02	4,7
03	4,7
04	4,8
05	4,5
Promedio	4,72

Fuente: Datos experimentales.

La tabla 3.15 muestra los resultados del análisis del agua sobrenadante que resulta después de la coagulación de la muestra con 50 mg/L de  $Al_2(SO_4)_3$ , como se observa en promedio se obtiene una concentración de 4,72 mg/L de aluminio.

Tabla 3,16  
Aluminio en el sobrenadante de la coagulación  
con 75 mg/L de  $Al_2(SO_4)_3$

N°	Al, mg/L
01	4,1
02	3,9
03	3,9
04	4,0
05	4,1
Promedio	4,0

Fuente: Datos experimentales.

La tabla 3.16 muestra los resultados del análisis del agua sobrenadante que resulta después de la coagulación de la muestra con 75 mg/L de  $Al_2(SO_4)_3$ , como se observa en promedio se obtiene una concentración de 4,0 mg/L de aluminio.

Tabla 3,17  
Aluminio en el sobrenadante de la coagulación  
con 100 mg/L de  $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$

N°	Al, mg/L
01	2,9
02	2,8
03	2,8
04	2,9
05	3,0
Promedio	2,9

Fuente: Datos experimentales.

La tabla 3.17 muestra los resultados del análisis del agua sobrenadante que resulta después de la coagulación de la muestra con 100 mg/L de  $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ , como se observa en promedio se obtiene una concentración de 2,9 mg/L de aluminio.

Tabla 3,18  
Aluminio en el sobrenadante de la coagulación  
con 125 mg/L de  $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$

N°	Al, mg/L
01	2,2
02	2,2
03	2,1
04	2,2
05	2,1
Promedio	2,2

Fuente: Datos experimentales.

La tabla 3.18 muestra los resultados del análisis del agua sobrenadante que resulta después de la coagulación de la muestra con 125 mg/L de  $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ , como se observa en promedio se obtiene una concentración de 2,2 mg/L.

Tabla 3,19  
Aluminio en el sobrenadante de la coagulación  
con 150 mg/L de  $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$

N°	Al, mg/L
01	1,6
02	1,7
03	1,7
04	1,8
05	1,7
Promedio	1,7

Fuente: Datos experimentales.

La tabla 3.19 muestra los resultados del análisis del agua sobrenadante que resulta después de la coagulación de la muestra con 150 mg/L de  $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ , como se observa en promedio se obtiene una concentración de 1,7 mg/L de aluminio.

Tabla 3,20  
Aluminio en el sobrenadante de la coagulación  
con 175 mg/L de  $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$

N°	Al, mg/L
01	0,8
02	0,8
03	0,9
04	0,7
05	0,8
Promedio	0,8

Fuente: Datos experimentales.

La tabla 3.20 muestra los resultados del análisis del agua sobrenadante que resulta después de la coagulación de la muestra con 175 mg/L de  $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ , como se observa en promedio se obtiene una concentración de 0,8 mg/L de aluminio.

Tabla 3,21  
Aluminio en el sobrenadante de la coagulación  
con 180 mg/L de  $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$

N°	Al, mg/L
01	0,4
02	0,5
03	0,4
04	0,4
05	0,4
Promedio	0,4

Fuente: Datos experimentales.

La tabla 3.21 muestra los resultados del análisis del agua sobrenadante que resulta después de la coagulación de la muestra con 180 mg/L de  $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ , como se observa en promedio se obtiene una concentración de 0,4 mg/L de aluminio.

Tabla 3,22  
Aluminio en el sobrenadante de la coagulación  
con diversas concentraciones de  $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$

$\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ , mg/L	Al, mg/L
50	4,7
75	4,0
100	2,9
125	2,2
150	1,7
175	0,8
180	0,4

Fuente: Datos experimentales.

La tabla 3.22 muestra la variación de la concentración de aluminio en el agua sobrenadante, que resulta de la coagulación del agua superficial con alta carga de arcillas empleando sulfato de aluminio. La variación del contenido de aluminio va desde los 4,72 mg/L con 50 mg/L de sulfato de aluminio hasta 0,4 mg/L con 180 mg/L.

## V. DISCUSIÓN

La arcilla en el agua superficial durante las épocas de lluvia llega como resultado del lavado de los terrenos arcillosos y su presencia es muy diversa, desde el punto de vista granulométrico, prevaleciendo las partículas finísimas, las cuales son considerados dentro de las partículas coloidales con las mismas propiedades eléctricas de carga negativa que les impide acercarse unas a otras para formar partículas más grandes que puedan sedimentar y de esa manera liberar al agua de la turbidez. En las plantas de tratamiento de aguas superficiales destinadas al consumo humano se emplean compuestos químicos que permiten cambiar esta condición, entre ellas las que más aplicación tienen son los compuestos de aluminio y hierro, que reciben el nombre específico de coagulantes, sustancias que tienen la función de desestabilizar la carga eléctrica de los coloides permitiendo que estos puedan aglutinarse en torno a una carga positiva formando coágulos que poco a poco se constituyen como flóculos más grandes y pesados que son fáciles de separar ya sea por sedimentación natural, filtración o cualquier otro medio físico de separación.

Sin embargo, el uso de estos coagulantes debe hacerse desde el punto de vista químico, de manera controlada basándose principalmente en el pH y la concentración del coagulante, que para el caso de esta tesis es el sulfato de aluminio. Las aguas que contienen mucha arcilla son de color marrón de diversas tonalidades, las cuales dependen de la concentración y el tipo de material suspendido. La necesidad de eliminarlo en muchos casos exige el empleo de una dosificación mayor del coagulante y como resultado de ello el agua sobrenadante (agua límpida, transparente que queda sobre los sólidos que se sedimentan en el fondo del reservorio o recipiente en el cual se lleva a cabo el proceso de coagulación-floculación) resulta con una alta concentración de aluminio que según la norma nacional no debe de superar el 0,2 mg/L.

El diseño de la parte experimental de esta tesis considera el estudio de los factores que involucran el correcto uso y dosificación del sulfato de aluminio para evitar un exceso de este reactivo en el agua potable. Se han realizado ensayos para establecer el pH más efectivo bajo el cual se debe agregar el sulfato de aluminio, teniendo en cuenta que este reactivo produce una reacción ácida con el agua, lo que se evidencia al agregarlo al agua y midiendo el pH que inicialmente fue de 7,2 desciende hasta 4,5 al adicionarse el modificador de pH CaO, por otro lado se sabe que el pH adecuado para que el sulfato de aluminio trabaje con mayor eficiencia en la coagulación de coloides requiere que el medio acuoso donde se encuentre disuelto, este a un pH entre 5,5 y 7,5, de esta manera también se puede controlar las concentraciones de aluminio. Al modificar el pH con el óxido de calcio se logra que el descenso de este llegue a 5,8 debido a ello cuando se agrega el sulfato de aluminio en dosis entre 150 y 180 mg/L, se logra un máximo de precipitación de los sólidos suspendidos totales.

El análisis químico del agua sobrenadante que resulta de la coagulación floculación indica la presencia de aluminio en cantidades que sobrepasan largamente el límite máximo permitido para el aluminio que según DIGESA debe ser de 0,2 mg/L. La adición de óxido de calcio para lograr un pH máximo de 8,3 permitió que al agregar sulfato de aluminio hasta 180 mg/L coagular la máxima cantidad de partículas de arcilla formando flóculos que fácilmente son separados, estando dentro del rango de precipitación del aluminio el cual según se ha comprobado es muy amplio que va desde valores 5,5 hasta un valor de 12 formando hidróxido. Su capacidad para formar hidróxidos en tan amplio rango permite ejercer de manera eficiente su efecto coagulante y por otro lado ser precipitado en casi su totalidad cuando se le emplea bajo rangos que son bajos de pH. Estos resultados obtenidos son muy similares a los reportados por A. La Rosa “El hidróxido de aluminio en medio ácido se disuelve formando el ion ( $\text{Al}^{3+}$ ) y que este a su vez se hidrata formando el ion  $[(\text{Al}(\text{H}_2\text{O})_6)]^{3+}$  a valores de  $\text{pH} < 7$ . En medio básico el aluminio forma el ion aluminato ( $\text{AlO}_2^-$ ) y que este a su vez se encuentra hidratado formando los siguientes iones:  $[\text{Al}(\text{OH})_4]^-$  o  $[\text{Al}(\text{OH})_4(\text{H}_2\text{O})_2]^-$  y  $[\text{Al}(\text{OH})_6]^{3-}$ , ha valores de pH entre 8 - 11. Se ha comprobado experimentalmente que el aluminio ( $\text{Al}^{3+}$ ) puede precipitar en forma de hidróxidos ( $\text{Al}(\text{OH})_3$ ) en medio neutro a valores de pH entre 7-8, mediante la reacción:  $2\text{Al}^{3+} + 3\text{H}_2\text{SO}_4 + 3\text{Ca}(\text{OH})_2 + 3\text{O}^{2-} \rightarrow 2\text{Al}(\text{OH})_3 + 3[\text{Ca}(\text{SO}_4)] + 3\text{H}_2\text{O}$  pH (7 - 8) Se ha comprobado que el aluminio que se encuentra en medio básico formando el ion ( $\text{AlO}_2^-$ ), puede precipitar en forma de hidróxido a un exceso de pH, ha valores de  $\text{pH} > 12$  mediante la siguiente reacción:  $(\text{AlO}_2^-) + 3\text{OH}^- + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{Al}(\text{OH})_3 + \text{H}_2\text{O}$  pH (>12)” [5].

## V. CONCLUSIONES

1. Se concluye que la concentración de sulfato de aluminio influye en la calidad del agua potable obtenida a partir del agua superficial con alta carga de arcilla, ya que el aluminio trabaja en un amplio rango de pH que va desde 5,5 hasta 12, dentro de los cuales puede precipitar como hidróxido y coagular los coloides y arcillas, permitiendo su decantación, pero, quedando retenido en el líquido sobrenadante sobre todo a pH altos, superiores a 7,5.
- Se concluye que es posible optimizar el efecto del sulfato de aluminio, a fin de disminuir su dosificación en el tratamiento de la turbidez del agua, controlando el pH del agua tratada en un pH entre 5,5 y 7,5, adicionando a la solución óxido de calcio con el fin de que el pH no descienda por debajo de los 5,5 debido a la reacción ácida de esta sal con el agua, haciendo que bajo esas condiciones la capacidad coagulante del reactivo sea mayor, tal como se ha demostrado que con una dosis de 160 mg/L de sulfato de aluminio a un pH 5,8 se logra coagular toda la arcilla de la muestra tratada.
- La concentración promedio del aluminio en el agua potable que contenía una alta carga de arcilla, es no mayor a 4 mg/L y no menor de 0,4 mg/L dependiendo del pH en el cual se esté trabajando. Según este estudio a mayor pH hay mayor concentración de aluminio en el agua tratada.

## **VI. RECOMENDACIONES**

1. Se recomienda hacer ensayos con aguas que contengan un variado contenido de arcillas de manera separada a fin de verificar los datos que se han obtenido en el presente estudio, comprobando al mismo tiempo el comportamiento del sulfato de aluminio hidrato con diferentes cantidades de moléculas de agua.
2. Se recomienda hacer ensayos con volúmenes mayores de agua con un alto contenido de arcillas para verificar la validez de las condiciones experimentales bajo las cuales se ha llevado estos estudios.

## VII. FUENTES DE INFORMACIÓN.

- [1] R. Trejo y V. Hernández. “Riesgos a la salud por presencia del aluminio en el agua potable”. Artículo Revista Conciencia Tecnológica. 2004; (25): [fecha de Consulta 31 de marzo de 2024]. ISSN: 1405-5597. Disponible en:  
<https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=94402508>
- [2] M. Barquero, R. Vargas y R. Blanco, “Neurotoxicidad y enfermedades óseas provocadas por la contaminación con aluminio de soluciones de diálisis renal”, Artículo  
Revista Costarricense Científica Médica vol.22 n.3-4 San José De Costa Rica, 2001
- [3] J. Claros, “Efectos del polihidroxiclورو de aluminio, velocidad de agitación y pH en la turbidez del agua del río Shullcas- Huancayo, 2013. Tesis de doctorado, Universidad Nacional del Centro del Perú, 2015.
- [4] R. Vásquez, “Optimización del coagulante sulfato de aluminio en el tratamiento de potabilización del agua de la planta de Chota Cajamarca”, Tesis de grado, Universidad Nacional Pedro Ruíz Gallo, Lambayeque, 2018
- [5] A. La Rosa, “Gestión de efluentes, tratamiento de aguas ácidas y precipitación de aluminio y manganeso en la planta de tratamiento de la Empresa Minera de Yanacocha”, Tesis de grado, Universidad Nacional de Ingeniería, 2017.
- [6] R. Ramírez, A. Durán, A. Martínez, “Proceso de Coagulación Floculación para el tratamiento de aguas residuales: desarrollo y utilización de nuevos compuestos para la reducción de lodos” Tesis de grado, Universidad de Ambato, Ecuador, 2015
- [7] F. Martínez, “Tratamiento de aguas residuales industriales mediante electrocoagulación y coagulación convencional”, Universidad Castilla de la Mancha, Cuenca. Ecuador, 2018.

## ANEXOS

### Anexo 1

#### LMP de parámetros de calidad organoléptica

Parámetros	Unidad de medida	Límite máximo permisible
1. Olor	---	Aceptable
2. Sabor	---	Aceptable
3. Color	UCV escala Pt/Co	15
4. Turbiedad	UNT	5
5. pH	Valor de pH	6,5 a 8,5
6. Conductividad (25°C)	$\mu\text{mho/cm}$	1 500
7. Sólidos totales disueltos	$\text{mg L}^{-1}$	1 000
8. Cloruros	$\text{mg Cl}^{-} \text{ L}^{-1}$	250
9. Sulfatos	$\text{mg SO}_4^{-} \text{ L}^{-1}$	250
10. Dureza total	$\text{mg CaCO}_3 \text{ L}^{-1}$	500
11. Amoniaco	$\text{mg N L}^{-1}$	1,5
12. Hierro	$\text{mg Fe L}^{-1}$	0,3
13. Manganeso	$\text{mg Mn L}^{-1}$	0,4
14. Aluminio	$\text{mg Al L}^{-1}$	0,2
15. Cobre	$\text{mg Cu L}^{-1}$	2,0
16. Zinc	$\text{mg Zn L}^{-1}$	3,0
17. Sodio	$\text{mg Na L}^{-1}$	200

UCV = Unidad de color verdadero

UNT = Unidad nefelométrica de turbiedad

## Anexo 2

HDSM\_0297



### HOJA DE SEGURIDAD

#### PRODUCTO

**SULFATO DE ALUMINIO TIPO A**

#### 1. IDENTIFICACIÓN DEL PRODUCTO QUÍMICO

<b>NOMBRE DEL PRODUCTO:</b>	Sulfato de Aluminio tipo A.
<b>PROCEDENCIA:</b>	Turquía
<b>VIGENCIA DEL PRODUCTO:</b>	3 años en las condiciones de almacenamiento indicadas.
<b>APLICACIÓN:</b>	Sal inorgánica utilizada principalmente como agente coagulante y floculante primario en el tratamiento de aguas de consumo humano, agua de piscinas aguas residuales. Se caracteriza por agrupar los sólidos suspendidos en el agua y acelerar la sedimentación, contribuyendo a la disminución de la carga bacteriana, así como la remoción del color y sabor.

#### 2. COMPOSICIÓN/ INFORMACIÓN DE LOS COMPONENTES

<b>DESCRIPCIÓN QUÍMICA:</b>	Sulfato de Aluminio
<b>Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>:</b>	17% Min.
<b>NÚMERO CAS:</b>	10043-01-3
<b>EINECS/ELINCS:</b>	233-135-0

#### 3. IDENTIFICACIÓN DE LOS PELIGROS

##### RESUMEN PARA CASOS DE EMERGENCIA:

¡PRECAUCIÓN! PUEDE CAUSAR IRRITACION A LOS OJOS, PIEL Y EL TRACTO RESPIRATORIO. ES HIGROSCOPICO (ABSORBE LA HUMEDAD DEL AIRE) SE ESPERA SUPONGA UN PELIGRO LEVE DURANTE LA USUAL MANIPULACIÓN INDUSTRIAL.

##### EFFECTOS POTENCIALES A LA SALUD:

###### INGESTIÓN

La ingestión de grandes cantidades puede causar irritación gastrointestinal. Se espera suponga leve daño por ingestión.

###### CONTACTO CON LOS OJOS

El polvo puede causar irritación mecánica.



## HOJA DE SEGURIDAD

### PRODUCTO

**SULFATO DE ALUMINIO**

#### **INHALACIÓN**

Puede causar irritación al tracto respiratorio. Peligro leve durante la usual manipulación industrial.

#### **CONTACTO CON LA PIEL**

Puede causar irritación a la piel. Peligro leve durante la usual manipulación industrial.

#### **EXPOSICIÓN CRÓNICA**

No hay información disponible.

### 4. MEDIDAS DE PRIMEROS AUXILIOS

#### **INGESTIÓN**

Si la víctima está consciente y alerta de 2-4 vasos de agua. No provocar el vómito. Nunca dar nada por la boca a una persona inconsciente. De atención médica inmediatamente.

#### **CONTACTO CON LOS OJOS**

Lave los ojos y párpados con abundante agua por lo menos 15 minutos. Levantando los párpados superior e inferior ocasionalmente. Acudir al médico inmediatamente.

#### **INHALACIÓN**

Saque a la víctima al aire fresco. Si no respira, de respiración artificial. Si la respiración es dificultosa, suministre oxígeno. De atención médica inmediatamente.

#### **CONTACTO CON LA PIEL**

Lave inmediatamente con agua por al menos 15 minutos. Mientras retira la ropa y zapatos contaminados. De atención médica si la irritación se desarrolla o persiste. Lavar la ropa antes de reutilizar.

### 5. MEDIDAS PARA EXTINCIÓN DE INCENDIOS

#### **INFORMACIÓN GENERAL**

Como en cualquier incendio, utilizar equipo respiratorio independiente con demanda de presión MSHA/NIOSH (Aprobado o equivalente) y equipo protector completo.

#### **RIESGOS ESPECIALES DE INCENDIO**

No combustible. En caso de incendio se desprenden gases tóxicos e irritantes (SO<sub>x</sub>)

#### **MEDIO DE EXTINCIÓN**

Usar spray de agua, químico seco, dióxido de carbono ó espuma apropiada.

## HOJA DE SEGURIDAD

### PRODUCTO

**SULFATO DE ALUMINIO**

## 6. MEDIDAS DE DESCARGAS Y DERRAMES

### METODO DE LIMPIEZA O RECOGIDA

Recoger el producto en un recipiente de seguridad de acero inoxidable o de plástico para su posterior recuperación, cumpliendo con las medidas de protección personal (apartado 8). Lavar los restos no recuperables con abundante agua.

### PRECAUCIONES MEDIOAMBIENTALES

Evitar la entrada del producto en el alcantarillado, o en aguas superficiales o subterráneas. El sulfato de aluminio se destina a potabilización y depuración de aguas; se trata de un producto no tóxico ni peligroso.

### PRECAUCIONES PERSONALES

Utilizar equipo de protección, evitando la inhalación, el contacto con la piel y los ojos. Usar guantes de PVC, gafas de protección y botas impermeables. Limitar la intervención a personal calificado provisto de las protecciones adecuadas. Ver apartado 8.

## 7. MANIPULACIÓN Y ALMACENAMIENTO

### MANIPULACIÓN

Evitar el contacto directo con el producto. Observar las medidas de protección personal previstas en el punto 8, respetando siempre las reglas generales de seguridad e higiene industrial.

No mezclar con materiales incompatibles.

### ALMACENAMIENTO

Evitar su almacenaje próximo a productos incompatibles. El producto tiene carácter ácido por lo que se evitará el contacto con otros productos que tengan carácter básico, al contacto con lejías cloradas puede descomponerlas liberando gases clorados.

Conservar a temperatura ambiente y protegido de la humedad para garantizar su calidad.

Productos incompatibles: acero galvanizado, Al, Cu, Zn y aleaciones de estos metales.

En contacto con metales es muy corrosivo y se desprende hidrogeno en el proceso de ataque que puede ser explosivo mezclado con aire.

### ENVASES

Resistentes a ácidos: acero revestido, acero inoxidable, plásticos (PE y PP).

## HOJA DE SEGURIDAD

### PRODUCTO

**SULFATO DE ALUMINIO**

## 8. CONTROLES DE EXPOSICIÓN / EQUIPO DE PROTECCIÓN PERSONAL

### CONTROLES DE INGENIERÍA

Utilizar ventilación adecuada para mantener concentraciones bajas del producto en el aire.

### LIMITES DE EXPOSICIÓN

Nombre Químico	ACGIH	NIOSH	OSHA – Final PELs
Sulfato de Aluminio	2 mg/m <sup>3</sup> TWA (como Al) (listado como sales solubles de aluminio)	2 mg/m <sup>3</sup> TWA (como Al) (listado como sales solubles de aluminio)	No listado

### PROTECCIÓN PARA LOS OJOS

Utilice gafas protectoras adecuadas o gafas de seguridad para químico como se describe en la protección de ojos y cara de acuerdo al OSHA's (Reglamento 29 en CFR1910.133) o Estándar Europeo EN 166.

### PROTECCIÓN RESPIRATORIA

Seguir el reglamento de respirador OSHA que se encuentra en 29 CFR 1910.134 o el Standard Europeo EN 149. Utilizar los respiradores aprobados por NIOSH/MSHA o el estándar Europeo EN 149 si se exceden los límites de exposición, o si se experimentan irritación u otros síntomas.

### PROTECCIÓN PARA LA PIEL

Usar guantes protectores adecuados para prevenir la exposición de la piel.

Usar vestimenta protectora adecuada para prevenir la exposición de la piel.

## 9. PROPIEDADES FÍSICAS Y QUÍMICAS

Nombre Químico	Sulfato de Aluminio
Sinónimos	Sulfato de Aluminio Tipo A, Tipo 1
Formula Molecular	Al <sub>2</sub> (SO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub> ·14H <sub>2</sub> O
Apariencia	Sólido en grano- polvo blanco ó ligeramente beige

## HOJA DE SEGURIDAD

### PRODUCTO

### SULFATO DE ALUMINIO

Solubilidad en agua	70 g en 100g de agua a 20°C
Solubilidad en otros disolventes	Insoluble o parcialmente soluble en disolventes orgánicos.
Densidad aparente	1.00 g/cc
Olor	Inodoro
Sabor	Astringente y ligeramente dulce
pH	3.0 – 3.6 al 1% solución
Peso Molecular:	342.1358 g/mol
Gravedad Específica /Densidad:	2.7 (Agua=1)
Temperatura de descomposición	85°C
Punto de inflamación	El producto no es inflamable
Granulometría:	0 – 1 mm
Otros datos	Producto higroscópico. Se apelmaza en contacto con la humedad o por el calor.

### 10. ESTABILIDAD Y REACTIVIDAD

**Estabilidad:**

Estable bajo condiciones normales de presión y temperatura. Higroscópico: absorbe humedad o agua del aire.

**Condiciones a Evitar:**

Generación de polvo, exposición al agua o a la humedad.

**Incompatibilidades:**

No se han identificado incompatibilidades importantes con materiales y contaminantes comunes.

**Productos Peligrosos de Descomposición:**

Óxidos de azufre, óxido de aluminio

## HOJA DE SEGURIDAD

### PRODUCTO

**SULFATO DE ALUMINIO**

### 11. INFORMACIÓN TOXICOLÓGICA

LD50 /LC50	Test de Draize, conejo, ojo: 10mg/24H Severo
	Oral, ratón: LD50=6207 mg/kg
Efectos locales:	Irritante para la piel , ojos y vías respiratorias
Efectos específicos	Mutágenos: aberraciones cromosómicas en Lymphocytes humans in vitro: Negativo.
	Cancerígenos: no se ha observado ningún efecto cancerígeno en animales.

### 13. INFORMACIÓN ECOLÓGICA

Ecotoxicidad: En organismos acuáticos	CE 50 (Daphnia: daphnia magna)/24 h: 13 mg/l CL 50 (Peces-Brachydanio rerio)/24 h: 26 mg/l como Al
Bioacumulación	No bioacumulable
Degradabilidad	Abiótica. En el medio ambiente acuático se transforma en productos poco solubles.

### 12. CONSIDERACIONES SOBRE LA DISPOSICIÓN DEL PRODUCTO

Los residuos y envases contaminados deben ser tratados de acuerdo con las leyes y regulaciones oficiales vigentes.

Los residuos del producto se deben entregar a un gestor autorizado.

### 14. INFORMACIÓN DE TRANSPORTE

#### Transporte por tierra

USDOT

Mercancía no peligrosa según los criterios de la reglamentación del transporte

#### Transporte marítimo por barco

IMDG

Mercancía no peligrosa según los criterios de la reglamentación del transporte



## HOJA DE SEGURIDAD

### PRODUCTO

**SULFATO DE ALUMINIO**

#### Transporte aéreo

IATA/ICAO

Mercancía no peligrosa según los criterios de la reglamentación del transporte

### 15. INFORMACIÓN REGLAMENTARIA

#### RECOMENDACIONES DE SEGURIDAD:

**Frases R:** R41: Riesgo de causar serios daños en los ojos

R36/37/38: Irrita los ojos, la piel y las vías respiratorias

**Frases S:** S22: No respirar el polvo

S26: En caso de contacto con los ojos, lavar inmediatamente con abundante agua y consultar al médico.

S28: En caso de entrar en contacto con la piel, lavar inmediatamente con abundante agua.

S37/39: Utilizar guantes apropiados y un sistema de protección de ojos/cara.

### 16. INFORMACIÓN ADICIONAL

La información de esta hoja de seguridad de producto fue obtenida de fuentes serias y es digna de confianza, sin embargo no constituye garantía tácita, ni explícita.

Las condiciones de manejo, uso almacenamiento y disposición están más allá de nuestro control y conocimiento por esta razón, QUÍMICOS GOICOCHEA S.A.C. no asume responsabilidad, ni implicaciones por pérdidas, daños, lesiones o gastos debidos al manejo, almacenamiento, uso o disposición de este producto.

No se entiende ninguna garantía concerniente a la adecuación del producto para el fin particular del usuario. El usuario debe aplicar su propio criterio para determinar si el producto es adecuado o no para sus fines.



## HOJA DE SEGURIDAD

**PRODUCTO**

**SULFATO DE ALUMINIO**

EN CASO DE EMERGENCIA COMUNICARSE:	
<b>TELÉFONOS</b>	01-6144400 Anexos: 125/128
<b>CORREOS</b>	<a href="mailto:producción@quimicosgoicochea.com">producción@quimicosgoicochea.com</a> <a href="mailto:operaciones@quimicosgoicochea.com">operaciones@quimicosgoicochea.com</a>
<b>FECHA DE CREACION</b>	01/06/2017
<b>FECHA DE REVISION</b>	01/06/2017