

**UNIVERSIDAD NACIONAL DEL CALLAO  
FACULTAD DE INGENIERIA QUIMICA**

**UNIDAD DE INVESTIGACION DE INGENIERIA QUIMICA**



**INFORME FINAL**

**“ADECUACIÓN DE LOS MÉTODOS FOTO FENTON Y  
QUÍMICO PARA LA REDUCCIÓN DE DQO Y SULFATOS DE  
AGUAS RESIDUALES DE COLORANTES NATURALES”**

SONIA ELIZABETH HERRERA SANCHEZ

CALLAO, 2021  
PERU

*Sonia*

Ames

## **DEDICATORIA**

A mis padres que están en el cielo y a mis hermanos por su amor y comprensión

Al MSc. Sixto Felipe Meza por sus conocimientos en el tratamiento de aguas residuales

A handwritten signature in blue ink, appearing to read "Alvaro", is located in the bottom left corner of the page.

## **AGRADECIMIENTO**

Mi agradecimiento a la Facultad Ingeniería Química de la Universidad Nacional por facilitarme el uso de los materiales, equipos y las instalaciones del laboratorio de Química y microbiología para el desarrollo del presente trabajo de investigación.

A handwritten signature in blue ink, appearing to read "Alvarado", located at the bottom left of the page.

<b>INDICE</b>	
INDICE DE TABLA	3
INDICE DE FIGURAS	4
RESUMEN	5
ABSTRACT	6
INTRODUCCIÓN	7
<b>I. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA</b>	<b>8</b>
1.1 Descripción de la realidad problemática	8
1.2 Formulación del problema	9
1.2.1 Problema general	9
1.2.2 Problema específico	9
1.3 Objetivos	10
1.3.1 Objetivo general	10
1.3.2 Objetivo específico	10
1.4 Limitaciones de la investigación	10
<b>II. MARCO TEÓRICO</b>	<b>12</b>
2.1 Antecedentes	12
2.1.1 Antecedentes internacionales	12
2.1.2 Antecedentes nacionales	17
2.2 Bases teórico	20
2.3 Conceptual	33
2.4 Definición de términos básicos	41
<b>III. HIPÓTESIS Y VARIABLES</b>	<b>43</b>
3.1 Hipótesis	43
3.1.1. Hipótesis general	43
3.1.2 Hipótesis específica	43
3.2 Definición conceptual de variables	43
3.2.1 Operacionalización de variables	44
<b>IV. DISEÑO METODOLÓGICO</b>	<b>45</b>
4.1 Tipo y diseño de la investigación	45
4.2 Método de investigación	45

4.3 Población y muestra	56
4.4 Lugar de estudio y periodo de desarrollo	57
4.5 Técnicas e instrumentos para la recolección de la información	57
4.6 Análisis y procesamiento de datos	57
<b>V. RESULTADOS</b>	<b>58</b>
5.1 Resultados descriptivos	58
5.2 Resultados inferenciales	60
5.3 Otro tipo de resultados estadístico	61
<b>VI. DISCUSION DE RESULTADOS</b>	<b>62</b>
6.1 Contratación y demostración de la hipótesis con los resultados	62
6.2 Contratación de los resultados con otros estudios similares	66
6.3 Responsabilidad ética	66
CONCLUSIONES	67
RECOMENDACIONES	68
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	69
ANEXOS	72

## INDICE DE TABLAS

Tabla 1	Características del agua residual	8
Tabla 2	Clasificación de las industrias según el tipo de contaminante generado	21
Tabla 3	Tecnología avanzada de oxidación.	22
Tabla 4	Comparación de los métodos de tratamiento SAVMIN y CERS	30
Tabla 5	Clasificación de tratamiento de agua	32
Tabla 6	Parámetros de reducción DQO y Sulfatos en aguas residuales no domesticas	32
Tabla 7	Composición química de la semilla de achiote	36
Tabla 8	Composición nutricional de la semilla del achiote	37
Tabla 9	Composición del pigmento de achiote	39
Tabla 10	Rendimiento extractivo del colorante natural de achiote a escala laboratorio	41
Tabla 11	Operacionalización de variables	44
Tabla 12	Formulación de agua de procesos de características similares a las que se generan en planta de colorantes naturales	50
Tabla 13	Resultados de la caracterización de agua residual de colorantes naturales y similares	58
Tabla 14	Resultados experimentales del diseño Box Behnken	59
Tabla 15	Resultados de DQO al ingreso y salida del tratamiento	60
Tabla 16	Resultados de sulfatos al ingreso y salida del tratamiento	60
Tabla 17	Diseño experimental optimizado	63

## INDICE DE FIGURAS

Figura 1 Esquema del cristal de etringita.	14
Figura 2 Estabilidad de la etringita en ambientes alcalinos	15
Figura 3 Proceso de eliminación de sulfato mediante precipitación con etringita disolviendo etringita y reciclando $Al^{3+}$ en condiciones de pH bajo	17
Figura 4 Precipitación de sulfato con cal	25
Figura 5 Diagrama de flujo proceso SAVMIN.	26
Figura 6 Bixa Orellana L	33
Figura 7 Ácido cis-polieno monometiléster dicarboxílico	34
Figura 8 Estructura de la norbixina	34
Figura 9 Secuencia de las actividades realizadas para obtener el colorante	39
Figura 10 Diagrama de bloques del proceso de extracción de 10 Kg/lote	40
Figura 11 Extracción de los colorantes	40
Figura 12 Etapa de la Investigación	46
Figura 13 Curva de calibración en el espectrómetro para determinar concentración del colorante	48
Figura 14 Curva de calibración en el espectrómetro para determinar sulfatos	49
Figura 15 Muestra de agua de proceso de características similares a las que se generan en plantas de colorantes naturales	50
Figura 16 Recuperación del colorante por regulación de pH en solución a un medio ácido	51
Figura 17 Precipitación empleado de Oxido de Calcio	53
<i>Figura 18 Reacción usando <math>CaO</math> y <math>Al(OH)_3</math></i>	55
Figura 19 Equipo Hach para determinar DQO	56
Figura 20 Grafico Optimizado	65



## RESUMEN

El objetivo de este trabajo de Investigación consistió en aplicar los métodos foto Fenton y químico para reducir los valores máximos admisibles de DQO y sulfatos de las aguas residuales de colorantes naturales.

Se trabajó con aguas residuales de colorantes naturales en sus características físicas pH=11,9; T°C 24,9 DQO=1,000 mg O<sub>2</sub>/L) y sulfatos 18 000 mg/L en comparación con los efluentes industriales pH:11,3; T°C 25,3 y DQO:2 500 mg O<sub>2</sub>/L; Sulfatos 8 000 mg/L.

Se determinó las condiciones con óptimas del proceso de tratamiento foto Fenton cuya relación reactivos Fenton fue de 18,8 (mg H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>/mg Fe<sup>+2</sup>)/L y pH=3 en medio ácido y tiempo de tratamiento=5h e intensidad de radiación -UV (4 Watts) y para el reducir el contenido de (SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>) de las aguas residuales después del tratamiento químico se trabajó con pH óptimos: 12 tiempo de residencia: 45 minutos y la Dosificación de agente precipitante: 45,5/L g CaO y 24,8 g/L Al(OH)<sub>3</sub>. Se aplicó un diseño experimental Box Benhken para optimizar el proceso.

Por lo que se concluye que la adecuación de los los métodos foto Fenton y químico son los adecuados para reducir los Valores Máximos Admisibles - VMA de DQO y (SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>) de las aguas residuales de colorantes naturales logrando reducir un DQO de 1000 mg O<sub>2</sub>/L a <7 mg O<sub>2</sub>/L y Sulfatos de 18 000 mg/L a 800 mg/L cumpliendo con los VMA establecidas en el D.S 010-2019-Vivienda y se puede descargar a la red de alcantarillado sin ningún problema. Lo cual demuestra según la prueba de hipótesis que los VMA se reduce las DQO y Sulfatos.

**Palabras clave:** Agua residual de colorantes naturales, metodo foto fenton, metodo quimico, precipitación, Diseño de experimentos, Demanda Química de Oxígeno, Sulfatos.

## ABSTRACT

The objective of this research work consisted of applying the photo Fenton and chemical methods to reduce the maximum admissible values of COD and sulphates from the wastewater of natural colorants.

We worked with wastewater of natural colorants in its physical characteristics pH = 11.9; T ° C 24.9 COD = 1,000 mg O<sub>2</sub> / L) and sulfates 18,000 mg / L compared to industrial effluents pH: 11.3; T ° C 25.3 and COD: 2,500 mg O<sub>2</sub> / L; Sulfates 8,000 mg / L.

Optimum conditions of the photo Fenton treatment process were determined, whose Fenton reagent ratio was 18.8 (mg H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> / mg Fe + 2) / L and pH = 3 in an acid medium and treatment time = 5h and radiation intensity - UV (4 Watts) and to reduce the (SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>) content of the wastewater after chemical treatment, the optimum pH was used: 12 residence time: 45 minutes and the dosage of precipitating agent: 45.5 / L g CaO and 24.8 g / L Al (OH) <sub>3</sub>. A Box Benhken experimental design was applied to optimize the process.

Therefore, it is concluded that the adequacy of the photo Fenton and chemical methods are adequate to reduce the Maximum Admissible Values - VMA of COD and (SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>) of the wastewater of natural colorants, reducing a COD of 1000 mg O<sub>2</sub> / L a <7 mg O<sub>2</sub> / L and Sulfates from 18,000 mg / L to 800 mg / L complying with the AMV established in DS 010-2019-Housing and can be discharged to the sewer network without any problem. Which shows according to the hypothesis test that VMA reduces COD and Sulfates.

**Key Word:** Waste water from natural colorants, photo Fenton method, chemical method, precipitation, Design of experiments, Chemical Oxygen Demand, Sulfates

## INTRODUCCIÓN

La contaminación de las aguas es uno de los problemas que afecta al desarrollo de la vida en el planeta desde hace décadas, tal situación ha motivado al Ministerio de Vivienda a publicar el D.S 010-2019-Vivienda, Decreto Supremo que aprueba el Reglamento de Valores Máximos Admisibles (VMA) para las descargas de aguas residuales no domésticas en el sistema de alcantarillado sanitario. Dicha norma define como agua residual no doméstica la descarga de líquidos producidos por alguna actividad económica comercial e industrial, distinta a la generada por los usuarios domésticos, quienes descargan aguas residuales domésticas como producto de la preparación de alimentos, del aseo personal y de desechos fisiológicos. Actualmente se han desarrollado diversos métodos para el tratamiento de aguas residuales inclusive se usan métodos combinados dependiendo del tipo de agua residual y su procedencia.

En el presente trabajo de investigación se tuvo como objetivo adecuar los métodos foto Fenton y químico para reducir a los Valores Máximos Admisibles - VMA de DQO y ( $\text{SO}_4^{2-}$ ) de las aguas residuales de colorantes naturales.

Para ello se usó el método de precipitación química para reducir los sulfatos presentes en el agua residual y la adición de hidróxido de aluminio ( $\text{Al}(\text{OH})_3$ ) y sulfúrico, el método foto Fenton para el tratamiento del DQO. se controlaron las condiciones óptimas del proceso de tratamiento como la relación reactivos Fenton, valores máximos de intensidad de radiación solar, concentración de COPs medidos en DQO

## I. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

### 1.1 Descripción de la realidad problemática

En la industria alimentaria de obtención de colorantes naturales y el uso de insumos químicos para su proceso hace que se generen compuestos contaminantes en las aguas residuales como sulfatos, DQO y otros que son dañinos para el medio ambiente y que sobre pasan los valores máximos admisibles –VMA de la legislación vigente. (D.S 010-19-Vivienda)

**Tabla 1**

*Características del agua residual*

<b>Parámetro</b>	<b>(mg/L)</b>
Caudal nominal (m <sup>3</sup> /día)	50
DBO <sub>5</sub>	4 182
DQO	10 840
SST	200
pH	2,48
NT	1 804
N-NH <sub>4</sub>	1 504
P-PO <sub>4</sub>	3 938

Fuente: Lopotegui; J. *et al*; (2005).

Existen diversos métodos para tratar estos efluentes líquidos como son los procesos de precipitación por coagulación, tratamiento electroquímico, adsorción en lechos de carbón activado, procesos de oxidación química, procesos de oxidación fotoquímica en fase homogénea, procesos de oxidación fotoquímica en fase heterogénea, etc.

El objetivo de todos estos procesos es fraccionar las moléculas grandes (de alto peso molecular) en otras más pequeñas (de bajo peso molecular), y así sucesivamente hasta una mineralización total de estas sustancias que

consiste en degradarlo principalmente a dióxido de carbono, agua y otras sustancias simples.

Todas estas soluciones presentan ventajas y desventajas entre sí; sin embargo, los procesos de foto degradación solar poseen características únicas que pueden considerarse ventajas comparativas como presentar una oxidación completa de sustancias orgánicas, ser efectivos en sustancias no biodegradables, uso de la radiación UV y visible como fuente de energía, además de no generar residuos que posteriormente deban ser desechados.

En tal sentido, consideramos que, uno de los aspectos fundamentales en el proceso de tratamiento de aguas residuales que contengan sustancias orgánicas provenientes de colorantes naturales., es el emplear un el método químico y foto Fenton que permita reducir el DQO. Y para sulfatos se usara el método químico precipitación con agente precipitante adecuado.

Se espera que la ejecución de este trabajo contribuya con el desarrollo de un sistema a escala piloto para el tratamiento de efluentes industriales del sector alimentario.

## **1.2 Formulación del problema**

### **1.2.1 Problema general**

¿En cuánto la adecuación de los métodos foto Fenton y químico reducirán a los Valores Máximos Admisibles - VMA de DQO y sulfatos ( $\text{SO}_4^{2-}$ ) de las aguas residuales de colorantes naturales?

### **1.2.2 Problema específico**

- ¿Qué características físico químicas presentan las aguas residuales de colorantes naturales?
- ¿Cuáles son los parámetros óptimos que permiten reducir el contenido de ( $\text{SO}_4^{2-}$ ) de las aguas residuales de colorantes naturales después del tratamiento químico?

- ¿Cuáles son los parámetros que permiten reducir el DQO de las aguas residuales después del tratamiento foto Fenton?

### **1.3 Objetivos**

#### **1.3.1 Objetivo general**

Adecuar los métodos foto Fenton y químico para reducir a los Valores Máximos Admisibles - VMA de DQO y ( $\text{SO}_4^{2-}$ ) de las aguas residuales de colorantes naturales.

#### **1.3.2 Objetivo específico**

- Caracterizar las aguas residuales residuales de colorantes naturales.
- Determinar los parámetros óptimos que permite reducir el contenido de ( $\text{SO}_4^{2-}$ ) de las aguas residuales después del tratamiento químico.
- Determinar los parámetros óptimos que permite reducir el contenido de DQO de las aguas residuales después del tratamiento foto Fenton.
- 

### **1.4 Limitaciones de la investigación**

El presente trabajo de investigación se justifica debido a que las empresas industriales que generas aguas residuales no domesticas están obligadas a realizar un tratamiento antes de verter a la red de alcantarillado no doméstico en cumplimiento de las normas legales vigentes para evitar multas y ser responsables con el medio ambiente.

#### **- Teórica**

Actualmente se presentan ciertas limitantes porque el trabajo demanda de la disponibilidad de equipos y reactivos especiales para lograr los objetivos de investigación

#### **- Temporal**

La presente investigación desarrollada es de tipo experimental, y se ha planificado su ejecución en un periodo de doce meses

- **Espacial**

La presente investigación pertenece al área de medio ambiente debido a que propone alternativas de tratamiento para el cumplimiento de los Valores Máximos Admisibles (VMA).

## II. MARCO TEÓRICO

### 2.1 Antecedentes

#### 2.1.1 Antecedentes Internacionales

Barrios-Ziolo *et al.*, (2015). Los colorantes y pigmentos están comenzando a ser considerados en el país como compuestos que pueden presentar características toxicológicas más allá de los aspectos estéticos en las aguas residuales. El estado del arte presenta los tratamientos más efectivos para la remoción, destrucción y mineralización de colorantes y pigmentos presentes en aguas residuales en función de las propiedades fisicoquímicas de las moléculas constituyentes. Las cinéticas de remoción de DBO<sub>5</sub>, DQO, color "real" y "aparente" en los efluentes, además de los tiempos de operación, fueron estudiadas para determinar el conjunto de tecnologías físicas, químicas, biológicas y combinadas de mayor importancia e influencia en la actualidad. Entre las tecnologías de tratamiento más relevantes se destacan los procesos de adsorción y filtración, las tecnologías avanzadas de oxidación (fotocatálisis, ozonación, fenton/UV, electrocoagulación, etc) y los procesos biológicos secuenciales (del tipo anaerobio - aerobio). Se evidenció la influencia de variables como el pH, la concentración inicial del colorante y la solubilidad, entre otras, sobre las cinéticas de remoción de colorantes específicos.

Tolonen *et al.*, (2016) estudiaron la presencia de sulfato, nitrato, aluminio, sodio y calcio. Especiación calculada con software MINEQL a pH 12,5 según los resultados del modelo, el 71% del sulfato podría ser eliminado con precipitación como etringita. Hasta el 99% del aluminio y el 73% del calcio estaría en forma sólida como etringita y el resto permanecería en forma líquida.

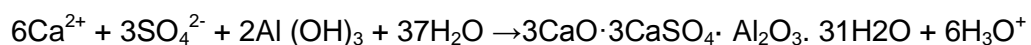
Payes (2017) utilizó el método de extracción por lixiviación por medio de maceración dinámica con álcali acuoso, ya que de acuerdo a las referencias es el que proporciona los mayores rendimientos. Dentro de las observaciones destacan.



- Se procesaron semillas de achiote lo más frescas posibles postcosecha, con humedad menor al 10 %.
- En el proceso de secado se trabajó a temperatura por debajo de los 70 °C para evitar la degradación de la bixina.

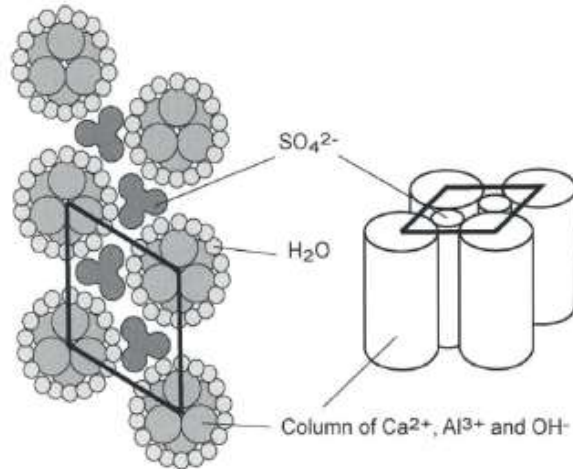
Germishuizen, *et al.*,(2018) han desarrollado varias tecnologías para tratar el drenaje ácido de minas (AMD) y la atención se está desplazando hacia la eliminación de sulfato. La formación de etringita, un mineral de sulfato de aluminio y calcio hidratado, es una opción para tratar la AMD y puede reducir la concentración de sulfato muy por debajo de las especificaciones de descarga. El proceso modelado en este estudio incluye la formación de etringita y la recuperación de gibbsita mediante la descomposición de etringita reciclada. El modelado de este proceso se realizó utilizando PHREEQC y los resultados presentados en este documento se basan en el resultado de diferentes estudios de caso que investigaron cómo el proceso se ve afectado por un cambio en los parámetros. Estos incluyen, cambiar el pH del agua de alimentación, alterar las fracciones divididas en el hidrociclón para la recuperación de la gibbsita y variar el pH para la formación de etringita.

en el trabajo ilustraron en la Figura 1 el esquema del cristal de etringita y sus columnas paralelas consisten en  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Al}^{3+}$  y  $\text{OH}^-$  unidades estructuradas de  $[\text{Ca}_6\text{Al}_2(\text{OH})_{12} \cdot 24\text{H}_2\text{O}]^{6+}$  (Sapsford *et al.*, 2015). Los canales entre estas columnas son compuesto de  $\text{SO}_4^{2-}$  y agua (Damons y Petersen, 2002). La reacción de precipitación de etringita está dada por el siguiente reacción (Smit, 1999):



## Figura 1

### Esquema del cristal de etringita



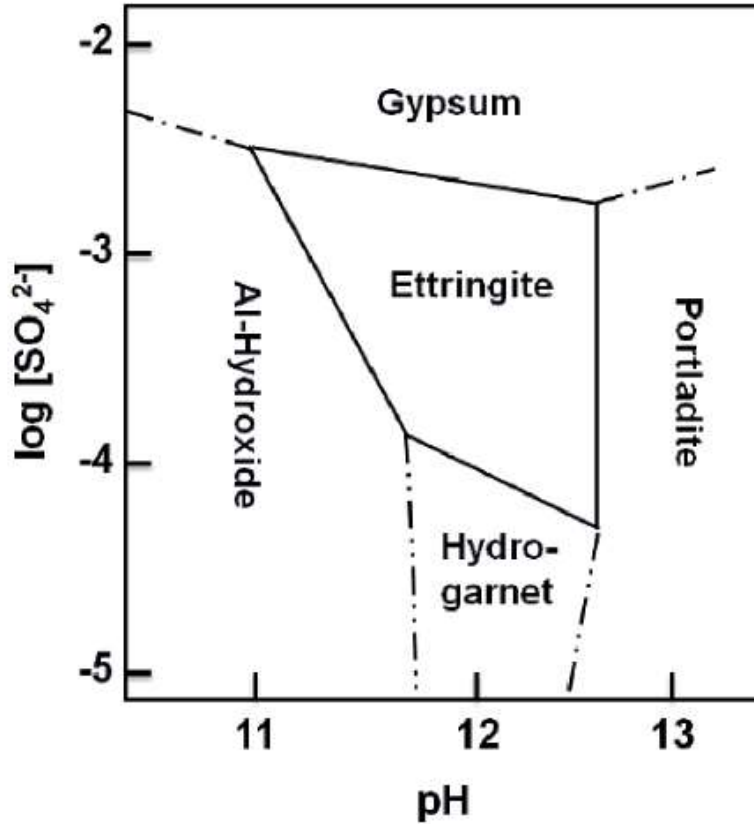
Fuente: Germishuizen (2018)

La etringita es estable por encima de un pH de 10,7; por lo tanto, se agrega cal para asegurar las condiciones óptimas para la precipitación de etringita. La etringita puede ser estable a valores de pH <10,7; sin embargo, esto solo ocurre en asociación con yeso e hidróxido de aluminio ( $\text{Al}(\text{OH})_3$ ) y la etringita se disuelve completamente alrededor de un pH casi neutro. La Figura 2 muestra la región de estabilidad de la etringita en ambientes alcalinos. La formación de etringita requiere que el aluminio esté presente como la especie anfótera  $\text{Al}(\text{OH})_4^-$ , y a un pH por debajo de 10,3, el aluminio existe predominantemente como hidróxido de aluminio amorfo (gibbsita). Por lo tanto, la estabilidad de la formación de etringita depende del pH.

El enfoque clave de la simulación de este proceso es proporcionar una tecnología de tratamiento de etringita que potencialmente pueda ser una solución factible para tratar la AMD e identificar parámetros importantes del proceso.

**Figura 2**

*Estabilidad de la etringita en ambientes alcalinos.*



Fuente: Germishuizen (2018)

Ping *et al.*, (2018). Se evaluó la viabilidad de la eliminación de iones sulfato de las aguas residuales FGD alcalinas de sodio utilizando el método de precipitación de etringita. Factores que afectan la eliminación de iones sulfato, como la dosis de  $\text{NaAlO}_2$ , la dosis de  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ , la temperatura de la solución, los aniones ( $\text{Cl}^-$ ,  $\text{NO}_3^-$  y  $\text{F}^-$ ) e iones de metales pesados ( $\text{Mg}^{2+}$  y  $\text{Mn}^{2+}$ ), se investigaron y se determinaron las condiciones experimentales óptimas para la eliminación de iones sulfato. Los resultados experimentales indican que el método de precipitación de etringita puede eliminar eficazmente el  $\text{SO}_4^{2-}$  con una eficiencia de eliminación de más del 98%. Todos los factores investigados influyen en la eliminación de iones sulfato y, entre ellos, la dosis de reactivos, la temperatura de la solución y los

iones fluoruro tienen la mayor influencia. Además, el método puede eliminar de forma sinérgica los iones de metales pesados y  $F^-$  con eficiencias de eliminación de más del 90% y 99%, respectivamente; mientras tanto,  $Cl^-$  y  $NO_3^-$  también pueden eliminarse mínimamente por el método. El resultado del tratamiento real de aguas residuales muestra que el método es factible para tratar aguas residuales de alta concentración de sulfato. El método de precipitación de etringita tiene el potencial de ser una aplicación comercial en el futuro.

Xiaoce *et al.*, (2019) desarrollaron un nuevo proceso de eliminación de sulfatos a través de la precipitación de etringita disolviendo etringita y recirculando  $Al^{+3}$  en condiciones de bajo pH.

Efectos de las relaciones sólidos a líquidos, pH y temperatura sobre la disolución de etringita, la recuperación y transformación de los precipitados de Al fueron investigados mediante experimentos por lote.

La condición óptima para la recuperación de Al es pH=3,0, sólido suspendido de 9,8 g/L y temperatura inferior a 303 °K.

La disolución de etringita consiste de dos etapas:

(i) disolución rápida pero inconsistente con la liberación más rápida de sulfato, seguida de calcio, y entonces  $Al(OH)_6^{3-}$

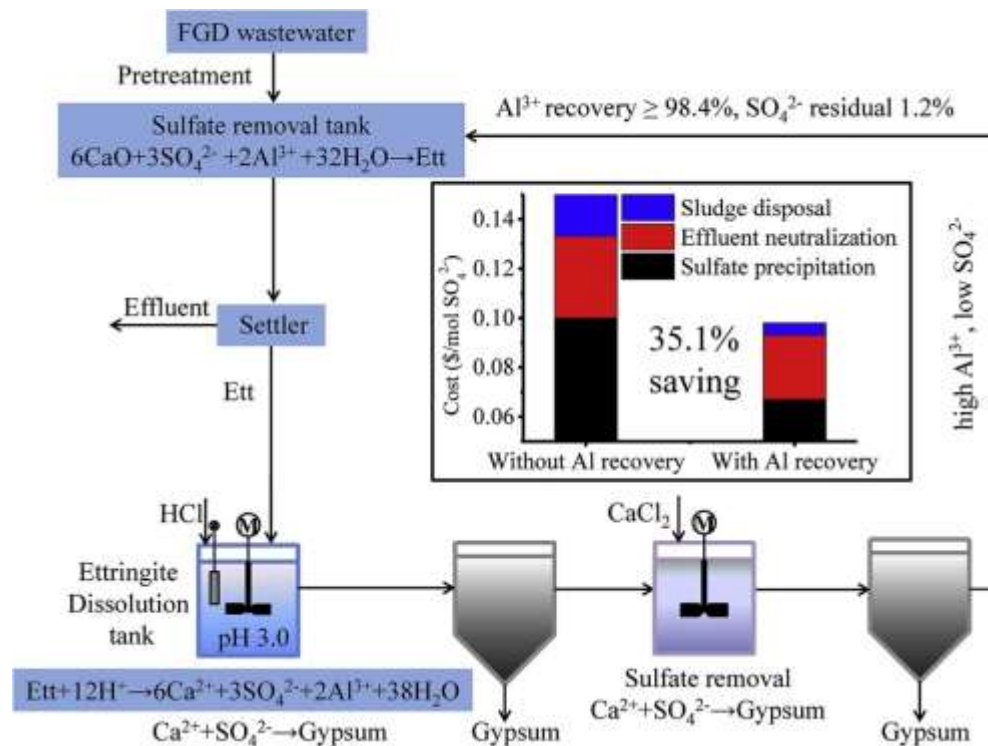
(ii) disolución lenta de  $Al(OH)_6^{3-}$  precipitación de núcleo y yeso.

Disolución de  $Al(OH)_6^{3-}$  núcleo sigue la cinética de primer orden con una energía de activación de 41,18 kJ /mol, mientras que la reprecipitación de yeso sigue la cinética de segundo orden con energía de activación de 26,36 kJ / mol. Resultados a largo plazo de sistemas a escala piloto para el tratamiento de las aguas residuales de desulfuración de gases de combustión reales mostró que el proceso logró la eliminación de sulfatos de 98,3% –99,5% y recuperación de Al por encima de 98,4%, y convirtió 98,8% de sulfato en etringita a  $CaSO_4$ , lo que resultó en 66,0% de reducción de lodo y mejora de la capacidad de deshidratación de lodo. La evaluación económica muestra que el proceso con recuperación de Al reduce el costo

de la precipitación de etringita en un 35,1%, y es altamente factible y rentable para aplicación industrial de tratamiento de aguas residuales con alto contenido de sulfato.

**Figura 3**

*Proceso de eliminación de sulfato mediante precipitación con ettringita disolviendo ettringita y reciclando  $Al^{3+}$  en condiciones de pH bajo*



Fuente: (Xiaoce *et al.*, 2019).

### 2.1.2 Antecedentes Nacionales

Herrera (2015). Realizo la investigación sobre Detoxificación fotocatalítica solar para la reducción de niveles de concentración de compuestos orgánicos persistentes de aguas residuales textiles encontrando los siguientes resultados de DQO (1,139 mg  $O_2/L$  inicial y después del tratamiento 270,50 mg  $O_2/L$ ), que representa en la reducción del 76% .

Morales (2016) define que la remoción de sulfatos constituye uno de los principales problemas en el tratamiento de efluentes de diferentes sectores industriales como el minero-metalúrgico, energético, químico, entre otros, debido a su alta solubilidad en el agua e ineficiencia de los tratamientos existentes para su remoción. Los tratamientos convencionales controlan la precipitación química de los sulfatos utilizando cal, sin embargo, no son aceptables debido a la rápida saturación del yeso en el agua dejando al efluente con una concentración de sulfatos superior a los estándares de calidad ambiental (ECA Categoría III). La precipitación química de la etringita es uno de los tratamientos más efectivos logrando altos porcentajes de remoción hasta los valores establecidos en la legislación ambiental vigente. El presente trabajo de investigación ha desarrollado el tratamiento de la precipitación química de la etringita como alternativa de remoción de sulfatos la cual se lleva a cabo mediante la reacción del anión sulfato  $\text{SO}_4^{2-}$  con los iones aluminato  $\text{Al}(\text{OH})_4^-$  y calcio  $\text{Ca}^{2+}$  en medio básico. Se realizaron pruebas experimentales utilizando cal y poli-cloruro de aluminio (PAC) como insumos químicos, la celda de flotación Denver como tecnología de agitación y un efluente proveniente de un ciclo combinado como materia prima. Se analizaron las principales variables operacionales que influyen en este proceso: la tasa másica de PAC:  $\text{SO}_4^{2-}$  y la concentración de CAL (ppm), obteniéndose altos porcentajes de remoción del 91.2% a una tasa másica de PAC:  $\text{SO}_4^{2-}$  de 7 y a una concentración de CAL de 4320 ppm en un tiempo de 15 minutos.

Salazar y Ortega (2018) determinaron la degradación de la materia orgánica aplicando el proceso fotofenton. Para esto emplearon muestras de agua residual textil provenientes de un laboratorio químico de prácticas en procesos de ingeniería textil. En el proceso se empleó un catalizador de  $\text{Fe}_2\text{SO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$  (300, 400 y 500 mg/L) y un agente oxidante de  $\text{H}_2\text{O}_2$  (1,5; 2,5 y 3,5 mL/L). El tratamiento se llevó a cabo en un reactor fotocatalítico tubular espiral concéntrico a un pH igual a 2,8. Al cabo de una hora, se logró

remover un 98,23% de DBO y 98,12% de DQO, partiendo con una concentración inicial de 1017 mg/L y 2777 mg/L de DBO y DQO respectivamente.

Enríquez (2020). determino la necesidad de la implementación de una Planta de Tratamiento de Aguas Residuales Industriales, que reduzca los parámetros como DBO<sub>5</sub>, DQO, Sólidos Suspendidos Totales, Sulfatos y Aluminio, de los efluentes líquidos industriales de una planta agroindustrial de producción de colorantes naturales a partir de la cochinilla; los factores del manejo de agua residual industrial considerados fueron: controlar el efluente de aguas residuales industriales, que fue un compromiso asumido en el instrumento de gestión ambiental; la generación de agua residual industrial corresponde al aspecto ambiental más importante dentro de la gestión ambiental que debe asumir la empresa; que en la actualidad se cometen delitos ambientales debido al vertimiento de estas aguas residuales, generando perjuicios económicos importantes a la empresa como consecuencia de las multas. Luego de los análisis de la calidad de agua residual industrial se determina que en algún momento parámetros como demanda bioquímica de oxígeno, demanda química de oxígeno, sólidos totales en suspensión, sulfato y aluminio superan largamente los establecidos por los valores máximos admisiones (VMA). Al analizar las posibilidades técnicas y económicas, además considerando la opinión de gerentes, jefes y operarios se cree factible la construcción e instalación de una planta de tratamiento de aguas residuales (PTARI)

Ortega y Chancafe (2021) determinaron la remoción de la materia orgánica y fosfatos mediante la aplicación del tratamiento fotolítico, tratamiento de cultivo de microalga usando *Chlorella* sp y el tratamiento combinado fotolítico con cultivo de microalgas. Para esto emplearon muestras de agua residual de la planta de tratamiento de aguas residuales Puca Puca, Ayacucho-Perú.

La experiencia se llevó a cabo a nivel laboratorio empleando un fotorreactor con lámpara uv para el proceso de fotólisis y un conjunto de biorreactores iluminados con lámpara led e inyectados con aire y dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) para el cultivo de microalgas. Teniendo como referencia la caracterización del agua residual (fosfatos, oxígeno disuelto, demanda química y bioquímica de oxígeno igual a 6,8 mg/L, 1,6 mg/L, 226 mg/L y 93 mg/L respectivamente) antes de los tratamientos fotoquímicos y biológicos. Se determinó que con el tratamiento fotolítico se logró reducir la materia orgánica en 67% y 76,55% para la demanda química de oxígeno (DQO) y la demanda bioquímica de oxígeno (DBO) respectivamente y 13,24% para los fosfatos. Con el tratamiento de cultivo de microalgas usando *Chlorella* sp la reducción de materia orgánica fue de 47,55% y 59,78% de DQO y DBO respectivamente y 41,18% para los fosfatos. Finalmente, para el tratamiento combinado de fotólisis con cultivo de microalgas la reducción de materia orgánica fue de 40,68% y 54,60% de DQO y DBO respectivamente y 33,82% para los fosfatos. Luego de la aplicación de los diversos tratamientos, los resultados demuestran que, el tratamiento fotolítico reduce en mayor porcentaje a la materia orgánica y el tratamiento con cultivo de microalgas a los fosfatos.

## **2.2 Bases teóricas**

### **Clasificación de las aguas residuales industriales**

Las aguas residuales industriales en base al The European Pollutant Emission Register, se clasifican de acuerdo a la Tabla 2



**Tabla 2***Clasificación de las industrias según el tipo de contaminante generado*

<b>Contaminantes</b>	<b>Tipo de Industria</b>
Orgánicos halogenados (AOX)	Instalaciones para la producción de pasta de papel (86%)
Bromuro de difeniléter	Instalaciones para pretratamiento de fibras o textiles (100%)
Fenoles	Productos químicos orgánicos de base (47%) Refinerías de petróleo y de gas (23%) Industrias del metal e instalaciones de calcinación y sinterización de minerales metálicos (11%)
Hexaclorobenceno (HCB)	Productos químicos orgánicos de base (~90%)
Hexaclorobutadieno (HCBD)	
Hexaclorociclohexano (HCH)	
Hidrocarburos aromáticos policíclicos (PAH)	Tratamiento de superficies con disolventes orgánicos (33%) Refinerías de petróleo y de gas (27%) Industrias del metal e instalaciones de calcinación y sinterización de minerales metálicos (21%) Productos químicos orgánicos de base (13%)
Pentaclorofenol (PCP)	Industrias del metal e instalaciones de calcinación y sinterización de minerales metálicos (100%)
Perfluorocarburos (PFC)	Industrias del metal e instalaciones de calcinación y sinterización de minerales metálicos (82%) Tratamiento de superficies con disolventes orgánicos (43%) Industrias del metal e instalaciones de calcinación y
Tetracloroetileno (PER)	Tratamiento de superficies con disolventes orgánicos (43%) Industrias del metal e instalaciones de calcinación y sinterización de minerales metálicos (26%) Productos químicos orgánicos de base (12%) Productos químicos inorgánicos de base o fertilizantes (12%)
Tetraclorometano (TCM)	Productos químicos orgánicos de base (93%)

Fuente: The European Pollutant Emission Register (S/A)

La aplicación de un método u otro depende fundamentalmente de la concentración del contaminante y del caudal de efluente. Determinadas técnicas, como la incineración y algunos tratamientos de oxidación, son utilizables sólo cuando la concentración de compuestos orgánicos es

elevada, mientras que otras, como la adsorción y los procesos de oxidación avanzada, son útiles en efluentes con baja concentración de contaminante (Andreozzi, 1999).

### **Procesos de Oxidación avanzada de tratamiento de aguas residuales**

Los procesos de oxidación avanzada (PAO's) se pueden definir como procesos que implican la formación de radicales hidroxilo ( $\text{OH}^\bullet$ ) de potencial de oxidación ( $E= 2.8 \text{ V}$ ) mucho mayor que el de otros oxidantes tradicionales (ozono, 2.07 Voltios; peróxido de hidrógeno (agua oxigenada), 1.78 Voltios; dióxido de cloro, 1.57 V, y cloro, 1.36 V). Estos radicales son capaces de oxidar compuestos orgánicos principalmente por abstracción de hidrógeno o por adición electrofílica a dobles enlaces generándose radicales orgánicos libres ( $\text{R}^\bullet$ ) que reaccionan a su vez con moléculas de oxígeno formando un peroxiradical, iniciándose una serie de reacciones de degradación oxidativa que pueden conducir en algunos casos a la completa mineralización de los contaminantes. Los métodos de oxidación avanzada se resumen en la tabla 3.

**Tabla 3**

#### *Tecnologías avanzadas de oxidación*

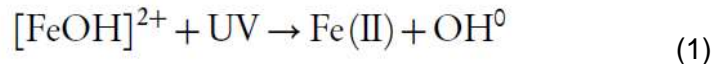
Tecnologías avanzadas de oxidación	
No Fotoquímicos	Fotoquímicos
- Ozonización en medio alcalino	- Oxidación en agua sub/y supercrítica
- Ozonización con peróxido de hidrógeno	- Procesos fotoquímicos
- Procesos Fenton y relacionados	- Fotólisis del agua en el ultravioleta de vacío
- Radiólisis $\gamma$ y tratamiento con haces de electrones	- UV/ peróxido de hidrógeno
- Oxidación electroquímica	- UV/ $\text{O}_3$
- Plasma no térmico	- <b>Foto-Fenton y relacionadas</b>
- Descarga electrohidráulica – Ultrasonido	- Fotocatálisis heterogénea

Fuente: Domenech *et al.*, 2001.

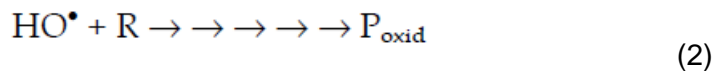
## Procesos de tratamiento foto Fenton

En los últimos años, el proceso de oxidación avanzada (AOP) ha recibido más atención para la eliminación de contaminantes recalcitrantes en agua y aguas residuales. Estos procesos se basan en la producción de radicales hidroxilo ( $\text{OH}^\circ$ ) con potencial redox alta. Uno de los problemas comunes de todos los procesos de oxidación avanzada es la energía eléctrica requerida para la producción de fotones con fuentes de luz artificial.

En el proceso foto-Fenton se emplea  $\text{H}_2\text{O}_2$ ,  $\text{Fe}^{+2}$  y radiación UV. En este proceso,  $\text{OH}^\circ$  es producido en presencia de iones ferrosos ( $\text{Fe}^{+2}$ ) y peróxido de Hidrógeno como reactivos reductores y oxidantes, respectivamente. Un aumento en la velocidad de degradación del contaminante se puede atribuir a la oxidación de Fe (III) a Fe (II) por la radiación UV. La producción de  $\text{OH}^\circ$  de acuerdo con el siguiente mecanismo:



En términos generales, el AOP es un método eficiente con el medio ambiente en el cual el  $\text{OH}^\circ$  se utiliza para oxidar los contaminantes orgánicos recalcitrantes y si es posible convertirlos en productos finales inocuos como  $\text{CO}_2$  y el agua:



Los procesos Fenton y foto-Fenton tienen una importancia significativa debido a su alta velocidad en la eliminación de materiales contaminantes y se pueden emplear para el tratamiento de aguas residuales, especialmente textil y aguas residuales de tintura.

Varios estudios han aplicado el proceso foto Fenton para la eliminación de materias orgánicas a partir de soluciones acuosas:

Mahmoodi *et al.* (2008). Demostraron que 89% del colorante azo ácido en su estudio se eliminó usando el proceso de foto-Fenton.

Otro estudio indicó que el proceso de foto-Fenton elimina 99% de ácido húmico de soluciones acuáticas (Biglari, *et al*; 2013).

Kang *et al.* (2002) demostraron que más del 96% del colorante en su estudio fue retirado de las aguas residuales textiles por el proceso de foto-Fenton.

Ebrahiem *et al.* (2013). Informaron de que 95% de los contaminantes orgánicos en su investigación fueron retirados de las aguas residuales industriales con el proceso.

Ay *et al.* (2009) demostraron que el proceso de foto-Fenton elimina el 100% del colorante azo rojo.

## **Procesos de tratamientos Químicos**

### **Remoción de Sulfatos**

Sulfato es un anión importante que está presente en aguas naturales y aguas residuales. En comparación con metales tóxicos, sulfato es sólo ligeramente peligroso; por lo tanto, muchos países no tienen directrices establecidas para el sulfato en agua potable. Sin embargo, el sulfato puede afectar el sabor del agua y puede tener efectos laxantes en concentraciones por encima de 600 mg/L. Por lo tanto, las agencias ambientales de muchos países han establecido valores máximos que varían entre 250 y 500 mg/L para efluentes industriales. Cuando no hay límite para el sulfato, es común definir los límites de los sólidos totales disueltos (TDS).

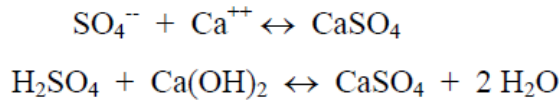
Concentraciones elevadas de sulfatos en efluentes industriales pueden conducir a problemas de los cuales el más serio es la corrosión de alcantarillas de concreto como resultado de la formación de  $H_2S$  que luego forma  $H_2SO_4$ . El  $H_2S$  también crea problemas de formación de olores desagradables.

Métodos establecidos para la eliminación de sulfatos incluyen siguientes:

- (I) El tratamiento biológico con bacterias reductoras de sulfato;
- (II) Tecnologías de sorción, incluyendo la membrana (Osmosis Inversa, Electrodialisis) y el intercambio de iones (Resinas de Intercambio de Iones) y
- (III) Precipitación química como yeso, sulfato de bario o etringita ( $Ca_6Al_2(SO_4)_3(OH)_{12} \cdot 26H_2O$ ).

## Métodos de precipitación química

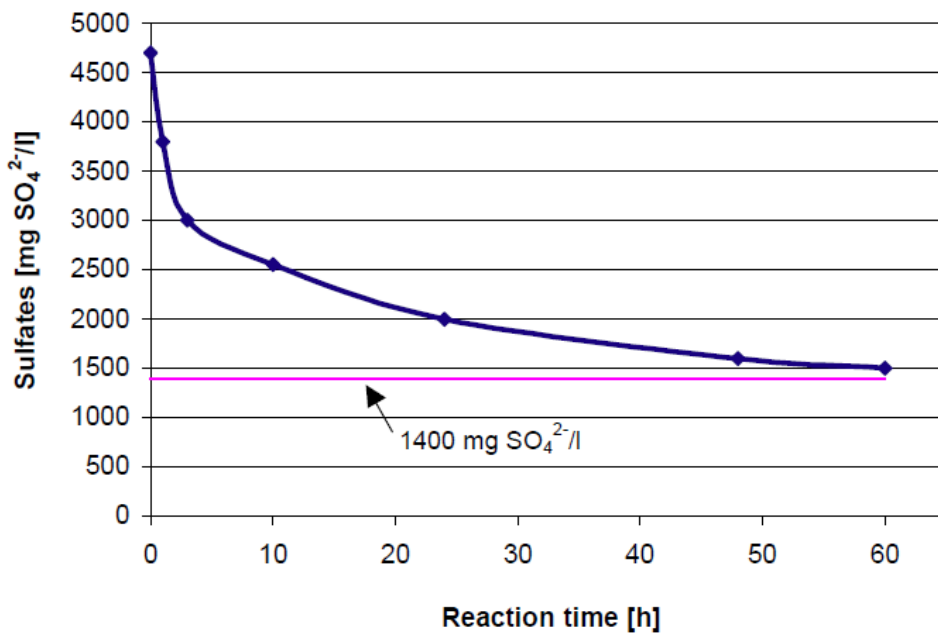
La precipitación de sulfatos con cal da la formación de sulfato de calcio por la reacción:



El sulfato de calcio es relativamente soluble. A 20 °C su solubilidad en agua es 1990 mg/L, esto es 1404 mg de sulfato por litro como puede verse en la figura 4. Generalmente el pH debe estar sobre 8 y relativamente tiempo de reacción largo es requerido y después de 60 horas de reacción el resultado de solubilidad es cercano al límite teórico

### Figura 4

*Precipitación de sulfato con cal*



Fuente: Suschka & Przywara, 2003

En la práctica la presencia de otras impurezas (iones) hace que la cantidad de sulfato remanente en el sistema sea más elevado con respecto a la solubilidad límite.

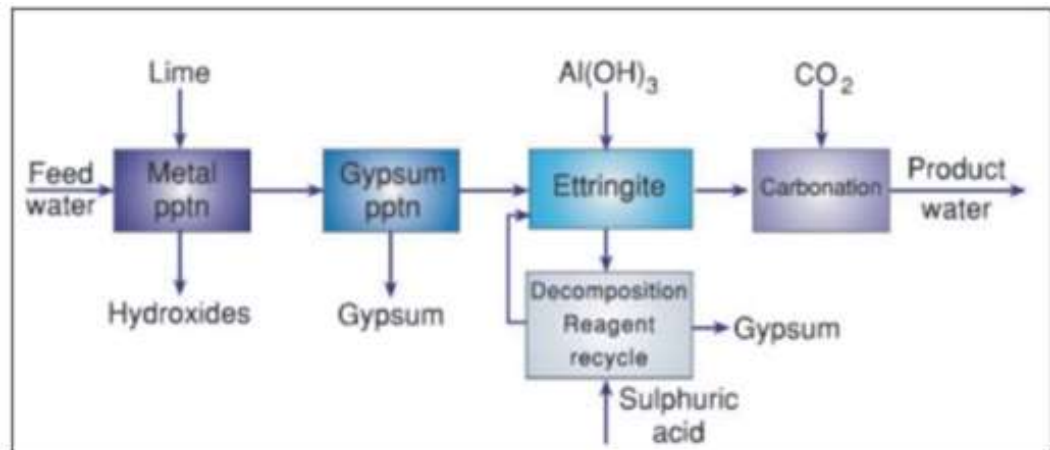
Dentro de los tratamientos de Precipitación Química se tienen dos procesos comerciales de amplio uso que emplean la precipitación de Etringita para la reducción de niveles de sulfato en el agua tratada y son los procesos SAVMIN y CESR. Estos procesos han sido desarrollados para aguas que tienen concentraciones de sulfato >2000 mg/L. Ambos métodos incorporan la precipitación de metales y sulfato de Calcio como etapas de tratamiento preliminares.

### Métodos de precipitación SAVMIN

El proceso SAVMIN emplea reacciones de precipitación en etapas sucesivas para remover los sulfatos. Las diferentes etapas del proceso se ilustran en la figura.

**Figura 5**

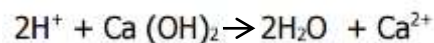
*Diagrama de Flujo proceso SAVMIN*



Fuente: INAP (2003)

En la primera etapa Hidróxido de calcio es adicionado al agua a tratar y el pH se eleva a aproximadamente 12. Ocurren las siguientes reacciones:

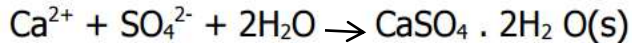
Neutralización:



Precipitación de metales disueltos:

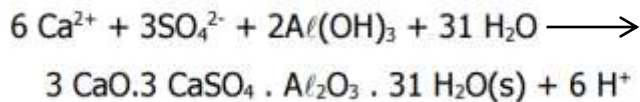


Cristalización de sulfato de calcio:



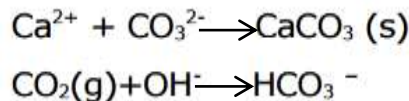
La primera etapa remueve metales y la remoción parcial de sulfato asociado con Magnesio y Calcio.

En la segunda etapa se tiene la remoción de Etringita por precipitación. La precipitación de sulfato requiere la adición de hidróxido de aluminio para formar Etringita insoluble:

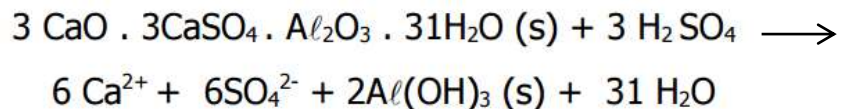


La precipitación de Etringita es optimizada a pH relativamente altos, para ello es necesario suficiente hidróxido de aluminio y cal adicional es requerida para cumplir con los requerimientos de calcio estequiométrico para que la reacción ocurra y para neutralizar la acidez liberada por la reacción de precipitación. La solubilidad de Etringita es sensible al pH y requiere de su control en un rango estrecho.

Una etapa final es el ablandamiento y ajuste del pH por recarbonatación por medio de las reacciones:

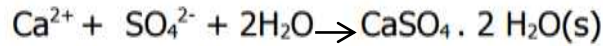


Aunque hace el proceso más complejo, también existe la posibilidad de recuperar el Hidróxido de Aluminio en otra etapa, ya que la Etringita precipitada puede ser descompuesta por ajuste del pH, típicamente empleando ácido sulfúrico por la reacción:



El hidróxido de aluminio sólido formado es recuperado y separado por precipitación de la solución y puede volver a ser empleado en el tratamiento.

La solución supersaturada de sulfato de calcio es cristalizada en una etapa subsecuente:



Es importante tener en cuenta que el proceso SAVMIN en sus etapas es fuertemente dependiente del pH. Para la primera etapa de neutralización (remoción de metales y cristalización de sulfato de calcio) requiere un pH en el rango de 12 a 12,4. Este pH alto es necesario si hay presencia de magnesio en el agua residual. La segunda etapa de remoción de sulfato para la formación de etringita requiere un rango de pH de 11,4 a 12,4 con un óptimo de 11,8. El precipitado de etringita no es estable fuera de este rango de pH. El proceso de re-carbonatación se realiza entre 7,8 y 8,6 en pH. La etapa de recuperación de aluminio requiere un pH óptimo de 6,5 a 6,8 para la descomposición eficiente de la etringita.

Las reacciones de precipitación son relativamente rápidas siempre que las condiciones óptimas de proceso sean consideradas. Tiempos de retención típicos en las diferentes etapas del proceso son de 2 a 40 minutos. Estos tiempos de contacto son relativamente cortos comparados a procesos de tipo biológico.

El proceso SAVMIN es caracterizado por tener varias etapas de separación sólido/líquido. Separadores se requieren para:

- Separación de hidróxidos de metal y sulfato de calcio
- Separación de Etringita
- Separación de cal insoluble
- Separación de carbonato de calcio
- Separación de hidróxido de aluminio
- Separación de sulfato de calcio

Separadores efectivos sólido/líquido tales como filtros pueden ser requeridos.

### **Métodos de precipitación CESR**

El proceso Remoción de sulfato efectivo en costo (CESR) también conocido como proceso "Walhalla" es similar al proceso SAVMIN en que emplea la



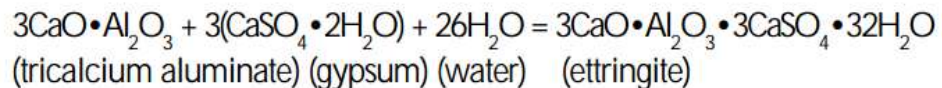
Etringita como agente de remoción de sulfato. El proceso CESR consiste esencialmente de cuatro etapas:

1. Precipitación inicial de sulfato como sulfato de Calcio
2. Precipitación de metales como hidróxidos en una matriz de sulfato de calcio
3. Remoción adicional de sulfato por precipitación de Etringita
4. Reducción de pH empleando recarbonatación

En la primera etapa si se tiene un agua residual con metales y concentración de sulfatos mayores a que 8000 mg/L, cal hidratada es empleada para precipitar mucho del sulfato con sulfato de calcio. Un tiempo de contacto de 40 a 60 minutos es adecuado para la precipitación inicial de  $\text{Ca}_2\text{SO}_4$ . El contenido de sulfatos puede ser disminuido hasta 4000 a 5000 mg/L, con el sulfato de calcio y fácilmente separado empleando filtros.

En la segunda etapa el pH es ajusta a un pH de 10,5 esto remueve metales como hidróxidos y hay un precipitado adicional de sulfato de calcio hasta niveles de 2000 mg/L aún remanentes en el agua. Como en la etapa inicial un tiempo de mezcla de 40 a 60 minutos es adecuado. El lodo formado es separado en un filtro prensa.

En la tercera etapa se debe remover el sulfato remanente a la concentración deseada. El pH del agua es incrementado a 11,5 con cal hidratada. En esta etapa se dosifica un reactivo patentado en razón 1 lb de reactante por lb de sulfato a ser removido. El reactante se combina con sulfato soluble para formar Etringita precipitado:



Contaminantes tales como nitrato, cloruro, fluoruro, boro y materiales pueden ser incorporados en la estructura de la Etringita precipitada. La remoción de sulfatos toma de 30 a 300 minutos dependiendo del nivel de remoción requerido. El lodo de Etringita es fácilmente deshidratado.

En la cuarta etapa, previa a la descarga del agua tratada es necesario bajar el pH y estabilizar el agua para prevenir deposición de carbonatos en los sistemas de tuberías, para ello se realiza la recarbonatación. Aproximadamente 2 libras de CO<sub>2</sub> es requerido para reducir el pH de 1000 galones de agua a 8,5.

(Pacheco-Gutiérrez, *et al.*, 2007) determinaron que los costos, tanto de capital como de operación de los diferentes tratamientos, son sólo estimaciones pues dependen del diseño específico según la cantidad y calidad de agua a tratar (concentración de metales y sulfatos en solución), modo de operación del equipo, necesidad de tratamientos adicionales (como la regeneración de resinas, sales de bario, etc.), los precios del mercado, costo de disposición de residuos y los costos de la mano de obra se encuentran en la Tabla 4.

**Tabla 4**

*Comparación de los tratamientos SAVMIN y CESR*

<b>Actividades</b>	<b>SAVMIN</b>	<b>CESR</b>
Pre tratamiento	No	No
Agua alimentación (SO <sub>4</sub> mg/L)	646	29,100
Efluente (SO <sub>4</sub> mg L-1)	69	190
Producción lodo	Moderado-elevado	Elevado
Seguimiento	Elevado	Elevado
Mantenimiento	Bajo	Bajo
Costo de capital (millones de dólares)	0.31 (103m <sup>3</sup> /d)	Desconocido
Costo de operación (dólares)	0.17 m <sup>3</sup>	0.79 m <sup>3</sup>
Ventajas	Bajas concentraciones de sulfatos en efluente Recirculación ettringita Remoción de metales	Bajas concentraciones de sulfatos en efluente Remoción de metales
Desventajas	Producción de lodos	Producción de lodos

Fuente: (Pacheco-Gutiérrez, 2006)

### **Aguas residuales**

Las aguas residuales son esencialmente aquellas aguas de abastecimiento que después de ser utilizadas en las actividades domésticas y productivas son descargadas a las alcantarillas domiciliarias o directamente al ambiente. (D.S 010-2019-Vivienda).

### **Tratamientos convencionales de aguas residuales**

Es el conjunto de procesos y operaciones unitarias que se realizan en una estructura adecuada para que por medios físicos, químicos y biológicos se remuevan contaminantes no deseables. (D.S 010-2019-Vivienda).

Según (Garcés & Pañuela, 2005) El tratamiento de aguas residuales industriales, puede ser un problema complejo, debido a la gran variedad de compuestos y niveles de concentración posibles. Los avances en investigaciones acerca del efecto de ciertos contaminantes, normas ambientales más estrictas, y factores económicos, han generado nuevas tecnologías. Con el uso de nuevos sistemas de tratamiento, en algunas industrias se han dejado prácticas como el almacenamiento de desechos y el confinamiento, que desde el punto de vista de preservación del medio ambiente y protección de la salud humana no son de ninguna manera recomendable.

Bowel, 2000. El tratamiento del agua residual de los procesos mineros requiere la remoción o la reducción de contaminantes orgánicos, así como la reducción de la concentración de las especies iónicas que dañan al proceso. Muchas de estas técnicas son modificaciones utilizadas en el tratamiento de efluentes, tanto municipales como industriales. Las técnicas más importantes utilizadas en la industria minera se resumen en las Tabla 5

**Tabla 5***Clasificación de tratamientos de agua*

<b>Categoría</b>	<b>Procesos</b>
Tratamiento químico y precipitación	Adición de hidróxido y carbonato de calcio Adición de sales de bario Proceso SAVMIN Proceso CESR
Membrana	Ósmosis inversa Proceso SPARRO Electrodialisis
Intercambio iónico	Proceso GYP-CIX Precipitación química con intercambio iónico
Remoción Biológica	Humedales artificiales Biorreactores

Fuente: Bowel (2000)

**Agua residual no doméstica**

Descarga de líquidos producidos por alguna actividad económica comercial e industrial, distinta a la generada por los usuarios domésticos, quienes descargan aguas residuales domésticas como producto de la preparación de alimentos, del aseo personal y de desechos fisiológicos. (D.S 010-2019-Vivienda).

**Tabla 6***Parámetros de reducción DQO y Sulfatos en aguas residuales no domésticas*

<b>Parámetros</b>	<b>Unidad</b>	<b>Simbología</b>	<b>VMA Descargas al sistema de alcantarillado</b>
Sulfatos	(SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> )	mg/L	1000
Demanda Química del Oxígeno	DQO	mg O <sub>2</sub> /L	100

Fuente: (D.S 010-2019-Vivienda)

## 2.3 Conceptual

### Colorantes Naturales

El principal componente del colorante de la semilla del achiote es la bixina, de color rojo oscuro. químicamente, es un ácido carotenóico de fórmula empírica  $C_{23}H_{30}O_4$ , que se presenta como isómero geométrico del tipo *cis*, pero que puede convertirse a su forma *trans*, más estable (Jaramillo, 1992). Es insoluble en agua y ligeramente soluble en cloroformo, aceites vegetales acetato de etilo y propilenglicol. en la figura 3 aparece su fórmula estructural (Mosquere, 1989 y Kalsec, 2001)

El pigmento de la semilla del achiote, que se encuentra en la parte externa, tiene diferentes compuestos según se muestra en la tabla 5 (cordova, 1997; Bernal, 1990; Jaramillo, 1992)

Al hervir la bixina en una solución de álcali, se forma una molécula de metanol y una sal di potásica que por acidificación, produce el ácido dibásico norbixina,  $C_{24}H_{28}O_4$  (Figura 6), pigmento carotenóide soluble en agua (Bernal, 1989, Jaramillo, 1992)

### Figura 6

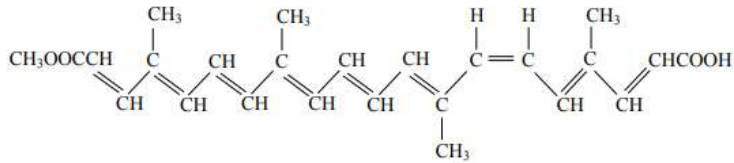
*Bixa Orellana L*



Fuente: Barriga (2017)

## Figura 7

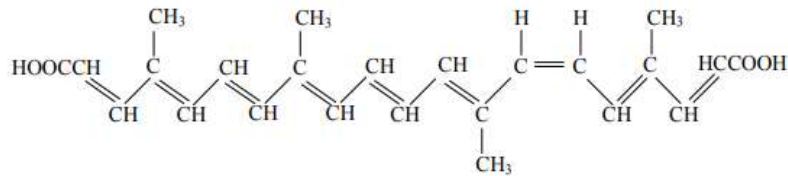
### Ácido *cis*-polieno monometiléster dicarboxílico



Fuente: Devia y Saldarriaga (2003)

## Figura 8

### Estructura de la norbixina



Fuente: Kalsec, 2001

## Achiote (*Bixa Orellana*)

Según Pérez *et al*, (2003). El achiote (*Bixa orellana*) es posiblemente oriunda de la región de Acre, al suroeste de la Amazonia. Se cree que fue domesticada a partir de *Bixa excelsa*, un árbol silvestre de la misma familia (*Bixaceae*) que crece en los bosques tropicales de Sudamérica. El achiote, o urucú, como se le conoce en Brasil, se cuenta entre una de las primeras plantas domesticadas por los indios de esa región, probablemente con fines ceremoniales. En sus escritos, Gonzalo Fernández de Oviedo describe: "Hacían con las semillas unas pelotas los indios con que después se pintaban la cara y le mezclan ciertas gomas, o se hacen unas pinturas como bermellón fino, e de aquella color se pintan la cara y el cuerpo, de tan buena gracia que parecen el mismo diablo. E las indias hacen lo mismo cuando quieren parecer bien, e cuando van a pelear, por parecer feroces. Aún tiene un bien o sirve a los indios en esto: que cuando están así pintados aunque los hieran, como es la pintura colorada e de color sangre, no desmayan tanto como los que no están pintados de aquellas color roxa o sanguínea." Hasta la fecha, algunos pueblos del Amazonas, como los siona y secoya,

ocasionalmente utilizan pasta de achiote para decorar su cuerpo en ciertos rituales. Seguramente otra propiedad de la planta que atrajo la atención de los antiguos pueblos de la región es su capacidad para repeler insectos. El uso del achiote se extendió por toda América tropical desde épocas muy antiguas, de manera que cuando los españoles llegaron su uso era común entre los indios del continente y de las islas del Caribe. Algunos testimonios de los cronistas que llegaron con Hernán Cortés a México narran cómo los aztecas eran aficionados a tomar chocolate perfumado con vainilla y coloreado con achiote. Sobre la forma de prepararlo existe gran cantidad de información en las crónicas, por ejemplo la que recoge Bernabé Cobo: “Echan en remojo estos granillos (semillas) hasta que, lavándolos, se les despegan aquella sustancia colorada de que estaban cubiertos, y ellos quedan blancos, parecidos a los yeros; el agua que quedó teñida de su color, la ponen a cocer al fuego hasta darle su punto, y que la sustancia pingüe del fruto suba arriba como espuma, la cual van recogiendo con una cuchara; cuélese luego y se exprime en un paño, en el cual queda lo espeso que es el achiote, que amasado en bollos o panecillos, lo ponen a secar al sol; y éste es el achiote tan estimado en la Nueva España”.

### **Características generales del achiote**

El cultivo del achiote (*Bixa orellana*), conocido también como annato, achote, onnote, cocote, bija, bixa, urucu, etc., es originario de la América Tropical.

A la llegada de los Europeos, el achiote era cultivado desde México hasta Brasil, siendo su área de origen, posiblemente, la hoya amazónica. El uso inicial del achiote fue para pintura y tatuaje del cuerpo, como se utiliza aún entre ciertas tribus nativas de Sur América, protegiéndose así de los insectos, además de utilizarlo para teñir telas de algodón y algunos utensilios de cocina. (Bernal, 1989; ABP, 2001; Sahaza, 2001).

La planta del achiote es un arbusto de rápido crecimiento, que alcanza de cuatro a seis metros de altura, su aspecto es robusto, con flores muy vistosas y de color blancas o rosadas según sea la variedad; el fruto es una cápsula

de color pardo rojizo o amarillo verdoso que contiene de 30 a 45 semillas cubiertas por una delgada capa o arilo que, por su contenido de Bixina, es de color rojo o anaranjado y constituye la sustancia tintórea propiamente. Botánicamente tiene la siguiente clasificación (Córdoba, 1987; Bernal, 1989; Mosquera, 1989; Jaramillo, 1992):

Subdivisión: Angiosperma

Clase: Dicotiledóneas

Orden: Parietales

Familia: Bixáceas

Género: Bixa

Especies: B. Orellana Linneo, B. Sphaerocarp Triana, B. Urucurana Willd, B. Purpurea Hort, etc.

Según el tipo de flores, se pueden considerar dos variedades de achiote, clasificadas así: la de flores blancas que da cápsulas amarillo-verdosas, con igual coloración de la tintura y tiene un 10.4% de colorante; y la de flores rosadas que dan cápsulas rojizas y tiene un 8.2% de colorante (Seminario de Agronomía, 1975, 1990). Sin embargo, en los mercados nacional y extranjero no se establece diferencia de precios.

### **Composición química de las semillas del achiote**

Características fisicoquímicas de la semilla del achiote El principal constituyente colorante de la semilla del achiote es la bixina, que se encuentra en la cubierta exterior de la semilla del fruto, representa más del 80% de los pigmentos presentes, lo cual facilita su extracción; los componentes principales de la semilla del achiote son: (Córdoba, 1987; Mosquera, 1989; Jaramillo, 1992; CNP, 2001; SDIC, 2001).

- Resina
- Orellina (materia colorante amarilla)
- Bixina (materia colorante roja) (80%)
- Aceite Volátil y aceite Graso



Según diferentes fuentes, la composición tanto química como nutricional de la semilla del achiote es muy variada, como puede observarse en las Tablas 5 y 6 (Córdoba, 1987; Jaramillo, 1992; CNR, 2001; SDIC, 2001).

**Tabla 7**

*Composición química de la semilla de achiote*

Composición química (%)	
Humedad	8.00 – 13,00
Proteína	13 – 14,24
Celulosa	13,8
Fibra cruda	18,48
Almidones	11,45
Carbohidratos totales	39,91
Cenizas	4,50 – 7,07
Energía	54 kcal

Fuente:(Delvia y Saldarriaga, 2003)

**Tabla 8**

*Composición nutricional de la semilla del achiote*

Composición química (g/100g)	
Calcio	7
Fosforo	10
Hierro	1,4
Vitamina A	45 mg
Rivoflavina	0,2
Niacina	1,46
Tiamina	0,39
Ácido Ascórbico	12,5

Fuente:(Delvia y Saldarriaga, 2003)

**Tabla 9***Composición del pigmento del achiote*

Composición química (g/100)	
Proteínas	12,3-13,2
Pectinas	0,23
Carbohidratos	39,01-47,00
Cenizas	5,44 -0,02
Taninos	0,33-0,01
Pentosanos	11,35-14,97
Carotenoides	1,21-2,30
β-carotenoides	6,8-11,30 mg

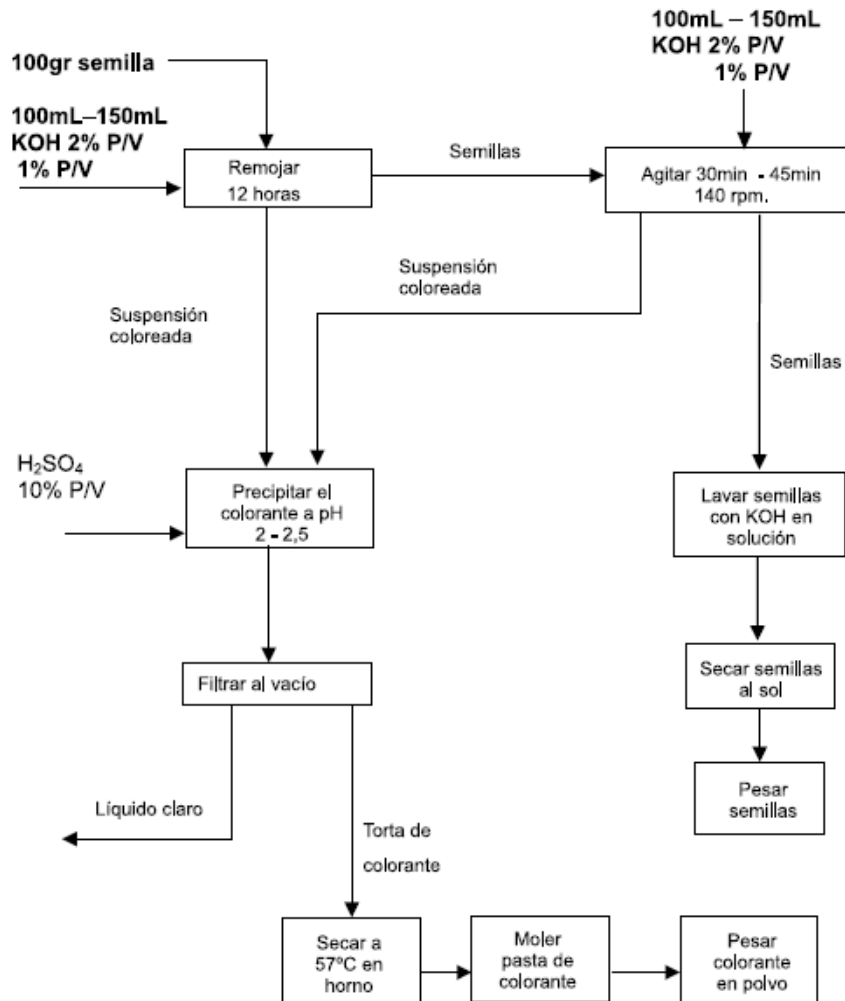
Fuente: (Debia y Saldarroaga, 2003)

**Extracción del Colorante natural**

Los parámetros evaluados de relevancia, en la extracción del colorante de las semillas de achiote, con los que se obtuvieron rendimientos favorables fueron: tipo de solvente adecuado es solución acuosa de NaOH siendo la concentración adecuada de 0,50 % (peso/volumen), tiempo de contacto 15 minutos, velocidad de agitación 150 rpm, relación de semilla solvente 1/10 mL (peso/volumen) y la temperatura es de 40 °C, siendo el rendimiento óptimo de 95,94 %. Quispe (2019)

**Figura 9**

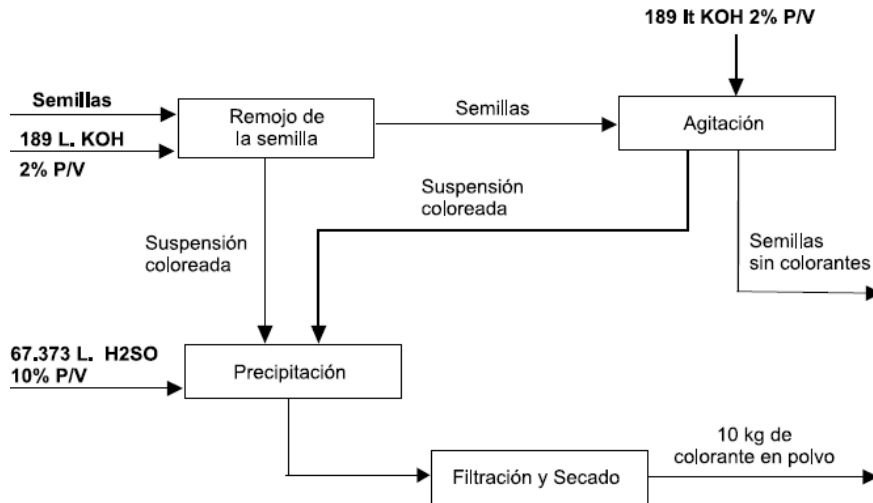
*Secuencia de las actividades realizadas para obtener el colorante*



Fuente: (Delvia y Saldarriaga, 2003)

**Figura 10**

*Diagrama de bloques del proceso de extracción de 10 Kg/lote*



Fuente: (Debia y Saldarroaga, 2003)

### **Rendimiento de los extractos del achiote**

Como se aprecia en la Figura 11 el color de los extractos varía según la solución extractante empleado. El extracto obtenido con etanol de 40° presenta un color anaranjado; el extracto con etanol de 80°, un color rojo claro y el extraído con KOH al 2%, rojo oscuro.

**Figura 11**

*Extracción de los colorantes*



*Nota: extracto de etanol de 40° (1), etanol de 80° (2), con KOH al 2% (3).*

Fuente: Sánchez (2019)

**Tabla 10***Rendimiento extractivo del colorante natural de achiote a escala laboratorio*

Variedad	Solución extractora	Peso de semilla (g)	Peso del extracto colorante (g)	Rendimiento (%)
Verde	KOH 2%	20,05	1,56	7,80
Amarilla	KOH 2%	20,07	1,56	7,79
Roja	KOH 2%	20,77	1,57	7,54
Roja	Etanol 80°	20,02	1,36	6,77
Amarilla	Etanol 80°	20,03	1,33	6,66
Verde	Etanol 80°	20,02	1,33	6,63
Roja	Etanol 40°	20,02	1,31	6,56
Amarilla	Etanol 40°	20,02	1,31	6,55
Verde	Etanol 40°	20,03	1,31	6,54

Fuente: Sánchez (2019)

Para calcular el rendimiento extractivo del colorante de achiote que se muestran en la Tabla 9 de forma descendente.

La extracción producto de la interacción de la variedad verde con la solución extracte KOH 2% fue la mayor rendimiento y el extracto de la variedad verde con la solución extractaste etanol de 40° fue el de menor rendimiento en cuanto a colorante se refiere.

#### 2.4 Definición de términos básicos

**Foto degradación:** Proceso que permite descomponer una sustancia química con la ayuda de la energía solar.

**Precipitación:** Consiste en la eliminación de una sustancia disuelta indeseable, por adición de un reactivo que forme un compuesto insoluble con el mismo, facilitando así su eliminación por cualquiera de los métodos descritos en la eliminación de la materia en suspensión.

**Proceso Fenton.-** Proceso que permite oxidar sustancias orgánicas, haciendo uso de una sal de hierro como el sulfato de hierro (II) y el agua oxigenada, en medio ácido.

**Procesos Avanzados de Oxidación (PAO):** Se definen como “aquellos procesos de oxidación que implican la generación de radicales hidroxilo en cantidad suficiente para interactuar con los compuestos orgánicos del medio”. Se trata de una familia de métodos que utilizan la elevada capacidad oxidante de los radicales HO· y que se diferencian entre sí en la forma en la que los generan. Los más comunes utilizan combinaciones de ozono (O<sub>3</sub>), peróxido de hidrógeno (H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>), radiación ultravioleta y fotocatalisis.

**Radiación ultravioleta:** Es la radiación ultravioleta de menor longitud de onda (360 nm), lleva mucha energía e interfiere con los enlaces moleculares. Especialmente las de menos de 300 nm que pueden alterar las moléculas de ADN, muy importantes para la vida. Estas ondas son absorbidas por la parte alta de la atmósfera, especialmente por la capa de ozono.

**Solubilidad:** Se conoce como solubilidad a la capacidad que posee determinada sustancia para disolverse en otra y formar un sistema homogéneo.

**Tiempo de Residencia:** Tiempo promedio que el reactivo permanece dentro del reactor.

**Colorante:** El principal componente del colorante de la semilla del achiote es la bixina, de color rojo oscuro. químicamente, es un ácido carotenóico de la fórmula empírica C<sub>25</sub>H<sub>30</sub>O<sub>4</sub>, que se presenta como isómero geométrico de tipo *cis*, pero que puede convertirse a su forma *trans*, más estable (Jaramillo, 1992). Es insoluble en agua y ligeramente soluble en cloroformo, aceites vegetales

### III. HIPOTESIS Y VARIABLES

#### 3.1 Hipótesis

##### 3.1.1 Hipótesis General

La adecuación de los métodos foto Fenton y químico reduce significativamente a valores máximos admisibles la DQO y ( $\text{SO}_4^{2-}$ ) de las aguas residuales de los procesos productivos de colorantes naturales

##### 3.1.2 Hipótesis Específica

- Las características físico químicas de las aguas residuales de los procesos productivos de colorantes naturales superan los Valores Máximos admisibles.
- Los valores óptimos de los parámetros son: pH: 10,5 y 11,5 tiempo de residencia: 40-60 minutos, dosificación de agente precipitante (mg/L).
- Los valores óptimos de los parámetros son: Relación de reactivos Fenton: 10, 17,5 y 25.  $\text{H}_2\text{O}_2/\text{Fe}^{+2}$  Rango pH 2, 3 y 4, Intensidad de radiación-UV.

#### 3.2 Definición conceptual de variables

La adecuación de los métodos foto Fenton y químico permitirá reducir la demanda química del oxígeno y sulfatos en las aguas residuales de colorantes naturales

### 3.2.1 Operacionalización de variables

**Tabla 11**

*Operacionalización de variables*

VARIABLE	DIMENSIONES	INDICADORES	INDICE	METODO Y TECNICAS
V.INDEPENDIENTE Método foto Fenton	Parámetros de operación	- Relación de reactivos foto Fenton	mg/L	- Proporción de reactivos Fenton previamente preparada
		- Intensidad de radicación solar	W/m <sup>2</sup>	- Lámparas de potencia definida
Método Químico		- pH	(H <sup>+</sup> )	- pH metro
		- Concentración del agente	mg/L	- Análisis de sulfatos precipitante con equipo específico quant move 100
V DEPENDIENTE Contenido de (SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> ) en el agua tratada	Parámetros químico después del tratamiento	- Sulfatos (SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> )	mg/L	Análisis de sulfatos con equipo espectro quant move 100
		- Demanda Química del Oxígeno (DQO)	mg O <sub>2</sub> /L	Espectrofotómetro UV-Vis
Valor de DQO en el agua tratada				



## **IV. DISEÑO METODOLOGICO**

### **4.1 Tipo y diseño de investigación**

De acuerdo al propósito de la investigación, la naturaleza de los problemas y objetivos formulados en el trabajo, el presente trabajo reúne las características y condiciones suficientes para ser calificado como una investigación experimental, puesto que los conceptos teóricos acerca de la naturaleza del problema fueron corroborados mediante la evaluación de los datos obtenidos.

### **4.2 Método de investigación**

La investigación desarrollada, es de tipo experimental con enfoque cuantitativo, debido a que se ha realizado las pruebas experimentales en los laboratorios de la Facultad de Ingeniería Química y en laboratorio CERPER conformado por las siguientes etapas.

#### **Primera etapa**

Curva de calibración para el análisis en el espectrofotómetro y la formulación característica del agua residual antes del tratamiento.

#### **Segunda etapa**

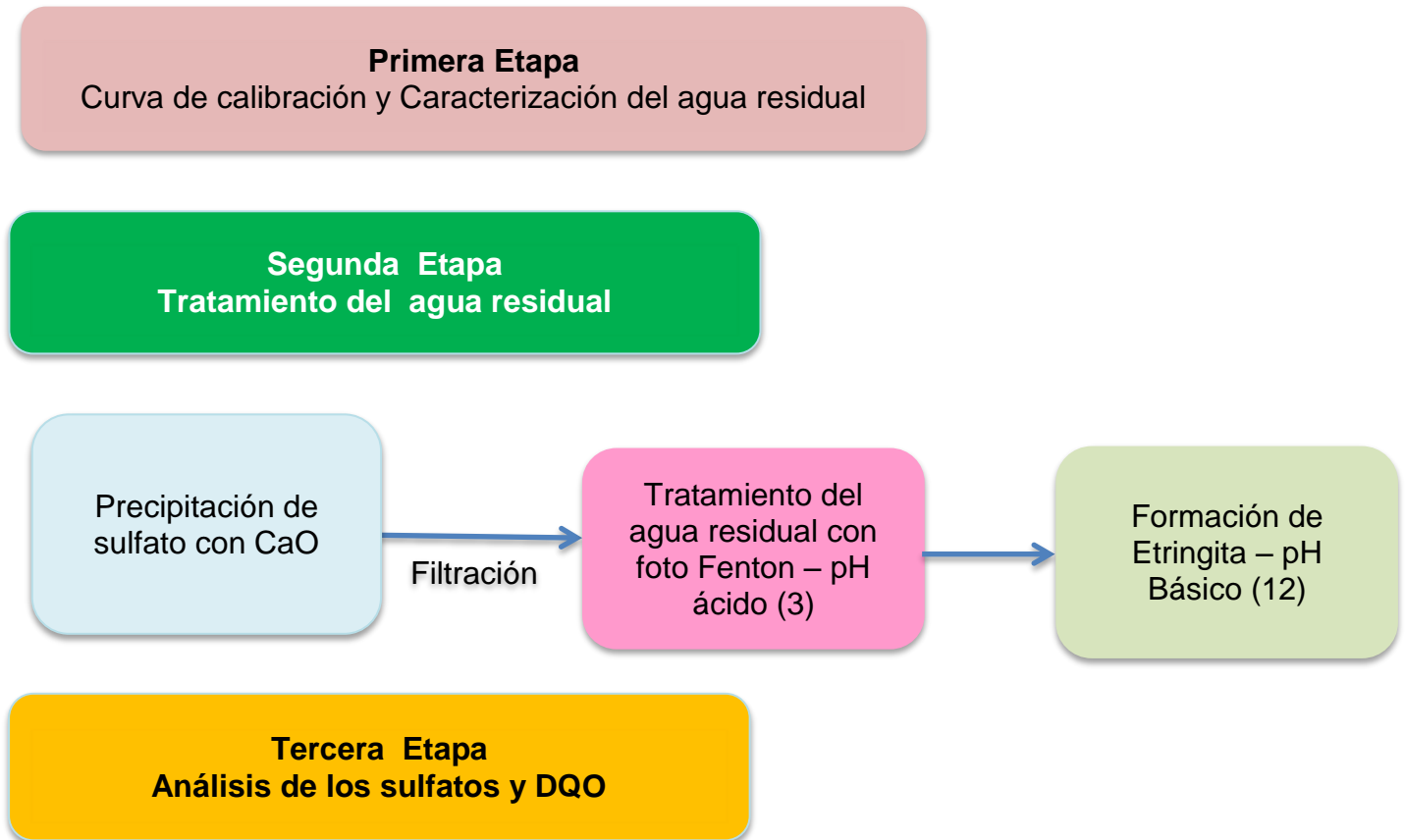
Tratamiento del agua residual por el método químico y foto Fenton

#### **Tercera etapa**

Finalmente los análisis de sulfatos y demanda química del oxígeno.

## Figura 12

### *Etapas de la Investigación*



**Para las pruebas experimentales se utilizaron equipos, materiales y reactivos**

#### **Materiales de Laboratorio**

- Vasos de 250 mL, 500 mL y 1 L
- Matraces de 500 mL
- Probetas de 10, 100 mL
- Termómetro de escala de 0 -150 °C
- Pipetas 1, 5 y 10 mL
- Balones de fondo redondo de 250 y 500 mL
- Frascos de plástico de 25 y 50 mL
- Frascos de vidrio de 250 mL
- Fiolas de 1 L

## Reactivos

- Acido Sulfurico,  $H_2SO_4$  al 98%
- Peroxido de Hidrogeno -  $H_2O_2$  al 50 % w/w
- Sulfato de Hierro hexahidratado –  $FeSO_4 \cdot 7H_2O$  al 99% P.A
- Hidróxido de Sodio al 99.5% P.A
- Kits Hach para determinación de DQO rango alto
- Kit Hanna para determinar Sulfatos rango alto- HI 38001
- Hidróxido de Calcio –  $Ca(OH)_2$  al 50%
- Aluminato tricalcico ( $C_3A$ ) -  $Al_2O_3 \cdot 3CaO$  al 62,3%
- Hidróxido de Aluminio –  $Al(OH)_3$  al 63%

## Equipos

- pH metro digital marca Hanna
- Espectrofotómetro UV-Visible Varian Cary 50. Con capacidad para realizar barridos, curvas de calibración. Rango de uso: 190 – 1100 nm.
- Digestor de muestras para análisis de DQO Hach DRB 200. Rango de temperatura del instrumento: 37 a 165 °C. Tiempo de Digestión: 0 a 480 minutos. Velocidad de calentamiento: de 20 a 150 °C en 10 minutos.
- pH Metro HANNA Modelo HI5221
- Balanza Analítica Mettler Toledo +/-0.01 g

## Primera etapa

En la primera etapa se prepararon los patrones para realizar la curva de calibración y luego se realizó la caracterización del agua residual antes del tratamiento

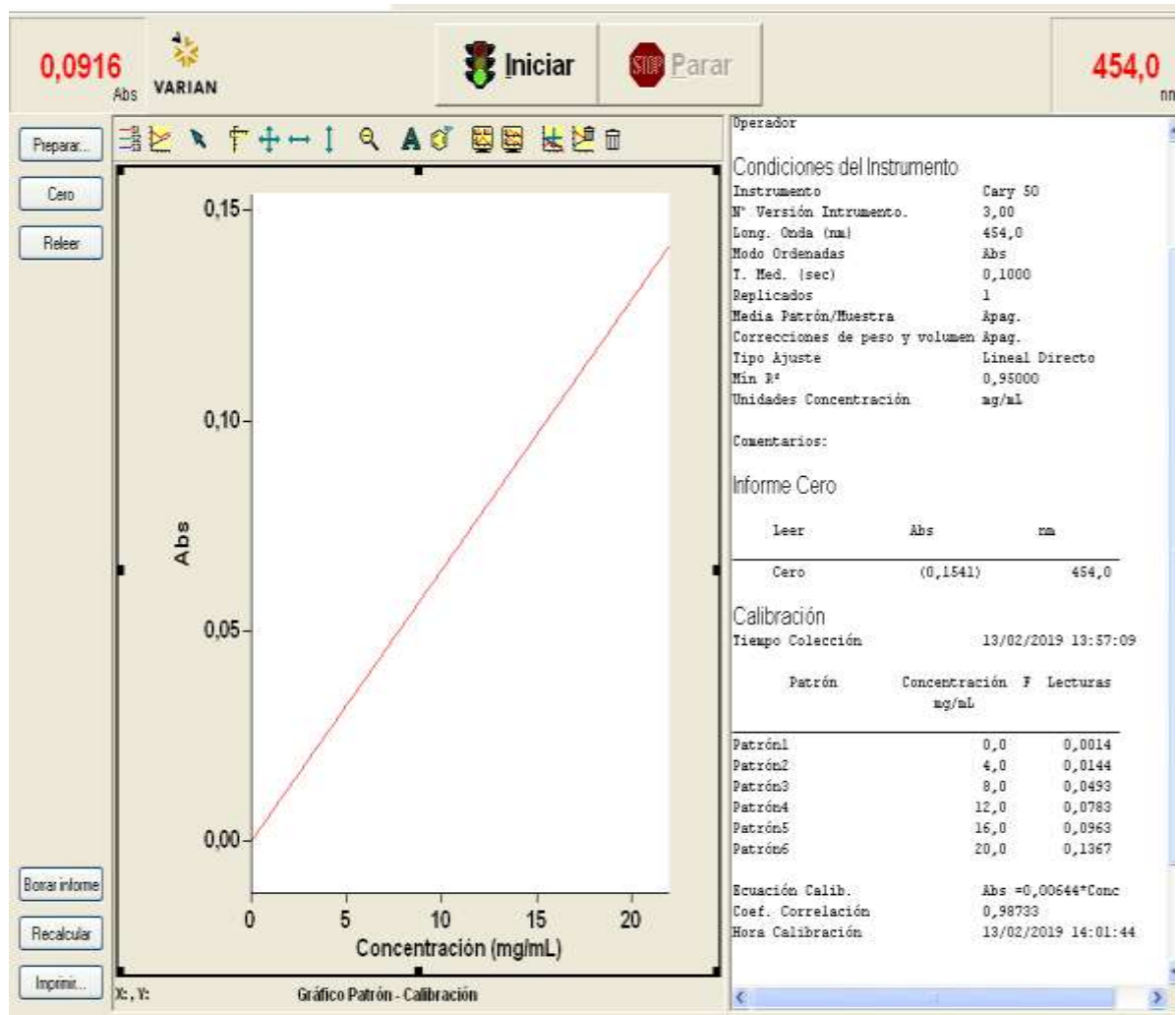
## Curva de calibración

- Se determinó la curva de calibración en el espectrofotómetro para posteriormente determinar las lecturas del DQO.
- Se tomó muestras para análisis de DQO, características de la muestra pH ácido, se neutralizó con NaOH, se agita y se dejó precipitar, luego se tomó una muestra de 0,2 mL del sobrenadante y se colocó en el vial para hacer la digestión de las muestras por 2 horas en el reactor HACH de DQO.

- Una vez enfriada las muestras de la digestión se procedió a determinar el DQO realizando las lecturas en el espectrofotómetro UV Visible.

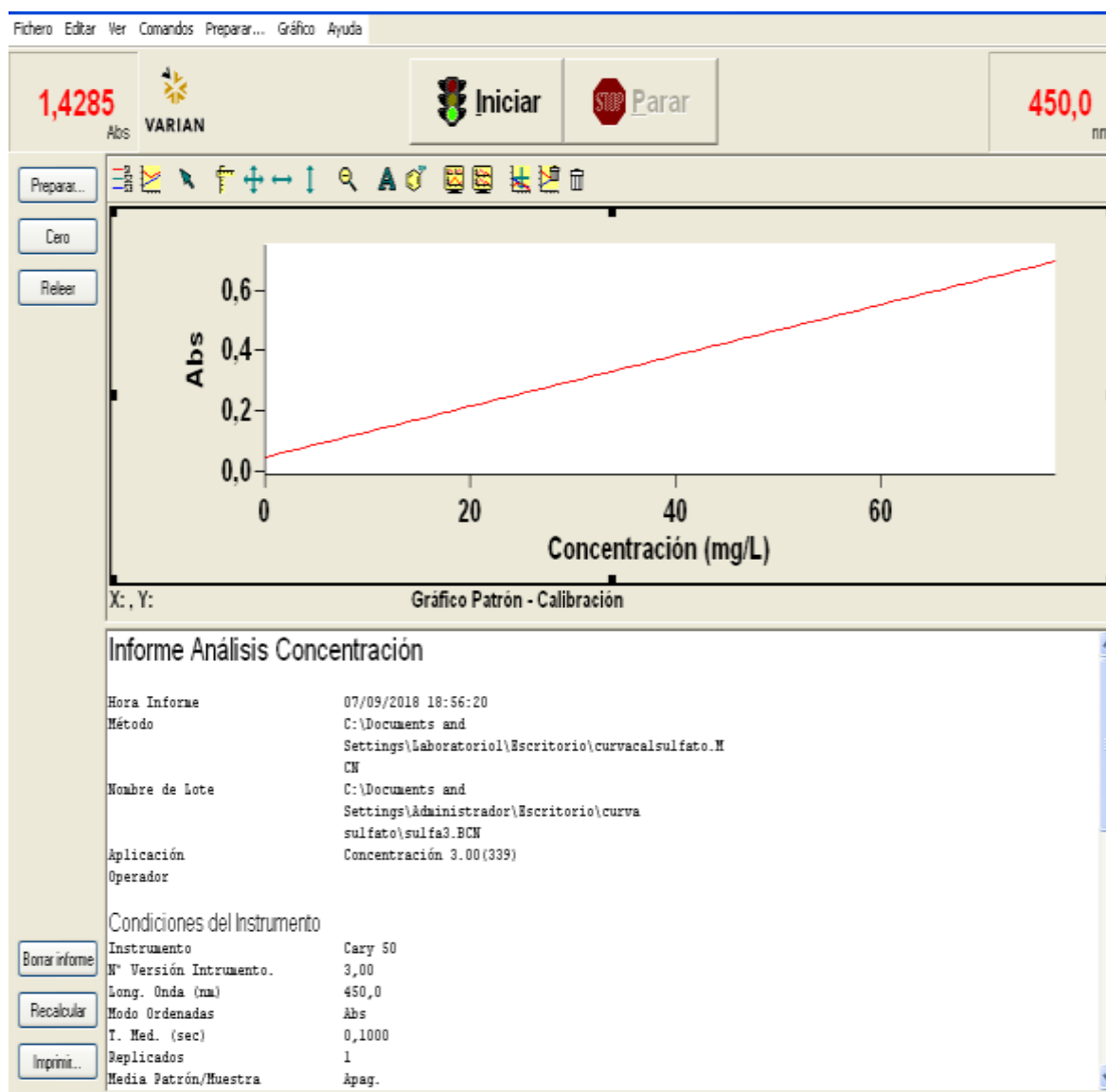
**Figura 13**

*Curva de calibración en el espectrómetro para determinar concentración del colorante*



**Figura 14**

*Curva de calibración en el espectrómetro para determinar sulfatos*



**Formulación de agua de proceso de características similares a las generan en planta de colorantes naturales**

Se formularon las muestras de aguas residuales con características similares a las generadas en planta de colorantes naturales en el laboratorio de Química de la Facultad de Ingeniería Química de la Universidad Nacional del

Callao, tomando como referencia la muestra proporcionada por la empresa Biotech Peru SAC".

**Tabla 12**

*Formulación de agua de procesos de características similares a las que se generan en planta de colorantes naturales*

<b>Mezcla</b>	<b>Productos</b>	<b>Unidades</b>	<b>Cantidad</b>
Mezcla	Colorante natural	g/L	1,5
Mezcla	Soda Caustica	% en peso	1,5

La Formulación del colorante se realizó en base a 4L de agua de proceso con características similares a las que se generan en plantas de colorantes naturales

El pH que se trabajo fue de 11,9

**Figura 15**

*Muestra de agua de proceso de características similares a las que se generan en plantas de colorantes naturales*



*Alvaro*

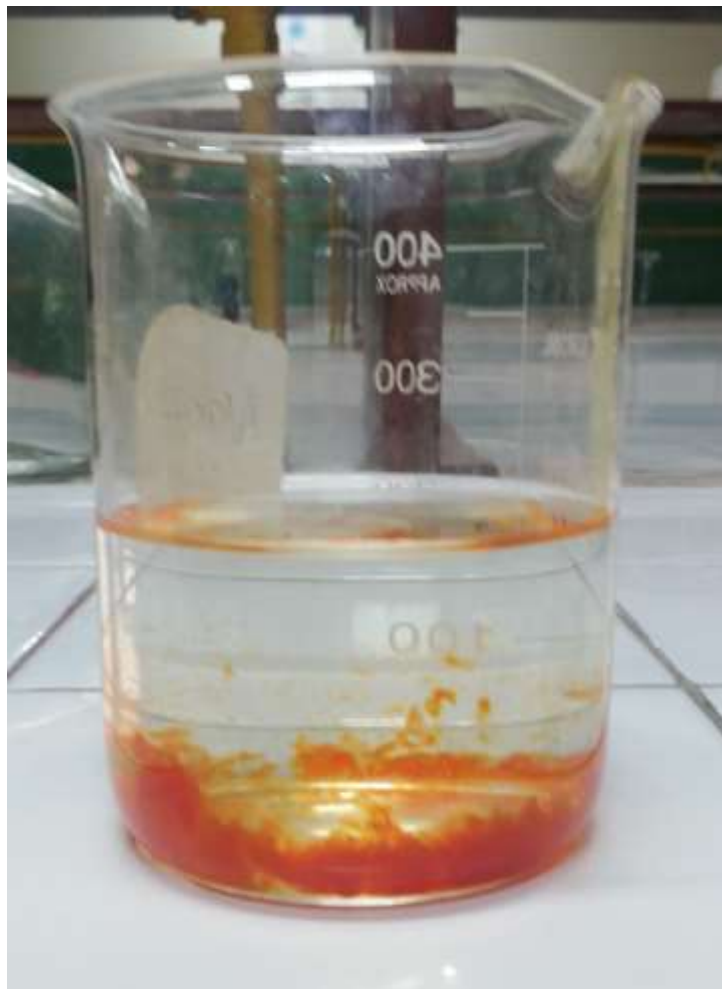
**Recuperación del colorante por regulación de pH de la solución a un medio ácido con  $H_2SO_4$**

Se adiciono ácido sulfúrico para la precipitación del colorante.

Se recupera el colorante y queda el sobrenadante que viene hacer el agua residual de colorantes naturales y se vuelve a medir el DQO y se mide el pH 2,16

**Figura 16**

*Recuperación del colorante por regulación de pH en solución a un medio ácido*



## Segunda etapa

### Tratamiento del agua residual

#### Control de la concentración de sulfatos a través de dos etapas

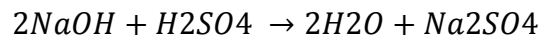
##### 1. Precipitación empleando óxido de calcio

Se realiza los cálculos estequiométricos para saber cuánto de CaO se debe adicionar.

pH: 11,9 y H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>: 41,4 g

$$4L \text{ de agua} = 4,000 \text{ g} \times \frac{1,5 \text{ g NaOH}}{100 \text{ g}} = 60 \text{ g NaOH}$$

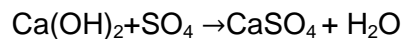
Neutralizar con H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>



$$\text{Neutralizar: } 60 \text{ g NaOH} \times \frac{98 \text{ g H}_2\text{SO}_4}{2 \times 40 \text{ g NaOH}} \times \frac{100 \text{ g H}_2\text{SO}_4}{96,5 \text{ g H}_2\text{SO}_4} \times \frac{1 \text{ mL H}_2\text{SO}_4}{1,84 \text{ g H}_2\text{SO}_4} =$$

41,4 mL H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>

CaO



$$\text{CaO} = \frac{41,25 \text{ g CaO}}{98} = 42,11 \text{ g CaO}$$

$$\text{CaO} + 10\% \text{ Exceso} = 42,11 \times 1,1 \text{ g CaO} = 46,32 \text{ g CaO}$$

Tiempo: 12 horas

El agua residual se preparó a 18,000 ppm

$$\begin{aligned} \text{pp SO}_4 &= \frac{41,5 \text{ mL H}_2\text{SO}_4}{4L} \times \frac{1,84 \text{ g H}_2\text{SO}_4}{\text{mL H}_2\text{SO}_4} \times 0,965 \frac{\text{g}}{L} \times \frac{96,8 \text{ mL SO}_4}{98 \text{ g H}_2\text{SO}_4} \times \frac{1000 \text{ mg SO}_2}{\text{g SO}_2} - \\ &= 18,000 \text{ ppm SO}_4 \end{aligned}$$

Al realizar el tratamiento con el Óxido de Calcio se obtuvo entre 2000-1500 ppm SO<sub>4</sub>



## Figura 17

*Precipitación empleado de Oxido de Calcio*



### **Descripción del sistema de tratamiento de las aguas residuales de colorantes naturales – Método foto Fenton**

- Las muestras de agua residual inicialmente se midió el DQO dando como resultado 1000 mg/L
- Se realizó la prueba foto Fenton de acuerdo a las siguientes características:

Relación de reactivos Fenton: 10, 17,5 y 25  $\text{H}_2\text{O}_2/\text{Fe}^{+2}$

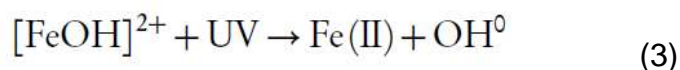
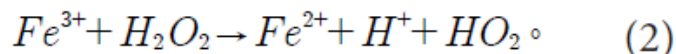
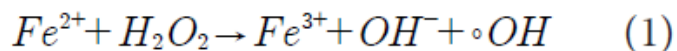
$$\frac{\text{mg H}_2\text{O}_2/\text{L}}{\text{mg Fe}^{+2}/\text{L}}$$

Tiempo: 10, 20, 30 (m)

pH[-log H<sup>+</sup>]: Rango pH 2, 3 y .4

Intensidad de radiación –UV (4 Watts)

Después del tratamiento foto Fenton se mide el DQO dando como resultado < 7 mg/L que indica la alta reducción de DQO donde el reactivo de Fe(II) se oxida a Fe(III) descomponiendo el peróxido de hidrógeno para formar radicales hidroxilo.



### Descripción del sistema de tratamiento de las aguas residuales de colorantes naturales – Método químico

#### 2. Control de la concentración de sulfato empleando hidróxido de aluminio

Se realiza los cálculos estequiométricos para saber cuánto de Hidróxido de Aluminio se debe adicionar.

$$g Al(OH)_3 = \frac{2 \text{ g } SO_4}{L} \times 0,5 \text{ L} \times \frac{2 \times 78 \text{ g } Al(OH)_3}{3 \times 96 \text{ } SO_4} = 0,542 \text{ g } Al(OH)_3$$

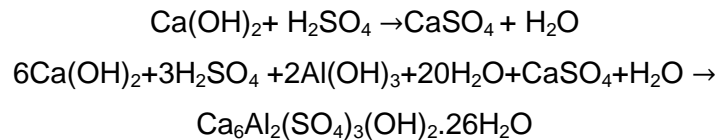
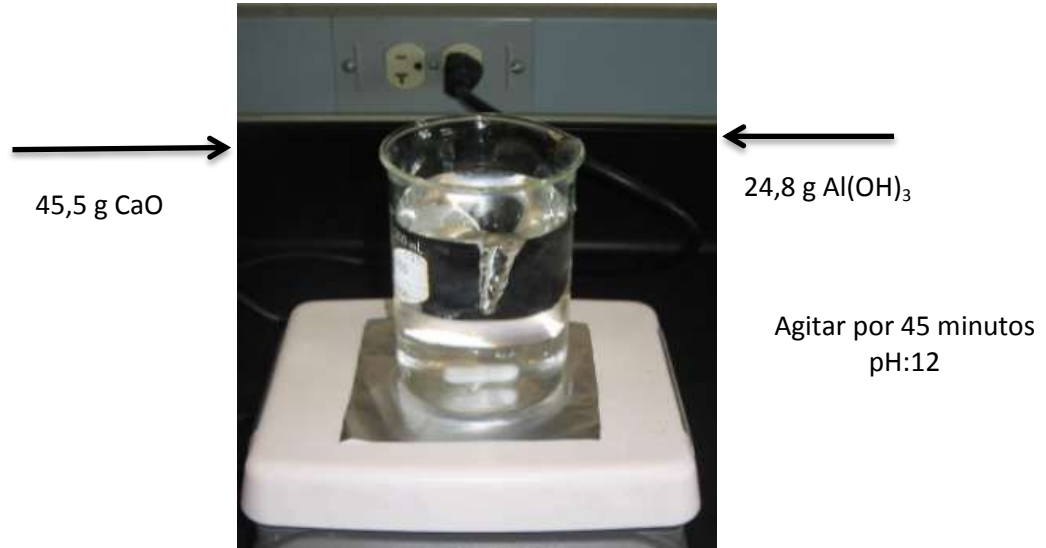
$$10\% \text{ Exceso} = 0,542 \text{ g } Al(OH)_3 \times 1,1 = 0,596 \text{ g } Al(OH)_3$$

$$15\% \text{ Exceso} = 0,542 \text{ g } Al(OH)_3 \times 1,15 = 0,623 \text{ g } Al(OH)_3$$

$$20\% \text{ Exceso} = 0,542 \text{ g } Al(OH)_3 \times 1,2 = 0,651 \text{ g } Al(OH)_3$$

**Figura 18**

*Reacción usando CaO y Al(OH)<sub>3</sub>*



Al adicionar el hidróxido de aluminio se partió entre 1500-2000 ppm SO<sup>4</sup> se adicono las proporciones de aluminio obteniendo resultados entre 600-800 ppm SO<sub>4</sub>

### **Tercera etapa**

#### **Análisis de Demanda Química del Oxígeno – DQO**

- El método usado para el análisis de Demanda Química del Oxígeno: SMEWW-APHA-AWWA-WEF. Part 5220 D.22 nd Ed. 2012, Chemical Oxygen Demand (COD). Closed Reflux. Colorimetric method.
- Digestor de muestras para análisis de DQO Hach DRB 200. Rango de temperatura del instrumento: 37 a 165 °C. Tiempo de Digestión: 0 a 480 minutos. Velocidad de calentamiento: de 20 a 150 °C en 10 minutos.

## Figura 19

*Equipo Hach para determinar DQO*



### **Análisis Sulfatos ( $\text{SO}_4^{2-}$ )**

El método usado fue USEPA Sulfaver con rango de 2 a 70 mg/L  $\text{SO}_4^{2-}$

### **Determinación de pH, Temperatura**

Se realizó con el equipo: Conductímetro HANNA modelo HI 99300

### **Análisis espectrofotométrico**

Espectrofotómetro UV-Vis Varian Cary 50. Con capacidad para realizar barridos, curvas de calibración. Rango de uso: 190 – 1100 nm.

### **4.3 Población y muestra**

La población estuvo conformada por aguas residuales de la empresa generadora (10L) y la el agua residual caracterizado para el tratamiento (4L).

La muestra para el análisis de sulfatos fue definida por el diseño experimental de cribado definitivo y para el tratamiento de DQO fue definido por diseño central compuesto.

#### **4.4 Lugar de estudio y periodo de desarrollo**

El trabajo de investigación se realizó en el laboratorio de microbiología y laboratorio de investigación de la Facultad de Ingeniería Química de la Universidad Nacional del Callao.

#### **4.5 Técnicas e instrumentos para la recolección de la información**

Para el presente trabajo de investigación se usó métodos de análisis como:

- Demanda Química del Oxígeno utilizando equipo Hach DRB 200.
- Análisis de Sulfatos usando el Sulfaver con rango de 2 a 70 mg/L  $\text{SO}_4^{2-}$
- Con equipo Conductímetro HANNA modelo HI 99300 se usó para medir el pH y T°C
- Equipo Espectrofotómetro UV-Vis Varian Cary 50. nm.

#### **4.6 Análisis y procesamiento de datos**

Diseño experimental

Los experimentos fueron llevados a cabo mediante el diseño experimental Box Behnken con dos réplicas. Este diseño experimental fue escogido porque se utiliza para la optimización de procesos.

La demanda química de oxígeno experimental, las calculadas con las ecuaciones de predicción y los residuos obtenidos empleando dicho software cuyos resultados se ven en la tabla 14.

Para la determinación de los sulfatos y demanda química del oxígeno se Realizó mediante análisis.

## V. RESULTADOS

### 5.1 Resultados descriptivos

#### Caracterización del agua residual

El agua residual procedente de la empresa "Biotech Peru SAC" presenta como parámetro físico un color Rojo intenso, debido a los colorantes naturales y sulfatos que contiene. Las características físico químicas se muestran en la tabla 13. además de ello se formuló un efluente similar al industrial

**Tabla 13**

*Resultados de la caracterización de agua residual de colorantes naturales y similares*

Parámetro	Unidad	Efluente industrial	Efluente similar al industrial
DQO	(mg O <sub>2</sub> /L)	2 500	1 000
Sulfatos	(mg /L)	8 000	18 000
pH		11,3	11,19
T	°C	25,3	24,9

#### Resultados experimentales de los valores óptimos de parámetros que permite reducir el contenido de sulfatos método químico

Los parámetros fueron

Relación de reactivos Fenton: 20, 40 y 60 (mg/L Fe<sup>+2</sup> y 159, 318 y 477 (mg/L H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>))

Tiempo: 10, 20, 30 (m)

Intensidad de radiación –UV (4 Watts)

Se midió nuevamente el DQO (ml/L) dando como resultado <7 mg/L)

### Medición de los niveles de concentración

Luego de realizadas las pruebas experimentales, se obtuvieron los siguientes resultados

**Tabla 14**

*Resultados experimentales del diseño Box Behnken*

N°	Orden	Corrida	Tipo	Bloques	Tiempo (m)	Fe (mg/L)	H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> (mg/L)	Concentración Bix (mg/L)
2	15	2	0	1	20	40	318	3,6
3	7	3	2	1	10	40	477	4,0
4	2	4	2	1	30	20	318	4,3
5	14	5	0	1	20	40	318	2,5
6	9	6	2	1	20	20	159	5,7
7	5	7	2	1	10	40	159	5,4
8	13	8	0	1	20	40	318	5,5
9	8	9	2	1	30	40	477	5,5
10	3	10	2	1	10	60	318	6,5
11	12	11	2	1	20	60	477	6,0
12	1	12	2	1	10	20	318	4,4
13	4	13	2	1	30	20	318	4,2
14	6	14	2	1	30	40	159	4,9
15	7	15	2	1	20	60	159	5,0

### Niveles de contaminación al ingreso y salida del proceso de tratamiento del DQO

La remoción de los resultados experimentales se muestra en la tabla 15

**Tabla 15**

*Resultados de DQO al ingreso y salida del tratamiento*

<b>DQO (mg O<sub>2</sub>/L) ingreso del tratamiento</b>	<b>DQO (mg O<sub>2</sub>/L) salida del tratamiento</b>	<b>Tratamiento con foto Fenton</b>
2 500	25	<17,5
1 000	10	<7

**Niveles de contaminación al ingreso y salida del proceso de tratamiento de sulfatos**

La remoción de los resultados experimentales se muestra en la tabla 23

**Tabla 16**

*Resultados de sulfatos al ingreso y salida del tratamiento*

<b>Sulfatos (mg /L) ingreso del tratamiento</b>	<b>Sulfatos (mg /L) salida del tratamiento con CaO</b>	<b>Sulfatos (mg /L) salida del tratamiento con Ca</b>
8 000	1 500	600
18 000	2 000	800

**5.2 Resultados inferenciales.**

En las tablas 15 y 16 se encuentra los resultados de DQO y sulfatos al ingreso y salida del tratamiento que se obtuvieron durante el periodo de ejecución del trabajo de investigación donde se muestran los resultados de la reducción de los parámetros de DQO y sulfatos de las aguas residuales de colorantes naturales.

Esto permite proponer inferencia de probabilidad de reducir el DQO y Sulfatos de las aguas residuales utilizando los métodos foto Fenton y químico



### **5.3 Resultados estadísticos de acuerdo al problema y la hipótesis**

**La adecuación de los métodos foto Fenton y químico reduce significativamente a valores máximos admisibles la DQO y ( $\text{SO}_4^{2-}$ ) de las aguas residuales de colorantes naturales**

Al utilizar los métodos foto Fenton y químico se evidencia que son métodos efectivos para reducir la carga orgánica y química presente en las aguas residuales de colorantes naturales como se muestra en las tablas 15 y 16.

**Las características físico químicas de las aguas residuales de colorantes naturales superan los Valores Máximos Admisibles**

Como se puede verificar que las aguas residuales de colorantes naturales no cumplen los VMA por lo que es un problema para el medio ambiente y legal al no cumplir con la legislación vigente no pueden ser descargados a la red de alcantarillado público si no se hace un tratamiento los parámetros antes del tratamiento fueron 2 500 mg  $\text{O}_2/\text{L}$  y 1 000 mg  $\text{O}_2/\text{L}$  para DQO para sulfatos de un efluente industrial fueron 8 000 mg/L y 18 000 mg/L respectivamente.

**Los parámetros óptimos de pH y tiempo de residencia para el proceso de tratamiento fueron**

Los parámetros óptimos pH:3 en medio ácido y el tiempo de residencia: 5 horas.

**Los parámetros relación Fenton, pH y Intensidad de radiación solar-UV**

Los parámetros óptimos fueron:

Relación Fenton:  $18,8 \frac{\text{mg H}_2\text{O}_2/\text{L}}{\text{mg Fe}^{+2}/\text{L}}$

Intensidad de radiación solar-UV:4 Watts

## VI. DISCUSION DE RESULTADOS

### 6.1 Contrastación y demostración de la hipótesis con los resultados

#### Hipótesis General

Luego del tratamiento de los datos experimentales se pudo comprobar que varios de los coeficientes del modelo son diferentes de cero, por lo tanto consideramos como válida la hipótesis

$$H_1 \rightarrow \beta_j \neq 0$$

Que implica que varias variables del proceso son importantes para el tratamiento de aguas residuales

#### Interpretación

Los experimentos fueron llevados a cabo mediante el diseño experimental Box Benhken con dos réplicas. Este diseño experimental fue escogido porque optimiza proceso.

La demanda química de oxígeno experimental, las calculadas con las ecuaciones de predicción y los residuos obtenidos empleando software, en la tabla 17

**Tabla 17***Diseño experimental optimizado*

N°	Orden	Corrida	Tipo	Bloques	Tiempo (m)	Fe (mg/L)	H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> (mg/L)	Concentración Bix
2	15	2	0	1	20	40	318	3,6
3	7	3	2	1	10	40	477	4,0
4	2	4	2	1	30	20	318	4,3
5	14	5	0	1	20	40	318	2,5
6	9	6	2	1	20	20	159	5,7
7	5	7	2	1	10	40	159	5,4
8	13	8	0	1	20	40	318	5,0
9	8	9	2	1	30	60	477	5,5
10	3	10	2	1	10	60	318	6,5
11	12	11	2	1	20	60	477	6,0
12	1	12	2	1	10	20	318	4,4
13	4	13	2	1	30	60	318	4,2
14	6	14	2	1	30	40	159	4,9
15	10	15	2	1	20	60	159	5,0

Welcome to Minitab, press F1 for help.

**Box-Behnken Design**

Factors: 3      Replicates: 1  
Base runs: 15      Total runs: 15  
Base blocks: 1      Total blocks: 1

Center points: 3

|  
 Welcome to Minitab, press F1 for help.  
 Retrieving project from file:  
 'C:\Users\Administrador\Documents\trabsix.MPJ'

## Response Surface Regression: Conc Bix versus tiempo, Fe, H2O2

### Analysis of Variance

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Model	9	9.3140	1.03489	1.05	0.505
Linear	3	1.1700	0.39000	0.40	0.761
tiempo	1	0.2450	0.24500	0.25	0.639
Fe	1	0.8450	0.84500	0.86	0.396
H2O2	1	0.0800	0.08000	0.08	0.787
Square	3	4.9340	1.64467	1.67	0.286
tiempo*tiempo	1	0.5192	0.51923	0.53	0.500
Fe*Fe	1	2.2177	2.21769	2.26	0.193
H2O2*H2O2	1	2.8269	2.82692	2.88	0.151
2-Way Interaction	3	3.2100	1.07000	1.09	0.434
tiempo*Fe	1	1.2100	1.21000	1.23	0.317
tiempo*H2O2	1	1.0000	1.00000	1.02	0.359
Fe*H2O2	1	1.0000	1.00000	1.02	0.359
Error	5	4.9100	0.98200		
Lack-of-Fit	3	1.7700	0.59000	0.38	0.784
Pure Error	2	3.1400	1.57000		
Total	14	14.2240			

### Model Summary

S	R-sq	R-sq(adj)	R-sq(pred)
0.990959	65.48%	3.35%	0.00%

### Coded Coefficients

Term	Effect	Coef	SE Coef	T-Value	P-Value	VIF
Constant		3.700	0.572	6.47	0.001	
tiempo	-0.350	-0.175	0.350	-0.50	0.639	1.00
Fe	0.650	0.325	0.350	0.93	0.396	1.00
H2O2	-0.200	-0.100	0.350	-0.29	0.787	1.00
tiempo*tiempo	0.750	0.375	0.516	0.73	0.500	1.01
Fe*Fe	1.550	0.775	0.516	1.50	0.193	1.01
H2O2*H2O2	1.750	0.875	0.516	1.70	0.151	1.01
tiempo*Fe	-1.100	-0.550	0.495	-1.11	0.317	1.00
tiempo*H2O2	1.000	0.500	0.495	1.01	0.359	1.00
Fe*H2O2	1.000	0.500	0.495	1.01	0.359	1.00

### Regression Equation in Uncoded Units

$$\begin{aligned}
 \text{Conc Bix} = & 13.50 - 0.158 \text{ tiempo} - 0.134 \text{ Fe} - 0.0352 \text{ H2O2} + 0.00375 \text{ tiempo*tiempo} \\
 & + 0.00194 \text{ Fe*Fe} + 0.000035 \text{ H2O2*H2O2} - 0.00275 \text{ tiempo*Fe} + 0.000314 \text{ tiempo*H2O2} \\
 & + 0.000157 \text{ Fe*H2O2}
 \end{aligned}$$

Debido a que la concentración de colorantes de agua residual es muy baja en la práctica el método de tratamiento foto Fenton no tiene mayor influencia en reducción adicional de colorantes

## Response Optimization: Conc Bix

### Parameters

Response	Goal	Lower	Target	Upper	Weight	Importance
Conc Bix	Minimum		2.5	6.5	1	1

### Solution

Solution	tiempo	Fe	H2O2	Conc Bix Fit	Composite Desirability
1	19.0909	34.1414	345.303	3.65133	0.712166

### Multiple Response Prediction

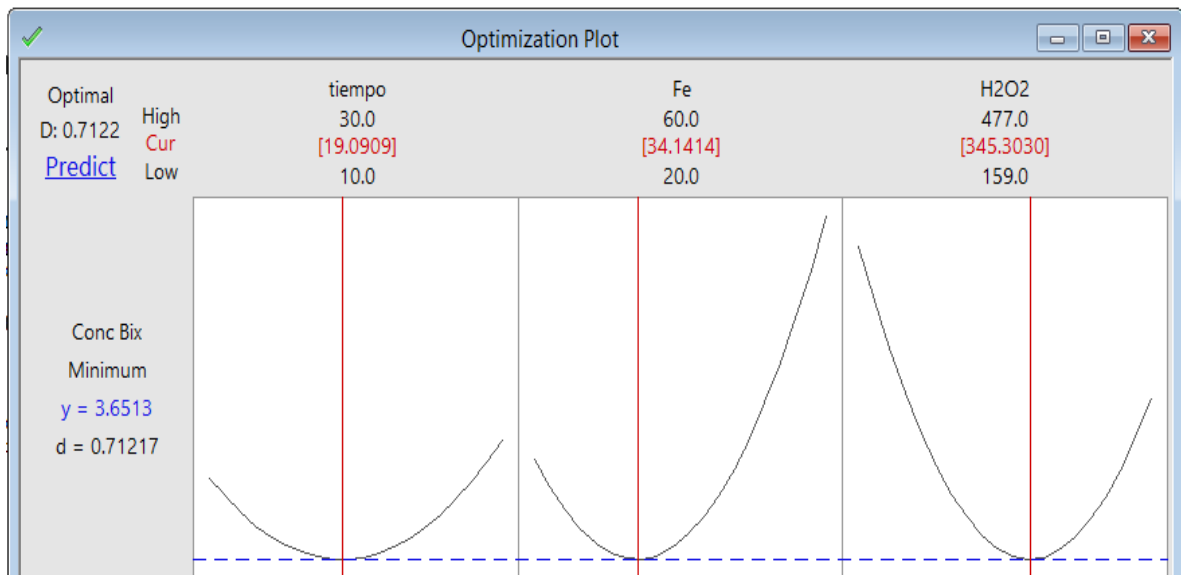
Variable	Setting
tiempo	19.0909
Fe	34.1414
H2O2	345.303

Response	Fit	SE Fit	95% CI	95% PI
Conc Bix	3.651	0.553	(2.231, 5.072)	(0.735, 6.568)

## Optimization Plot

**Figura 20**

*Grafico Optimizado*



## 6.2 Contrastación con otros resultados con otros estudios similares

- Los resultados del trabajo de investigación sobre la reducción de sulfatos de acuerdo al método químico usado se lograron reducir la presencia de sulfatos en las aguas residuales de colorantes naturales en comparación con el estudio desarrollado por Xiaoce, *et al* (2019) desarrollaron un proceso de recuperación de Al mediante eliminación de sulfatos por precipitación de etringita la recuperación del Al fue superior al 98,4% a pH 3. Lo mismo estudio Germishuizen (2018) la reacción de precipitación de etringita
- La precipitación de etringita para la reducción de niveles de sulfato en el agua tratada y son los procesos SAVMIN y CESR. Estos procesos han sido desarrollados para aguas que tienen concentraciones de sulfato >2000 mg/L. Ambos métodos incorporan la precipitación de metales y sulfato de Calcio como etapas de tratamiento preliminares. INAP (2003)
- El proceso foto Fenton presenta mayores porcentajes de remoción de la demanda química de oxígeno que la fotólisis. según el la investigación realizado por Salazar y Ortega (2017) redujo el 98.12% de la DQO y el de Aquino (2017) el 86,20% aplicando el proceso fotofenton; mientras que el presente estudio sólo removió el 76 % de la DQO con la fotólisis. En este caso la diferencia básicamente se debe al empleo de reactivos químicos como el sulfato de hierro ( $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ ) y peróxido de hidrógeno ( $\text{H}_2\text{O}_2$ ) durante el proceso foto Fenton.

## 6.3 Responsabilidad ética

El trabajo realizado cumple con lo estipulado en el código de ética de investigación de la universidad nacional del Callao, resolución N° 210-2017-CU.

Los resultados son los encontrados ya que las pruebas experimentales se realizó en tiempo presencial en otras circunstancia no hubiera podido desarrollar ya que se requieren equipos para los análisis.

## CONCLUSIONES

El estudio realizado se concluye lo siguiente:

- Se realizó la caracterización de las aguas residuales de colorantes naturales en sus características físicas pH=11,9; T°C 24,9 DQO=1,000 mg O<sub>2</sub>/L) y sulfatos 18 000 mg/L en comparación con los efluentes industriales pH:11,3; T°C 25,3 y DQO:2 500 mg O<sub>2</sub>/L; Sulfatos 8 000 mg/L.
- Se determinó las condiciones óptimas del proceso de tratamiento son: relación reactivos Fenton=18,8 (mg H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>/mg Fe<sup>+2</sup>)/L y pH=3 en medio ácido y tiempo de tratamiento=5h y los resultados de DQO=10 mg O<sub>2</sub>/L, teniéndose condiciones adecuadas de tratamiento.
- Se determinaron los parámetros óptimos que permite reducir el contenido de (SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>) de las aguas residuales después del tratamiento químico con pH óptimos: 10,5 y 11,5, tiempo de residencia: 45 minutos y la Dosificación de agente precipitante: 45,5/L g CaO y 24,8 g/L Al(OH)<sub>3</sub>.
- De acuerdo a la adecuación de los métodos foto Fenton y químico para reducir a los Valores Máximos Admisibles - VMA de DQO y (SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>) de las aguas residuales de colorantes naturales, se logró reducir DQO <7 mg O<sub>2</sub>/L y Sulfatos de logro reducir a 800 mg/L por lo que se cumple con los VMA establecidas en el D.S 010-2019-Vivienda y se puede descargar a la red de alcantarillado sin ningún problema.

## RECOMENDACIONES

- La utilización de radiación solar como fuente de energía para el proceso foto-Fenton minimiza los costos de energía eléctrica por no utilizar lámparas y puede ser empleada tanto en días soleados como nublados, para reducir el DQO de las aguas residuales de la industria de colorantes naturales.
- Se puede ampliar para aplicaciones de otros tipos de aguas residuales y en combinación con otras técnicas de tratamiento, por ejemplo biológicos.
- Para el tratamiento de Sulfatos se debe utilizar otros métodos ya que es costosos por los reactivos que se usan y por otro lado generan lodos como residuos.



## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Aquino Tacza, A. (2017). *Tratamiento de aguas residuales de la industria textil artesanal por fotocátalisis homogénea y heterogénea*. Huancayo-Perú: Universidad Nacional del Centro del Perú.
- Andreozzi R., Caprio V., Insola A., Martota R. (1999) Advanced oxidation processes (AOP) for Water purification and recovery. *Catalysis Today* 53, 51-59.
- Barrios-Ziolo, L; Gaviria-Restrepo, L; Agudelo, E & Cardona-Gallo, S. Tecnologías para la remoción de colorantes y pigmentos presentes en aguas residuales. Una revisión. *DYNA*, Volumen 82, Número 191, p. 118-126, 2015. <https://doi.org/10.15446/dyna.v82n191.42924>
- Biglari H, Kord Mostafapour F, Joneidi Jafari A. Bazrafshan E. Removal of Humic acid from environmental aqueous by Fenton Oxidation Process. *Khorasan Univ Med Sci*. 2013;5(1):37-45.
- Bowel, R.J. 2000. Sulphate and salt minerals: The problem of treating mine waste. *Mining environmental Management*. Consulta a las redes internacionales (consultada el 29 de Marzo, 2016): del sitio web. <http://www.srk.co.uk/pdfs/sulphat1.pdf>
- Domenech X., Jardim W., Litter M. (2001) Procesos avanzados de oxidación para la eliminación de contaminantes, en *Eliminación de contaminantes por fotocátalisis heterogénea*. Blesa M. Editor. CYTED, La Plata, Argentina, 3-26.
- Enríquez, F (2020). *Propuesta para la implementación de una planta de tratamiento de aguas residuales industriales en una empresa agroindustrial, Arequipa – 2020*-Tesis de Grado. Universidad Nacional de San Agustín Arequipa.
- Germishuizen, Franzsen, Grobler, Simate, y Sheridan. Case study modelling for an ettringite treatment process. *Industrial and Mining Water Research Unit, School of Chemical and Metallurgical Engineering, University of the Witwatersrand, Johannesburg, South Africa Water SA* Vol. 44 No. 1 January 2018. Del sitio web <http://dx.doi.org/10.4314/wsa.v44i1.10>.

- Herrera, S (2015). Detoxificación fotolítica solar para la reducción de niveles de concentración de compuestos orgánicos persistentes de aguas residuales textiles. Tesis para optar el grado académico de doctora en medio ambiente y desarrollo sostenible. UNFV-Lima Perú.
- INAP. Lorax Report. (2003) Treatment of Sulphate in Mine effluents.
- Jones y Nachtsheim (2011). "A Class of Three-Level Designs for Definitive Screening in the Presence of Second-Order Effects". Journal of Quality Technology. Vol. 43, No. 1, January 2011.
- Kuhel (2001). Diseño de Experimentos: Principios estadísticos para el Diseño y análisis de Investigaciones. 2da Ed.
- Malato S., Blanco J., Vidal A., Richter C. (2002) Photocatalysis with solar energy at a pilot-plant scale: an overview . *Applied Catalysis B: Environmental* 37, 1-15.
- Mahmoodi N, Rayat-Tari K, Borhany, Arami M, Nourmohammadian F. Decolorization of colored wastewater containing azo acid dye using photo-fenton process: Operational parameters and a comparative study. *J Color Sci Tech.* 2008; 2(1):31-40.
- Mark A. Reinsel. A new process for sulfate removal from industrial waters. 1999.
- Morales, E (2016). *Remoción de sulfatos del efluente del sistema de refrigeración de una central termoeléctrica de ciclo combinado mediante la precipitación química de la Etringita*. Tesis de Grado. Universidad Nacional de Ingeniería. Lima
- Ortega, B.F & Chancafe C. R. (2021). *Remoción de fosfatos y materia orgánica mediante los métodos fotoquímico y biológico a nivel de laboratorio para el tratamiento de aguas residuales municipales de Huanta-Ayacucho*. Callao-Perú: Universidad Nacional del Callao. TESIS PARA OPTAR EL GRADO ACADÉMICO DE MAESTRO EN INGENIERÍA QUÍMICA

- Pacheco-Gutiérrez *et al.*, 2007. *Uso de agua en la industria minera. Parte 2. Estudio de Opciones para reciclar el agua de proceso.* Tecnología, ciencia, educación, Vol 22, núm 1. Disponible en <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=48222103>
- Payes, E. (2017) Obtención y caracterización fisicoquímica del extracto colorante del achiote (*Bixa orellana L.*) a nivel laboratorio. Tesis para obtener el título de Ingeniero Químico. Universidad de San Carlos de Guatemala.
- Ping *et al.*, 2018. *Eliminación de iones de sulfato de alta concentración de las aguas residuales de FGD de álcali sódico mediante el método de precipitación de etringita: evaluación de factores, viabilidad y perspectiva.* Journal of Chemistry. disponible en <https://doi.org/10.1155/2018/1265168>
- Quispe, S. (2019) Evaluación de los parámetros de extracción de la norbixina a partir de las semillas de achiote (*Bixa orellana L.*) tesis para optar el título profesional de Ingeniero Agroindustrial. Universidad Nacional de San Cristobal de Huamanga. Ayacucho.
- Sánchez, S.(2019) Extracción de bixina de tres variedad de achiote (*Bixina Orellana L.*) utilizando tres solventes. Tesis para optar el profesional de Ingeniería Agroindustrial. Tarapoto.
- Salazar, S. A., & Ortega, B. F. (2018). *Implementación del proceso Fotofenton para degradar contaminantes orgánicos persistentes de efluentes residuales textiles mediante el uso de los colectores parabólicos compuestos.* Callao-Perú: Universidad Nacional del Callao.
- Sanz, F (2015). Tratamiento de aguas residuales textiles industriales mediante fotocatalisis solar y reutilización en nuevas tinturas.Universidad Politencia de Valencia – España.
- Suschka J., & Przywara, L (2003) Chemical and Biological Sulfates Removal University of Bielsko-Biała. 43-309 Bielsko-Biała, ul Willowa 2, Poland. The European Pollutant Emission Register (S/A)

Tolonen ET, Hu T, Rämö J, Lassi U. The removal of sulphate from mine water by precipitation as ettringite and the utilisation of the precipitate as a sorbent for arsenate removal. J Environ Manage. 2016 Oct.

Xiaoce, Zhen, Yi , Lu-Man, Xiaodan, Ying. A novel sulfate removal process by ettringite precipitation with aluminum recovery: Kinetics and a pilot-scale study. Journal of Hazardous Materials 365 (2019) 572–580. Del sitio [web  
https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0304389418310513?via%3Dihub](https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0304389418310513?via%3Dihub)

### **NORMAS LEGALES**

Decreto Supremo que aprueba el Reglamento de Valores Máximos Admisibles (VMA) para las descargas de aguas residuales no domésticas en el sistema de alcantarillado sanitario D.S N° 010-2019-VIVIENDA

## ANEXOS: MATRIZ DE CONSISTENCIA

PROBLEMA PRINCIPAL	OBJETIVO GENERAL	HIPOTESIS GENERAL	VARIABLE	DIMENSIONES	INDICADORES	METODO DE RECOL. DE DATOS
¿En cuánto la adecuación de los métodos foto Fenton y químico reducirán a los Valores Máximos Admisibles - VMA de DQO y sulfatos (SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> ) de las aguas residuales de colorantes naturales?	Adecuar los métodos foto Fenton y químico para reducir a los Valores Máximos Admisibles - VMA de DQO y (SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> ) de las aguas residuales de colorantes naturales.	La adecuación de los métodos foto Fenton y químico reduce significativamente a valores máximos admisibles la DQO y (SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> ) de las aguas residuales de colorantes naturales	<b>V. INDEPEN</b> El Método foto Fenton	Parámetros de operación.	1. Relación de reactivos Fenton: 10, 17,5 y 25. H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> /Fe <sup>+2</sup> <u>mg H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>/L</u> mg Fe <sup>+2</sup> /L 2. pH[-log H <sup>+</sup> ]: Rango pH 2, 3 y .4 3. Intensidad de radiación-UV	1. Proporción de reactivos Fenton previamente preparada. 2. pH metro 3. Lámparas de potencia definida
			<b>V. INDEPEN</b> El Método Químico	Parámetros de operación.	1. pH 2. Concentración del agente de precipitación 3. Tiempo de residencia	1. pH metro 2. Análisis de sulfatos con equipo espectro quant move 100 3. Cronometro
SUB-PROBLEMAS	OBJETIVOS ESPECIFICOS	HIPOTESIS ESPECIFICAS	V. DEPENDIENTE	DIMENSIONES	INDICADORES	METODO DE RECOL. DE DATOS
¿Qué características físico químicas presentan las aguas residuales de colorantes naturales?	Caracterizar las aguas residuales residuales de colorantes naturales	Las características físico químicas de las aguas residuales de colorantes naturales superan los Valores Máximos Admisibles	Parámetros químicos	Parámetros de operación	pH DQO (mg/L) (SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> ) (mg/L)	Potenciométrico Equipo de medición
¿Cuáles son los parámetros óptimos que permiten reducir el contenido de (SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> ) de las aguas residuales de colorantes naturales después del tratamiento químico?	Determinar los parámetros óptimos que permite reducir el contenido de (SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> ) de las aguas residuales después del tratamiento químico.	Los parámetros óptimos pH:10,5 y 11,5 tiempo de residencia: 40-60 minutos Dosificación de agente precipitante (mg/L)	Contenido de (SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> ) en el agua tratada	Parámetros de operación	(SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> ) (mg/L)	Análisis de sulfatos con equipo espectro quant move 100.
¿Cuáles son los parámetros que permiten reducir el DQO de las aguas residuales después del tratamiento foto Fenton?	Determinar los parámetros óptimos que permite reducir el contenido de DQO de las aguas residuales después del tratamiento foto Fenton	Los parámetros son: Relación de reactivos Fenton: 10, 17,5 y 25. H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> /Fe <sup>+2</sup> <u>mg H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>/L</u> mg Fe <sup>+2</sup> /L pH[-log H <sup>+</sup> ]: Rango pH 2, 3 y 4 Intensidad de radiación-UV	Valor de DQO en el agua tratada	Parámetros de operación	DQO (mg O <sub>2</sub> /L)	Espectrofotométrico UV Vis.