

UNIVERSIDAD NACIONAL DEL CALLAO
FACULTAD DE INGENIERÍA QUÍMICA
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA QUÍMICA



TESIS

**“REMOCIÓN DE SULFATOS DEL EFLUENTE DEL LAVADOR
DE GASES DE UNA PLANTA DE SULFONACIÓN MEDIANTE
PRECIPITACIÓN DE ETRINGITA”**

**PARA OPTAR EL TITULO PROFESIONAL DE
INGENIERO QUÍMICO**

PRESENTADO POR

**CANDIOTTI VELÁSQUEZ SANDY LIZBETH
VENTURA VEGA DAVID ANDERSON**

ASESOR

ING° CARMEN AVELINO CARHUARICRA

CALLAO – DICIEMBRE – 2018

PERÚ

PRÓLOGO DEL JURADO

La presente Tesis fue Sustentada por los Bachilleres **CANDIOTTI VELÁSQUEZ SANDY LIZBETH** y **VENTURA VEGA DAVID ANDERSON** ante el **JURADO DE SUSTENTACIÓN DE TESIS** conformado por los siguientes Profesores Ordinarios:

ING° JULIO CÉSAR CALDERÓN CRUZ	PRESIDENTE
ING° MARÍA ESTELA TOLEDO PALOMINO	SECRETARIA
Lic. VICTORIA YSABEL ROJAS ROJAS	VOCAL
ING° CARMEN GILDA AVELINO CARHUARICRA	ASESORA

Tal como está asentado en el Libro de Actas N° 1 de Tesis con Ciclo de Tesis Folio N° 48 y Acta N° 47 de fecha **VEINTISIETE DE NOVIEMBRE DE 2018**, para optar el Título Profesional de Ingeniero Químico en la Modalidad de Titulación de Tesis con Ciclo de Tesis, de conformidad establecido por el Reglamento de Grados y Títulos aprobado con Resolución N° 309–2017–CU de fecha 24 de octubre de 2017 y su Cuarta Disposición Transitoria.

DEDICATORIA

A mis padres, Rómulo Candiotti y Ana Velásquez, por su enorme amor, apoyo incondicional durante toda mi vida, por su paciencia y acompañamiento a lo largo de este proyecto y por siempre impulsarme a crecer como persona y profesional.

DEDICATORIA

Dedico esta tesis a mis padres, Doris y Alberto, por darme todo su cariño, aliento y creer en mi capacidad durante todo este camino y por hacerme sentir orgulloso de ser su hijo.

AGRADECIMIENTO

A Dios, por guiar mi vida y darme la oportunidad de culminar mis estudios superiores.

A mi buen amigo, Dr. Luis Carrasco Venegas, por sus enseñanzas en mi etapa universitaria, por la amistad, consejos y su trato amable y respetuoso.

A mi gran amiga, Dina Gonzales, por el apoyo incondicional al brindarme los insumos que necesitaba para la realización de esta tesis y por su valiosa amistad.

AGRADECIMIENTO

A la facultad de Ingeniería Química de la Universidad Nacional del Callao, que gracias a sus docentes consolidaron en mí las bases para ser un buen profesional.

A mi amigo, Lucio Osorio, por sus consejos, apoyo incondicional y alegría que formaron parte del inicio de mi vida universitaria.

ÍNDICE

RESUMEN	7
ABSTRACT	8
INTRODUCCIÓN	9
I. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	10
1.1. Descripción de la realidad problemática.....	10
1.2. Formulación del problema.....	10
1.2.1. Problema general	10
1.2.2. Problemas específicos	11
1.3. Objetivos.....	11
1.3.1. Objetivo general	11
1.3.2. Objetivos específicos	11
1.4. Limitantes de la investigación.....	11
II. MARCO TEÓRICO	13
2.1. Antecedentes.....	13
2.2. Bases teóricas.....	15
2.2.1. Proceso de remoción.....	15
2.2.2. Precipitación química	15
2.3. Marco conceptual.....	26
2.3.1. Efluentes.....	26
2.3.2. Efluentes industriales	27
2.3.3. Planta de sulfonación	29
2.3.4. La etringita.....	33
2.4. Marco teórico – conceptual.....	37
2.4.1. Tratamiento de efluentes industriales	37
2.4.2. Remoción de sulfatos en procesos industriales	38
2.4.3. Precipitación de etringita	46
2.5. Normatividad.....	47
2.5.1. Valores máximos admisibles	47
2.5.2. Importancia ambiental y sanitaria de los sulfatos	47
2.6. Definición de términos básicos.....	48
III. HIPÓTESIS Y VARIABLES	51
3.1. Hipótesis.....	51

3.1.1.	Hipótesis general	51
3.1.2.	Hipótesis específicas.....	51
3.2.	Variables.....	51
3.2.1.	Definición de variables	51
3.2.2.	Operacionalización de variables	51
IV.	METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN	53
4.1.	Tipo y diseño de la investigación.....	53
4.1.1.	Tipo de investigación.....	53
4.1.2.	Diseño de la investigación	53
4.2.	Población y muestra.....	55
4.3.	Técnicas e instrumentos para la recolección de la información de campo.....	55
4.3.1.	Materiales y equipos.....	55
4.3.2.	Obtención de muestras	66
4.3.3.	Determinación de las características fisicoquímicas del efluente	67
4.3.4.	Precipitación de etringita	68
4.3.5.	Determinación del porcentaje de remoción	71
4.3.6.	Determinación de las características del lodo de etringita.....	71
4.4.	Análisis y procesamiento de datos.....	72
V.	RESULTADOS	74
5.1.	Resultados descriptivos.....	74
5.1.1.	Características fisicoquímicas del efluente	74
5.1.2.	Concentración final de sulfatos al variar la razón másica Pac HB:SO₄²⁻.....	74
5.1.3.	Porcentaje de remoción al variar la razón másica Pac HB: SO₄²⁻	75
5.1.4.	pH al variar la razón másica de Pac HB:SO₄²⁻	78
5.1.5.	Lodo generado al variar la razón másica de Pac HB: SO₄²⁻	78
5.1.6.	Concentración final de sulfatos al variar la concentración de cal.....	81
5.1.7.	Porcentaje de remoción al variar la concentración de cal	81
5.1.8.	pH al variar la concentración de cal	84
5.1.9.	Lodo generado al variar la concentración de cal.....	85
5.1.10.	Caracterización del lodo de etringita.....	86

5.2. Resultados inferenciales.....	87
5.2.1. Tiempo de reacción	87
5.3. Técnicas estadísticas para análisis de datos.....	88
VI. DISCUSIÓN DE RESULTADOS.....	95
6.1. Contrastación de la hipótesis.....	95
6.2. Contrastación de los resultados con estudios similares.....	96
6.3. Responsabilidad ética.....	96
VII. CONCLUSIONES.....	97
VIII. RECOMENDACIONES.....	98
ANEXOS.....	103
ANEXO A1 MATRIZ DE CONSISTENCIA.....	104
ANEXO A2 GUÍA DE SALIDA DEL EFLUENTE DEL LAVADOR DE GASES.....	105
ANEXO A3 HOJA TÉCNICA DE PAC PANTERA HB.....	106
ANEXO A4 HOJA DE DATOS DE SEGURIDAD DE PAC PANTERA HB.....	107
ANEXO A5 HOJA TÉCNICA DE ARIFLOC C606	110
ANEXO A6 SISTEMA DE CONTROL DE LA PLANTA DE SULFONACIÓN	111

ÍNDICE DE TABLAS

TABLA N° 2.1	Solubilidades de algunos alcoholes en agua y hexano	20
TABLA N° 2.2	Productos de solubilidad de algunos compuestos iónicos ligeramente solubles a 25°C	25
TABLA N° 2.3	Características de efluentes cloacales e industriales	28
TABLA N° 2.4	Valores máximos admisibles (VMA)	49
TABLA N° 3.1	Operacionalización de variables	52
TABLA N° 4.1	Determinación de la razón másica Pac HB:SO ₄ ²⁻	70
TABLA N° 4.2	Determinación de la concentración de cal	71
TABLA N° 5.1	Características fisicoquímicas del efluente	74
TABLA N° 5.2	Razón másica Pac HB:SO ₄ ²⁻ vs. concentración final de sulfatos	74
TABLA N° 5.3	Razón másica Pac HB:SO ₄ ²⁻ vs. % remoción	76
TABLA N° 5.4	Efecto de la razón másica Pac HB:SO ₄ ²⁻	77
TABLA N° 5.5	Razón másica Pac HB:SO ₄ ²⁻ vs. pH	78
TABLA N° 5.6	Razón másica Pac HB:SO ₄ ²⁻ vs. masa de lodo	80
TABLA N° 5.7	Concentración de cal vs. concentración final de sulfatos	81

TABLA N° 5.8	Concentración de cal vs. % remoción	89
TABLA N° 5.9	Efecto de la concentración de cal	83
TABLA N° 5.10	Concentración de cal vs. pH	84
TABLA N° 5.11	Concentración de cal vs. masa de lodo	86
TABLA N° 5.12	Caracterización del lodo de etringita	87
TABLA N° 5.13	Estadísticos descriptivos razón másica	89
TABLA N° 5.14	Estadísticos descriptivos concentración de cal	90
TABLA N° 5.15	Correlación razón másica	90
TABLA N° 5.16	Correlación concentración de cal	93

ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA N° 2.1	Precipitación de yoduro de plomo	17
FIGURA N° 2.2	Precipitación de iones	18
FIGURA N° 2.3	Solubilidades de varios compuestos iónicos en agua en función de la temperatura	21
FIGURA N° 2.4	Efecto de la presión sobre la solubilidad de un gas	22
FIGURA N° 2.5	Solución sobresaturada de acetato de sodio	23
FIGURA N° 2.6	Efluente industrial	30
FIGURA N° 2.7	Diagrama de bloques del proceso de sulfonación	31
FIGURA N° 2.8	Lavador de gases	33
FIGURA N° 2.9	Etringita	34
FIGURA N° 2.10	Mecanismo de floculación	38
FIGURA N° 2.11	Planta de ósmosis inversa	43
FIGURA N° 2.12	Representación esquemática de resinas intercambiadoras de cationes y aniones	44
FIGURA N° 3.1	Definición de variables	52
FIGURA N° 4.1	Diseño de la investigación	54
FIGURA N° 4.2	Determinación de caudal del efluente	56
FIGURA N° 4.3	Efluente del lavador de gases	56
FIGURA N° 4.4	Reactor	57
FIGURA N° 4.5	Tanque de homogenización y almacenamiento	58
FIGURA N° 4.6	Pac HB	59
FIGURA N° 4.7	Cal viva	59

FIGURA N° 4.8	Floculante	60
FIGURA N° 4.9	Buffers	60
FIGURA N° 4.10	Equipo de flotación Denver	61
FIGURA N° 4.11	Impulsor de celda de flotación	62
FIGURA N° 4.12	Difusor	62
FIGURA N° 4.13	pHmetro portátil	63
FIGURA N° 4.14	Estufa	63
FIGURA N° 4.15	Balanza electrónica	64
FIGURA N° 4.16	Agitador mecánico	65
FIGURA N° 4.17	Sistema de filtración	65
FIGURA N° 4.18	Obtención de muestras	66
FIGURA N° 4.19	Lectura de pH	68
FIGURA N° 4.20	Formación de etringita en el reactor	69
FIGURA N° 4.21	Adición de lodo a la cámara de filtración	72
FIGURA N° 4.22	Torta de etringita	73
FIGURA N° 5.1	Lodo generado al variar la razón másica Pac HB: SO_4^{2-}	79
FIGURA N° 5.2	Lodo generado al variar la concentración de cal	86
FIGURA N° A.1	Zona de secado	111
FIGURA N° A.2	Zona de generación de SO_3	111
FIGURA N° A.3	Zona de sulfonación	112
FIGURA N° A.4	Zona de envejecimiento y estabilización	112
FIGURA N° A.5	Zona de tratamiento de gases 1	113
FIGURA N° A.6	Zona de tratamiento de gases 2	113
FIGURA N° A.7	Zona de almacenamiento y dosificación de azufre	114

ÍNDICE DE GRÁFICOS

GRÁFICO N° 5.1	Razón másica Pac HB: SO_4^{2-} vs. concentración final de sulfatos	75
GRÁFICO N° 5.2	Razón másica Pac HB: SO_4^{2-} vs. % remoción	76
GRÁFICO N° 5.3	Razón másica Pac HB: SO_4^{2-} vs. concentración final de Sulfatos y % remoción	77
GRÁFICO N° 5.4	Razón másica Pac HB: SO_4^{2-} vs. pH	79
GRÁFICO N° 5.5	Razón másica Pac HB: SO_4^{2-} vs. masa de lodo	80

GRÁFICO N° 5.6	Concentración de cal vs. concentración final de sulfatos	82
GRÁFICO N° 5.7	Concentración de cal vs. % remoción	83
GRÁFICO N° 5.8	Concentración de cal vs. concentración final de sulfatos y % remoción	84
GRÁFICO N° 5.9	Concentración de cal vs. pH	85
GRÁFICO N° 5.10	Concentración de cal vs. masa de lodo	87
GRÁFICO N° 5.11	pH, tiempo de reacción y razón másica Pac HB: SO_4^{2-}	88
GRÁFICO N° 5.12	pH, tiempo de reacción y concentración de cal	89
GRÁFICO N° 5.13	Correlación razón másica	91
GRÁFICO N° 5.14	Correlación razón másica y % remoción	92
GRÁFICO N° 5.15	Correlación concentración de cal	93
GRÁFICO N° 5.16	Correlación concentración de cal y % remoción	94

RESUMEN

El presente trabajo se realizó con el propósito de remover los sulfatos del efluente del lavador de gases de una planta de sulfonación que es descargado al alcantarillado sin previo tratamiento.

Se analizó del efluente las características fisicoquímicas de nuestra importancia: concentración de iones sulfatos y pH, mostrando resultados de 25 535 ppm y 8,03 respectivamente. La concentración de iones sulfatos es muy elevada referente a los valores máximos admisibles, es por ello que surge la necesidad de identificar un método para su remoción.

Para remover los sulfatos del efluente del lavador de gases de una planta de sulfonación, empleamos un método químico que se da mediante la precipitación de etringita, el cual emplea Pac (Policloruro de aluminio) y cal como reactivos.

Se emplearon distintas razones másicas de Pac HB:SO_4^{2-} y concentraciones de cal para determinar las condiciones óptimas de lograr el mayor porcentaje de remoción, siendo estas una razón másica Pac HB:SO_4^{2-} de 8 y una concentración de cal de 40 977 ppm, con lo cual se logró reducir la concentración de sulfatos a 10 579,5 ppm, es decir un porcentaje de remoción del 58,6%

Palabras Claves: Remoción, Precipitación, Etringita.

ABSTRACT

The present work was carried out with the purpose of removing the sulphates from the effluent of the scrubber of a sulphonation plant that is discharged to the sewage system without previous treatment.

The physicochemical characteristics of our importance were analyzed from the effluent: concentration of sulfate ions and pH, showing results of 25 535 ppm and 8,03 respectively. The concentration of sulphate ions is very high referring to the maximum admissible values, that is why the need arises to identify a method for their removal.

To remove the sulphates from the scrubber effluent from a sulphonation plant, we use a chemical method that is obtained by the precipitation of ettringite, which uses Pac (aluminum polychloride) and lime as reagents.

Different mass ratios of Pac HB:SO_4^{2-} and lime concentrations were used to determine the optimum conditions to achieve the highest percentage of removal, these being a mass ratio Pac HB:SO_4^{2-} of 8 and a lime concentration of 40 977 ppm, with which was achieved by reducing the sulphate concentration to 10 579,5 ppm, that is, a removal percentage of 58,6%

Key Words: Removal, Precipitation, Ettringite.

INTRODUCCIÓN

Remover sulfatos es uno de los principales problemas en el tratamiento de efluentes de diferentes sectores industriales, debido a su alta solubilidad en el agua e ineficiencia de los tratamientos existentes para su remoción.

Los tratamientos convencionales remueven sulfatos utilizando cal, sin embargo, no es aceptable debido a la rápida saturación del yeso en el agua dejando al efluente con una concentración de sulfatos superior a los valores máximos admisibles.

Ante esta problemática han surgido muchas alternativas para remover sulfatos, como por ejemplo Moreno Monge Nuria en el 2014 aplicó la técnica de precipitación de etringita para la eliminación de sulfatos en los efluentes generados en Industrias Químicas del Ebro.

Para el presente trabajo se utilizó la precipitación de etringita como tecnología para la remoción de sulfatos del efluente del lavador de gases de una planta de sulfonación, para ello primero se conoció las características fisicoquímicas del efluente del lavador de gases, en especial el pH y la concentración de sulfatos; luego se determinó las condiciones óptimas para lograr la precipitación de etringita y se calculó el porcentaje de remoción.

I. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

1.1. Descripción de la realidad problemática

El proceso de sulfonación se da lugar en un reactor multitubular, donde ingresa el gas SO_3 y el LAB para formar el ácido sulfónico. El LAB es enviado desde los tanques de almacenamiento al reactor multitubular y el azufre fundido es reaccionado con aire seco en un horno para formar gas SO_2 y luego convertirlo a gas SO_3 en una torre de conversión. Los gases no reaccionados de SO_3 y no convertidos de SO_2 son transportados a un lavador de gases donde se neutralizan empleando solución de soda para posteriormente ser emitidos al medio ambiente.

La reacción dentro del lavador de gases da lugar a la formación de sulfitos y sulfatos que son vertidos al drenaje. La concentración de sulfatos se encuentra fuera de los valores máximos admisibles (VMA) lo que convierte a esta planta de sulfonación en una planta no comprometida con el cuidado del medio ambiente.

Existen valores máximos admisibles (VMA) que hacen referencia al valor de la concentración de elementos, sustancias o parámetros físicos y/o químicos, que caracterizan a un efluente no doméstico que va a ser descargado a la red de alcantarillado sanitario, que al ser excedido en sus parámetros causa daño inmediato o progresivo a las instalaciones, infraestructura sanitaria, tratamiento de aguas residuales y tiene influencias negativas en los procesos de tratamiento de aguas residuales.

La precipitación de la etringita es una tecnología poco utilizada a nivel industrial debido a la poca investigación del método, a pesar de ser económica y simple de operar. Permite obtener alto porcentajes de remoción de sulfatos presentes en efluentes.

1.2. Formulación del problema

1.2.1. Problema general

¿Cómo remover los sulfatos del efluente del lavador de gases de una planta de sulfonación mediante precipitación de etringita?

1.2.2. Problemas específicos

- 1) ¿Cuáles son las características fisicoquímicas del efluente del lavador de gases de una planta de sulfonación?
- 2) ¿Cuáles son las condiciones óptimas para lograr la precipitación de etringita?
- 3) ¿Cuáles son las características fisicoquímicas del efluente del lavador de gases de una planta de sulfonación después de la precipitación de etringita?

1.3. Objetivos

1.3.1. Objetivo general

Remover los sulfatos del efluente del lavador de gases de una planta de sulfonación mediante precipitación de etringita.

1.3.2. Objetivos específicos

- 1) Identificar las características fisicoquímicas del efluente del lavador de gases de una planta de sulfonación.
- 2) Determinar las condiciones óptimas para lograr la precipitación de etringita.
- 3) Identificar las características fisicoquímicas del efluente del lavador de gases de una planta de sulfonación después de la precipitación de etringita.

1.4. Limitantes de la investigación

El trabajo de investigación, es viable porque se cuenta con los ambientes de laboratorio, equipos y reactivos para la realización de la parte experimental del proyecto, así como presupuesto; por lo que no existe limitantes económicas para su ejecución:

- a) **Teórico.**- Durante el proceso de investigación se usarán teorías y enfoques sobre el proceso de precipitación de etringita de artículos científicos, revistas especializadas y tesis que ayuden a explicar las bases teóricas.
- b) **Temporal.**- El presente trabajo de investigación es de tipo longitudinal.

c) Espacial.- La unidad de análisis corresponde a la zona de drenaje de los efluentes del lavador de gases de la planta de sulfonación.

II. MARCO TEÓRICO

2.1. Antecedentes

Morales Escalante Janeth, (2016) en la investigación de “Remoción de sulfatos del efluente del sistema de refrigeración de una central termoeléctrica de ciclo combinado mediante la precipitación química de la Etringita”, evaluó el tratamiento de la precipitación química de la etringita como una alternativa de remoción de sulfatos; esta se llevó a cabo mediante la reacción de los aniones sulfatos con los iones aluminio y calcio en un medio básico. Realizó pruebas experimentales utilizando como insumos policloruro de aluminio y cal, y el efluente proveniente de un ciclo combinado. Analizó las principales variables que influyen en el proceso: tasa másica de policloruro de aluminio:sulfatos y la concentración de cal (ppm), obteniéndose altos porcentajes de remoción del 91,2%

Moreno Monge Nuria, (2014) en la investigación “Estudio del proceso de precipitación de Etringita para la eliminación de sulfatos en los efluentes generados en Industrias Químicas del Ebro” estudió el proceso de precipitación de etringita para la reducción de la concentración de sulfatos que se generan en los efluentes de la empresa Industrias Químicas del Ebro. Los efluentes vertidos de esta empresa tienen altas concentraciones de sulfatos, junto con otros iones en concentraciones menores que generan problemas de incrustaciones en las instalaciones y el sistema de alcantarillado junto a problemas ambientales, debido a la precipitación de carbonato cálcico y sulfato cálcico, tratamiento que llevan a cabo actualmente. Se estudió las condiciones de reacción, tiempo y consumo de reactivos, así como los sólidos obtenidos en los experimentos realizados en laboratorio y planta piloto para conseguir la precipitación de etringita.

Castillo López & Chávez Pozo, (2016) en la investigación “Influencia del pH y dosis de hidróxido de aluminio sobre el porcentaje de eliminación de sulfatos en agua de mina artificial mediante tratamiento por precipitación mineral” presentaron el estudio de la influencia del pH y las dosis de

hidróxido de aluminio para poder eliminar sulfatos presentes en el agua de mina artificial, mediante el tratamiento por precipitación mineral. Se preparó el agua de mina artificial utilizando diferentes sales de sulfatos para conseguir características fisicoquímicas muy similares a los drenajes ácidos de mina.

Se elevó el pH acondicionando con cal para lograr precipitar en forma de hidróxidos los metales de las sales presentes en la solución que posteriormente fueron removidos por filtración. Luego se agregó hidróxido de aluminio, previo acondicionamiento de pH a temperatura ambiente y agitación constante para formar una sal de calcio, aluminio y sulfato. Como resultado final se determinó que a pH de 11,5 y a una dosis de hidróxido de aluminio de 2,0 g/L se logró un 89,62% de eliminación de sulfatos.

Verdugo Gallegos Luis, (2013) en la investigación “Remoción de iones sulfatos y metales pesados desde soluciones acuosas que simulan aguas de mina usando mezcla de cal, silicatos nano – estructurados y policloruro de aluminio en una celda DAF”, estudió la remoción del anión sulfato en presencia de cobre y zinc desde soluciones acuosas que simulan un agua ácida de mina, empleando mezclas de cal, policloruro de aluminio y silicatos de calcio nanoestructurados en una celda de flotación de aire disuelto. Consiguió una buena remoción de sulfatos, utilizando diferentes dosificaciones de cal y policloruro de aluminio. Preparó un silicato de calcio nanoestructurado mediante la reacción de una solución de silicato de sodio e hidróxido de calcio, que en su conjunto con policloruro de aluminio generó precipitados más granulares y fáciles de separar, también permitió reducir la dosificación de cal por obtener un medio básico más estable. Se alcanzó concentraciones por debajo de la norma ambiental vigente en un tiempo relativamente corto basándose en la formación de etringita. Los resultados experimentales se explicaron mediante un modelo fisicoquímico el cual corresponde a un sistema de ecuaciones diferenciales.

2.2. Bases teóricas

2.2.1. Proceso de remoción

La remoción de sulfatos es uno de los procesos más complejos debido a su alta solubilidad y estabilidad en el agua. (Morales Escalante, 2016)

La remoción de iones sulfato representa el mayor desafío técnico comparativamente a los demás iones metálicos. Las tecnologías existentes actualmente en el mercado permiten establecer las siguientes conclusiones:

- a)** No hay proceso de bajo costo para la eliminación de iones sulfato presentes en efluentes que contienen concentraciones inferiores a 2000-2600 mgL⁻¹. Esto se debe a la gran solubilidad del CaSO₄
- b)** La precipitación de los iones sulfato es posible con los siguientes reactivos: Ca(OH)₂, para las concentraciones superiores de la solubilidad del CaSO₄; con sales de bario (principalmente BaCl₂); con sales de plomo (principalmente PbNO₃) y con sales de aluminio (policloruro, cloruro y nitrato) más sales de calcio en tasas estequiométricas fijas y en pH > 10,5
- c)** La separación de los precipitados es posible vía sedimentación o por flotación. En el caso de las sales de Ba y Pb, podría ser posible realizar de forma conjunta con Mo-Fe(OH)₃. (Cadorin, Carissimi, & Rubio, 2007)

2.2.2. Precipitación química

Según (Sans Fonfría & de Pablo Rivas, 1989) la precipitación química consiste en añadir ciertos productos químicos al agua residual para conseguir que éstos alteren el estado físico de los sólidos disueltos o en suspensión y se produzca una eliminación por sedimentación.

La precipitación química puede ser el principal y único método de depuración de aguas residuales industriales; en otros casos puede ayudar a la operación de sedimentación cuando exista una gran concentración de

sólidos disueltos y en suspensión, y se pueda utilizar como un tratamiento anterior a un proceso biológico.

El uso de la precipitación química presenta dos problemas fundamentales frente a otros procedimientos de depuración:

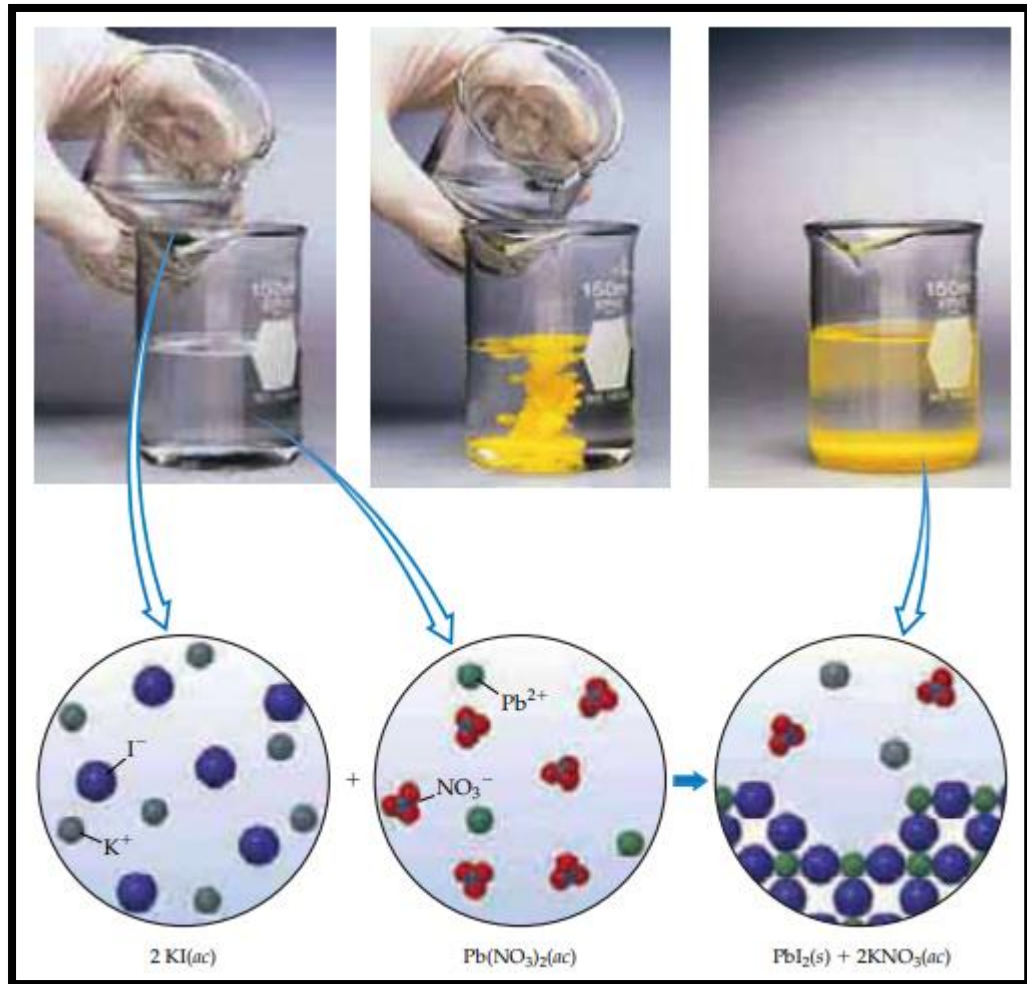
- a)** El volumen de fangos obtenidos es más elevado que mediante los procesos biológicos, y la precipitación de algunos metales pesados que se puedan encontrar disueltos en las aguas residuales producirá problemas en la estabilización de fangos mediante procedimientos de digestión anaerobia.
- b)** Al utilizar reactivos químicos aumentará la concentración de los componentes de dichos reactivos en las aguas residuales tratadas, lo cual puede ser un grave inconveniente si estas aguas (mayoritariamente en procesos industriales) quieren ser reutilizadas.

Según (Fernández López, 2012) la aparición de una fase sólida en el seno de un líquido, bien por adición de un reactivo que forma un producto insoluble con algunos de los iones de la disolución, o bien por concentración del mismo líquido hasta sobrepasar la saturación, se llama precipitación y se denomina precipitado al producto sólido que se origina.

El fenómeno de precipitación, así como el de disolución de precipitados ocupan un lugar muy importante en la Química. Sus principales aplicaciones son las identificaciones y separaciones. Esto es debido a que existe una gran cantidad de especies químicas que pueden ser identificadas por los precipitados que forman, los cuales en algunos casos presentan, además, un color característico. Por otra parte, antes de llegar al proceso de identificación, la separación de especies interferentes suele ser necesaria y, entre las técnicas de separación, es de uso común la precipitación. (Fernández López, 2012)

FIGURA N° 2.1

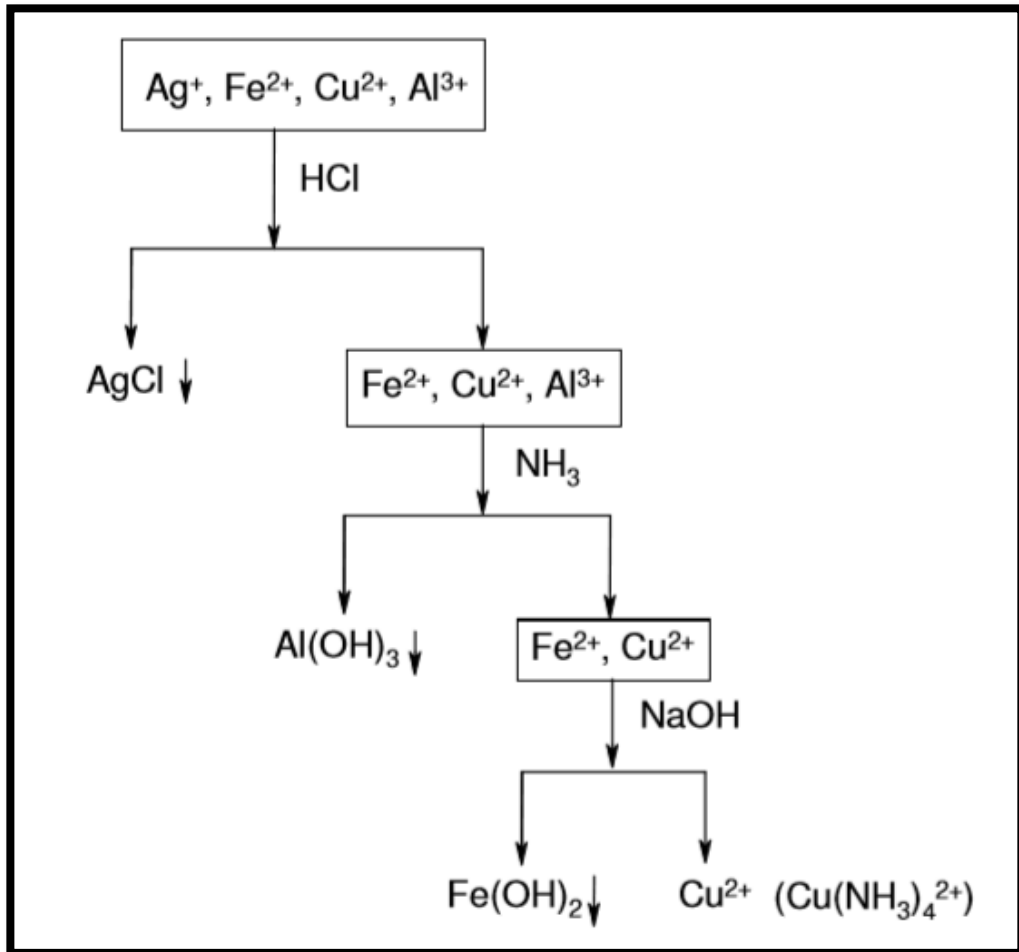
PRECIPITACIÓN DE YODURO DE PLOMO



Fuente : Brown *et al.* (2004), Química La ciencia central

FIGURA N° 2.2

PRECIPITACIÓN DE IONES



Fuente : Fernández, P. (2012), Webs de Profesorado – UCLM

- a. **Solubilidad.**- De acuerdo a (Nolasco León & Rojas Baltazar, 2013) define solubilidad a la máxima concentración de soluto que admite una determinada cantidad de disolvente a una determinada temperatura.

En general, la solubilidad de una sustancia varía con la temperatura, y para la mayor parte de los solutos sólidos aumenta con ella.

La solubilidad expresa la cantidad de gramos de soluto disueltos por cada 100 g. de disolvente a una determinada temperatura. Para calcularla, se utiliza la siguiente ecuación:

$$\text{Solubilidad} = \frac{\text{masa del soluto (g)}}{\text{masa del solvente (g)}} \times 100$$

Cuando un soluto se disuelve, se rompe su red cristalina, venciendo las fuerzas de atracción que mantienen unidos a los iones, para esto es necesario superar la energía de red que se consigue con la hidratación (atracción entre los iones y las moléculas de agua). En general, la energía de hidratación es menor que la energía de red, por lo que el proceso de disolución es casi siempre exotérmico. De cualquier modo, la relación entre los dos tipos de energía determina que un compuesto sea más o menos soluble. (Hena Granada, 2010)

b. Factores que afectan la solubilidad.- (Nolasco León & Rojas Baltazar, 2013) Consideran que los factores que afectan a la solubilidad son:

- 1) La naturaleza del soluto y del solvente: No existe una regla fija que permite establecer una generalización en cuanto al fenómeno de la disolución. Cuando un soluto es agregado en un solvente se da un proceso de difusión de las moléculas del soluto hacia el seno de las moléculas del soluto y del solvente, lo cual ocurre solo y cuando entre las moléculas del soluto y del solvente se establezcan fuerzas interactivas capaces de vencer las fuerzas intermoleculares existentes en el cuerpo a dispersar.
- 2) **Efecto de la temperatura.**- Generalmente un aumento de temperatura facilita el proceso de disolución de un soluto. Lo que se explica por los siguientes hechos:
 - El calor suministrado al sistema aumenta la velocidad de difusión de las partículas del soluto en el seno del solvente.

TABLA N° 2.1

SOLUBILIDADES DE ALGUNOS ALCOHOLES EN AGUA Y HEXANO

Alcohol	Solubilidad en Agua	Solubilidad en Hexano
Metanol	∞	0,12
Etanol	∞	∞
Propanol	∞	∞
Butanol	0,1100	∞
Pentanol	0,0300	∞
Hexanol	0,0058	∞
Heptanol	0,0008	∞

Fuente : Brown et al. (2004), Química La ciencia central

- El calor suministrado es absorbido por las moléculas del soluto, debilitándose las fuerzas intermoleculares y facilitándose el proceso de solvatación.

Sin embargo, existen casos en donde un aumento de temperatura disminuye la solubilidad, como el caso del $\text{Ce}_2(\text{SO}_4)_3$.

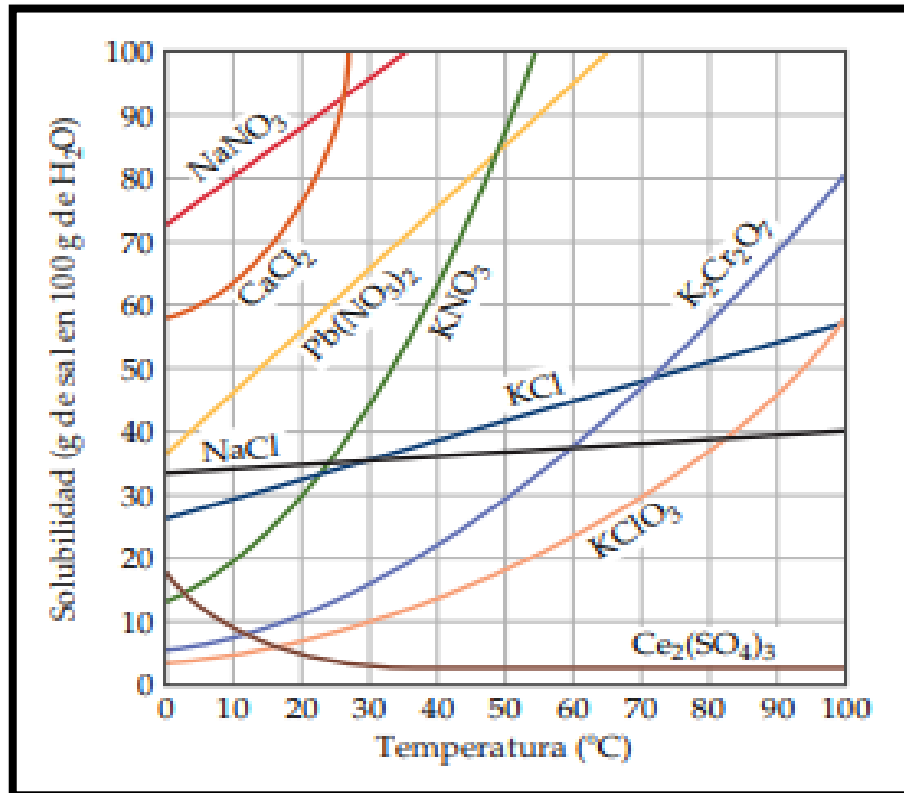
Existe otro caso como el del NaCl en el cual una variación de temperatura no altera, apreciablemente la solubilidad.

Otro caso muy particular es el Na_2SO_4 el cual al aumentar la temperatura aumenta la solubilidad hasta alcanzar un máximo, a partir de allí un incremento de temperatura, disminuye la solubilidad. Este comportamiento se debe a que a cierta temperatura los cristales de la sal se hidratan provocando un descenso en la solubilidad.

El proceso de disolución de una sustancia puede ser endotérmico o exotérmico. Un aumento de temperatura favorece la disolución en los procesos endotérmicos; y una disminución de temperatura favorece la disolución en los procesos exotérmicos.

FIGURA N° 2.3

SOLUBILIDADES DE VARIOS COMPUESTOS IÓNICOS EN AGUA EN FUNCIÓN DE LA TEMPERATURA



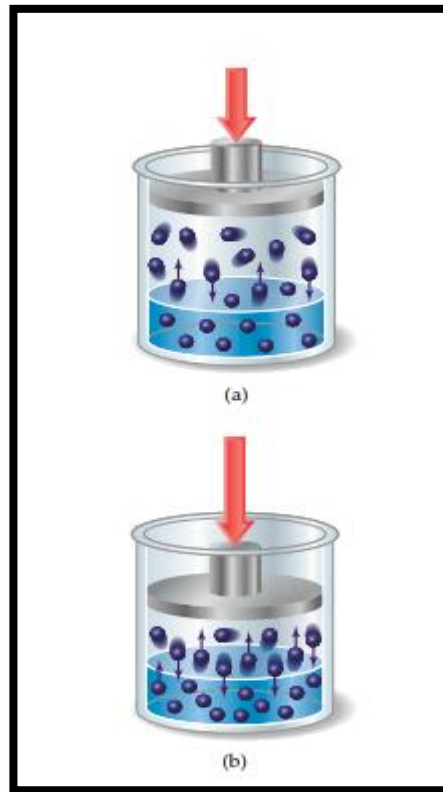
Fuente : Brown et al. (2004), Química La ciencia central

- 3) **Efecto de la presión.**- Este es un factor que tiene efecto apreciable en la solubilidad de gases. Experimentalmente se ha comprobado que la solubilidad del gas es directamente proporcional a las presiones aplicadas.

Cuando se aumenta la presión, como en **(b)**, aumenta la rapidez con que las moléculas de gas entran en la disolución, como se muestra en la **Figura N° 2.4 (Ver pág. N° 22)** La concentración de moléculas de soluto en equilibrio aumenta proporcionalmente con la presión. (Brown, LeMay, Bursten, & Burdge, 2004)

FIGURA N° 2.4

EFFECTO DE LA PRESIÓN SOBRE LA SOLUBILIDAD DE UN GAS



Fuente : Brown et al. (2004), Química La ciencia central

- c. Tipos de soluciones.-** De acuerdo a los autores (Nolasco León & Rojas Baltazar, 2013) existen los diferentes tipos de soluciones:
- 1) Solución diluida es la que contiene una cantidad relativamente pequeña de soluto.
 - 2) Solución concentrada es la que contiene una cantidad relativamente grande de soluto, pero sin llegar a la saturación. De acuerdo a lo anteriormente expuesto puede deducirse que una solución no saturada contiene menor cantidad de soluto que la que es capaz de disolverse.

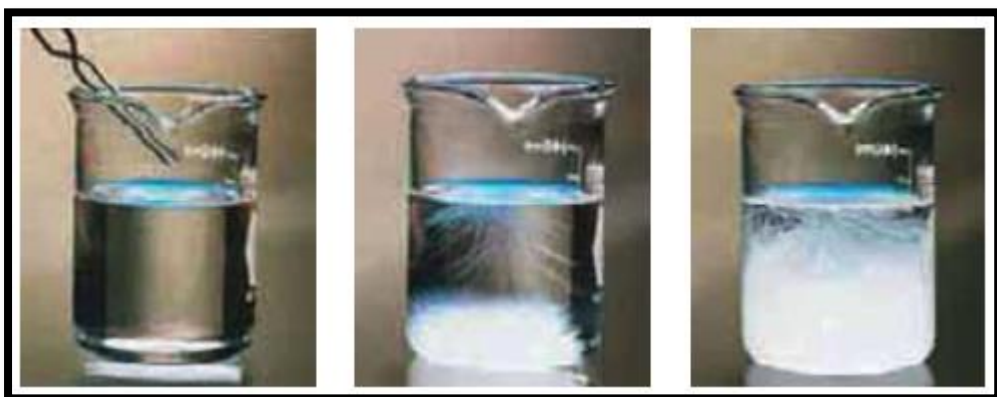
- 3) Solución saturada contiene la máxima cantidad de soluto que se disuelve en un disolvente en particular, a una temperatura específica.
- 4) Solución sobresaturada, es la que contiene más soluto que la contenida en una solución saturada del mismo soluto a la misma temperatura. Estas soluciones no son muy estables, una parte del soluto se separa de la disolución sobresaturada en forma de cristales, dando lugar, el proceso inverso de disolución (la cristalización).

Cómo diferencias estas soluciones:

- Si el soluto se disuelve todo o parte de él, la solución es no saturada.
- Si el soluto no se disuelve ni produce precipitación de lo que estaba disuelto, es una solución saturada.
- Si el soluto añadido produce la cristalización de una parte del soluto que estaba disuelto, es una solución sobresaturada.

FIGURA N° 2.5

SOLUCIÓN SOBRESATURADA DE ACETATO DE SODIO

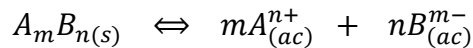


Fuente : Brown et al. (2004), Química La ciencia central

- d. **El producto de solubilidad.**- El producto de solubilidad de un compuesto es el producto de las concentraciones molares de los iones

constituyentes, cada una elevada a la potencia de su coeficiente estequiométrico en la ecuación de equilibrio. (Chang, 2002)

De acuerdo a (Henao Granada, 2010) El producto de solubilidad, para un compuesto formado por iones A y B, está dado por:



Donde m y n son el número de iones. Mediante la ley de acción de las masas se obtiene:

$$K_c = \frac{[A^{n+}]^m \cdot [B^{m-}]^n}{[A_m B_n]}$$

Como la concentración del sólido puro $[A_m B_n]$, permanece constante, la ecuación anterior queda de la siguiente forma:

$$K_{ps} = [A^{n+}]^m \cdot [B^{m-}]^n$$

Cuando la solución está sobresaturada se rompe el equilibrio iónico y se presenta la precipitación que produce que los iones y complejos aniónicos y catiónicos se depositen sobre el sustrato creando centros de nucleación.

El valor de K_{ps} indica la solubilidad de un compuesto iónico, es decir, entre menor sea su valor menos soluble será el compuesto. Sin embargo, al utilizar los valores de K_{ps} para comparar solubilidades, se deben elegir los compuesto que tengan fórmulas semejantes, como AgCl y ZnS, o CaF₂ y Fe(OH)₂. (Chang, 2002)

En la siguiente tabla se dan los productos de solubilidad de diversas sales de baja solubilidad. Las sales solubles, como el NaCl y el KNO₃, que tienen valores de K_{ps} muy grandes, no se incluyen en la tabla.

TABLA N° 2.2

PRODUCTOS DE SOLUBILIDAD DE ALGUNOS COMPUESTOS IÓNICOS LIGERAMENTE SOLUBLES A 25°C

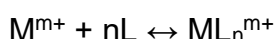
Compuesto	K_{ps}
Bromuro de cobre (I) (CuBr)	$4,2 \times 10^{-8}$
Bromuro de plata (AgBr)	$7,7 \times 10^{-13}$
Carbonato de bario (BaCO ₃)	$8,1 \times 10^{-9}$
Carbonato de calcio (CaCO ₃)	$8,7 \times 10^{-9}$
Cloruro de plata (AgCl)	$1,6 \times 10^{-10}$
Cloruro de plomo (II) (PbCl ₂)	$2,4 \times 10^{-4}$
Cromato de plomo (II) (PbCrO ₄)	$2,0 \times 10^{-14}$
Fluoruro de bario (BaF ₂)	$1,7 \times 10^{-6}$
Fluoruro de calcio (CaF ₂)	$4,0 \times 10^{-11}$
Hidróxido de aluminio [Al(OH) ₃]	$1,8 \times 10^{-33}$
Hidróxido de calcio [Ca(OH) ₂]	$8,0 \times 10^{-6}$
Sulfato de bario (BaSO ₄)	$1,1 \times 10^{-10}$
Sulfato de estroncio (SrSO ₄)	$3,8 \times 10^{-7}$

Fuente : Chang, R. (2002), Química

- e. **Formación de un complejo estable – iones complejos.**- (Henao Granada, 2010) Señala que la existencia de complejos y los enlaces existentes en la formación de los complejos, son formados a través de los conceptos que extendió Lewis de los ácidos y las bases. Un ácido de Lewis es cualquier entidad química receptora de electrones y una base de Lewis es cualquier entidad química donadora de electrones, donde las reacciones de ambas producen la formación de iones complejos.

Un ión complejo es la especie formada que se une en forma directa al ión metálico central, M, con una especie neutra o con carga negativa, capaz de donar uno o más pares de electrones. Las especies

coordinadas con el ión central como el NH_3 , se denominan ligandos o agentes de formación de complejos. Los ligandos pueden ser iones o moléculas neutras y todos tienen la propiedad común de contener electrones no compartidos que pueden donar al ión central que contienen orbitales d vacíos del complejo. Obteniéndose:



M representa al átomo central, **L** es el ligando y **n** es el número de coordinación de **M**, siendo ML_n^{m+} el ión complejo.

2.3. Marco conceptual

2.3.1. Efluentes

(Huané Jamanca & Rivera Reyes, 2014) Definen como efluentes a todas las emisiones al ambiente que producen efectos no deseables en este.

La Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (USEPA) define efluente como aguas residuales tratados o no, que fluyen fuera de una planta de tratamiento, drenaje o desagüe industrial.

Comúnmente se reconoce al efluente como el término que se emplea para nombrar a las aguas servidas con desechos sólidos, líquidos o gaseosos que son emitidos por viviendas y/o industrias generalmente a los sistemas de desagües y terminan en los ríos y mares.

Se pueden clasificar a los efluentes de diferentes maneras. Por su naturaleza y estado; tenemos a los efluentes: sólidos, líquidos, gases, humos, olores y ruidos. Por su origen; tenemos los efluentes domésticos e industriales, estos últimos pueden subdividirse en los diferentes clases de industria (alimentación, metalúrgica, papelera, textiles, de cuero, sanitaria, etc.)

2.3.2. Efluentes industriales

Se conoce como efluentes industriales a la mezcla de las aguas negras de una industria en combinación de las aguas residuales de sus descargas. Los contaminantes provenientes de las descargas están en función del proceso industrial y tienen la mayoría de los efectos nocivos a la salud si no existe el control de la descarga. (Ramos Burga, 2015)

a) Características de efluentes industriales.- Las características de los desagües industriales difieren de los cloacales, tanto en cantidad como en calidad. (Ruiz Manrique & Wong García, 2013)

A continuación, se presenta la **Tabla N° 2.3 (Ver pág. N° 28)** en el cual se aprecia la variación de las características determinantes que definen la calidad de los líquidos cloacales e industriales.

(Ruiz Manrique & Wong García, 2013) Explican que en la industria, la composición de los líquidos residuales varía con el tipo de industria con el tipo de proceso que se llevaría a cabo. En la industria el agua se utiliza como materia prima, como medio de producción, para enfriamiento o para el lavado. A medida, que el agua utilizada recorre el proceso de producción se va cargando de contaminantes, que pueden ser incompatibles con el destino final a dar al líquido residual.

La cantidad de agua residual que proceden de diferentes industrias, como también las fluctuaciones, diarias y horarias, tienen variadas causas como puede ser:

- 1) Diferentes tipos de industrias
- 2) Diferentes procesos de fabricación
- 3) Tamaño de la planta
- 4) Modo de operación (Un turno de trabajo o varios)
- 5) Actividades temporales (Industrias que tienen mayor producción en tiempo de cosecha)
- 6) Variación de producción

TABLA N° 2.3

CARACTERÍSTICAS DE EFLUENTES CLOACALES E INDUSTRIALES

Características	Efluente cloacal	Efluente industrial
Residuo total por evaporación	1 000 mg/L	Lavado de lanas, 50 000 mg/L
pH	7	Industria metalúrgica, 2 Industria textil, 11
Sólidos suspendidos	350 mg/L	Mataderos, 2 000 mg/L
DBO ₅	250 mg/L	Destilerías de alcohol, 2 000 mg/L
Sulfuros	0,5 mg/L	Curtiembres, 30 mg/L
Grasas	40 mg/L	Lavado de lanas, 15 000 mg/L

Fuente : Elaboración propia

Las aguas industriales contienen sustancias disueltas y en suspensión. Dentro de las sustancias disueltas hay elementos orgánicos que pueden ser biodegradables o no biodegradables, y/o elementos inorgánicos (sales de amoníaco, fosfatos, etc.); como también elementos tóxicos. En los materiales en suspensión también puede haber sustancias orgánicas y /o sustancias inorgánicas.

Atento a la gran diversidad de composiciones de las aguas residuales, que dependen del tipo de proceso industrial en el cual se regeneran y de las materias primas e insumos utilizados, se hace imprescindible la caracterización de dichas aguas y la cuantificación volumétrica (medición de caudales).

b) Tipos de efluentes industriales.- (Ruiz Manrique & Wong García, 2013) Señalan que la gran variedad de procesos industriales genera un amplio abanico de efluentes, que requiere en cada caso una investigación individual y frecuentemente un proceso de tratamiento específico. Además es necesario conocer el sistema de producción de la industria en concreto y los sistemas de organización de los procesos involucrados. Hay cuatro tipos de efluentes industriales a considerar:

- 1) **Efluentes de los procesos generales de fabricación.**- La mayoría de procesos aumentan la contaminación de los efluentes por el contacto que tienen con gases, líquidos o sólidos. Los efluentes pueden ser continuos o intermitentes. Algunos sólo se producen algunos meses al año (campañas en la industria agroalimentaria). Generalmente la producción es regular, produciendo flujos de contaminantes conocidos. Sin embargo para determinados sectores (química sintética, farmacéutica, etc.) es muy dificultoso analizar los efluentes porque cambian constantemente.
- 2) **Efluentes específicos.**- Algunos efluentes son separados de corrientes específicas del proceso tal es el caso :
 - Baños de electro platinado, soda cáustica gastada, licores de amonio de plantas de carbón.
 - Condensados de la producción de papel, líquidos madres de la industria alimentaria.
 - Efluentes tóxicos y concentrados.
- 3) **Efluentes procedentes de servicios generales**
- 4) **Efluentes intermitentes.**- Pueden provenir de vertidos accidentales de productos, durante su manejo o almacenamiento.

2.3.3. Planta de sulfonación

- a) **Descripción del proceso.**- Aire filtrado del medio ambiente es comprimido aproximadamente a 0,6 bar, enfriado a 5°C para remover la mayor parte de agua por condensación y seguidamente secado en un desecador de sílica gel con alúmina, para llegar al punto de rocío del aire de proceso de aproximadamente -60°C y así evitar la formación de ácido sulfúrico.

FIGURA N° 2.6

EFLUENTE INDUSTRIAL



Fuente : Sosa, R. (2013), Propuesta preliminar para la implementación de un sistema de tratamiento de efluentes en una bodega de Maipú, Mendoza.

Azufre fundido almacenado a 150°C es bombeado hacia el horno, donde el azufre es convertido en SO₂ (4% – 7% de volumen de SO₂ en aire) con oxígeno en exceso del aire del proceso. La temperatura de salida del horno de la corriente de SO₂/aire varía con el porcentaje de SO₂ en el aire entre 600°C a 700°C, indicando un fuerte carácter exotérmico de la reacción. El SO₂ es convertido en SO₃ en la torre de conversión, alimentada con 4 camas compactas de catalizador de V₂O₅. La reacción es altamente exotérmica y el flujo de gas del proceso es enfriado intermedicamente entre las camas del convertidor con aire frío de forma indirecta hasta aproximadamente 420°C

A pesar del bajo punto de rocío del aire del proceso, algunas nieblas de ácido sulfúrico/óleum condensan en los enfriadores seguidos de la torre de conversión a temperaturas aproximadas de 45°C – 50°C. Dicha niebla altamente reactiva afecta la calidad de la reacción de sulfonación subsiguiente y por lo tanto un filtro de alta eficiencia es instalado antes del actual paso de sulfonación.

La reacción de sulfonación puede ser caracterizada por lo siguiente:

- 1) La reacción entre SO_3 y la alimentación orgánica es instantánea.
- 2) Ocurren reacciones consecutivas y paralelas no deseadas, notablemente a altas temperaturas.
- 3) La reacción es altamente exotérmica.
- 4) La viscosidad del ácido orgánico (500 – 1 000 cP) es significativamente grande en comparación con la viscosidad de la alimentación orgánica (5 –10 cP).

Después de la reacción, el gas agotado contiene pequeñas cantidades de SO_2 no convertidos, SO_3 no reaccionados y algunas entradas de ácido orgánico que tienen que ser lavados antes de su emisión al medio ambiente. El aerosol orgánico y gas agotado de SO_3 son atrapados en un multifiltro, y el gas SO_2 y las trazas de SO_3 son lavados del aire del proceso en un lavador de gases con solución diluida de soda cáustica, esto produce una mezcla de solución de sulfitos y sulfatos.

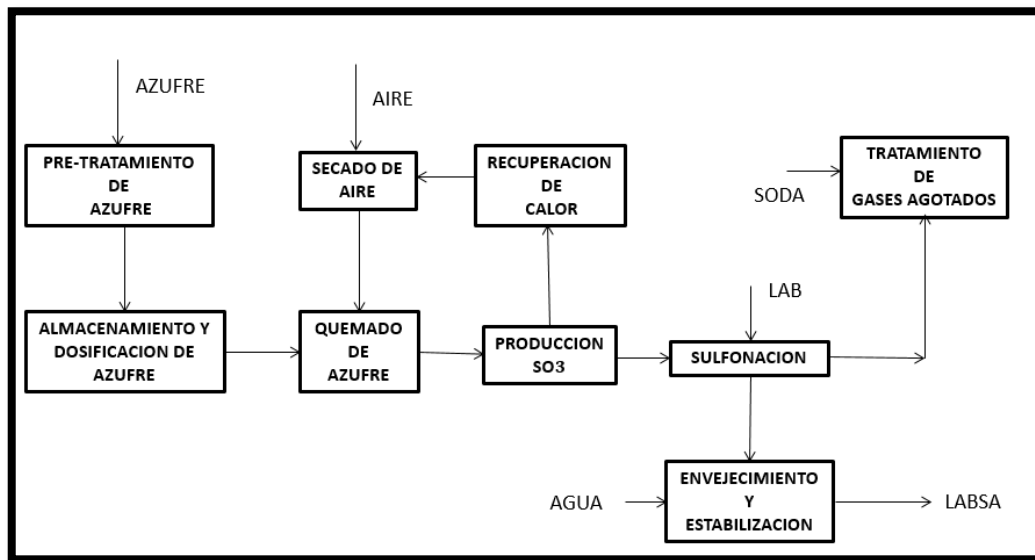
Dependiendo del tipo de alimentación orgánica y consecuente ácido orgánico, serán requeridos los siguientes pasos de reacción. El ácido sulfónico de LAB tiene que pasar por un paso de envejecimiento para convertir el producto intermedio en el deseado LABSA. Además, una hidrolización y estabilización es requerida para convertir el anhídrido formado en LABSA con un pequeño porcentaje de agua (aproximadamente 1% en LABSA) LABSA es un producto estable, el cual puede ser almacenado y transportado. (Herman de Groot, 1991)

- b) Lavador de gases.-** (Ballestra Grupo Desmet, 1999) Indica que la corriente gaseosa residual que contiene SO_2 no convertido es luego tratada en una columna lavadora empaquetada, donde el agua y soda cáustica en solución son continuamente agregados y reciclados. El SO_2 reacciona con la soda cáustica proporcionando sulfito de sodio, el cual es descargado como solución acuosa. La alimentación de soda

cáustica es automática y controlada para mantener el licor del lavador de gases a un pH requerido.

FIGURA N° 2.7

DIAGRAMA DE BLOQUES DEL PROCESO DE SULFONACIÓN



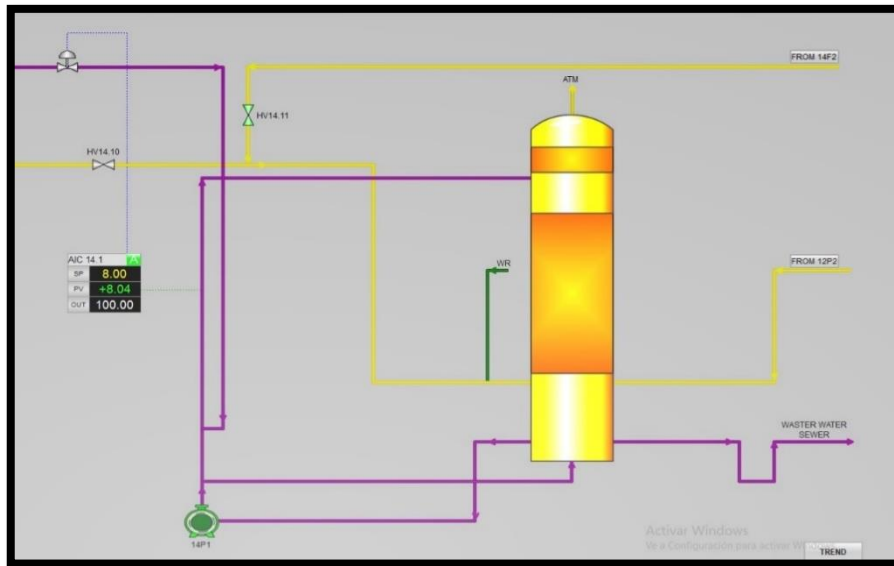
Fuente : Elaboración propia

Esta reacción se realiza por medio de una columna empacitada especialmente diseñada, donde el contacto íntimo entre las fases de gas y líquido se da en contracorriente.

El líquido entra por la parte superior de la columna y fluye hacia abajo a través de la columna, que está llena de anillos de plástico para asegurar el contacto superficial suficiente y evitar la formación de vías preferentes del líquido a través de la cama. El líquido del fondo de la columna es continuamente recirculado.

Parte del Na₂SO₃ que es oxidado a Na₂SO₄ por el exceso de aire contenido en la corriente de gas, es luego descargado por el lavador de gases aproximadamente al 10% de concentración y pH constante de 8,5 El porcentaje descargado es directamente proporcional al porcentaje de SO₂ no convertido. El gas limpio es luego emitido hacia el medio ambiente.

FIGURA N° 2.8
LAVADOR DE GASES



Fuente : Elaboración propia

2.3.4. La etringita

Según (Moreno Monge, 2014) la etringita $\text{Ca}_6[\text{Al}(\text{OH})_6]_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 26\text{H}_2\text{O}$ es un sulfoaluminato de calcio mineral que se forma en la naturaleza en medios alcalinos. Es un componente principal de los cementos Portland y la matriz principal de los cementos de sulfato de aluminio. En este aspecto, la etringita muestra características como el endurecimiento rápido y resistencia temprana a fuerzas de compresión y expansión. Debido a la estructura que presenta la etringita, en la que se pueden diferenciar dos componentes principales: columnas compuestas por $\{\text{Ca}_6[\text{Al}(\text{OH})_6]_2 \cdot 24\text{H}_2\text{O}\}^{6+}$, y canales compuestos por $\{(\text{SO}_4)_3 \cdot 2\text{H}_2\text{O}\}^{6-}$, la etringita es capaz de intercambiar y absorber en su estructura cationes y aniones de tamaños similares a los iones que la componen. Los iones disponibles en la etringita para el intercambio son Ca^{2+} , Al^{3+} , SO_4^{2-} y OH^- . Esta propiedad hace que la etringita tenga aplicaciones muy interesantes, como son, el tratamiento y remediación de aguas contaminadas con iones

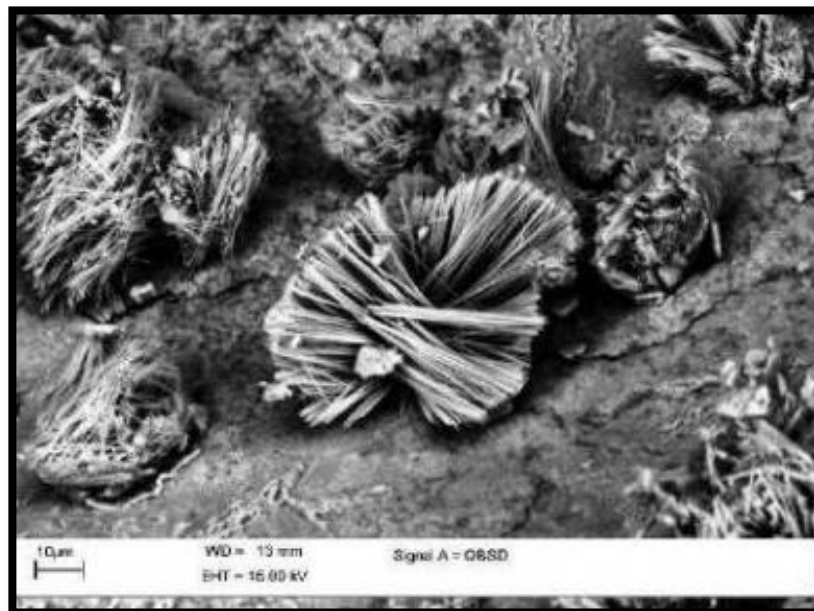
metálicos, y la eliminación de los gases SO_2 , generados en los procesos de combustión en lecho fluidizado, empleados en centrales térmicas. Respecto a su morfología, la etringita forma prismas hexagonales con aspecto de alfileres.

a) Propiedades químicas de la etringita.- La etringita es una sal básica muy insoluble, voluminosa, de alto peso molecular, que precipita generando un sólido no tan coloidal, muy fácil de decantar y separar. (Morales Escalante, 2016)

Es una sal doble de trisulfato de calcio aluminato tricálcico con 31 – 32 moléculas de agua. Este compuesto es muy poco soluble en agua. (Brandt Brandt, 2008)

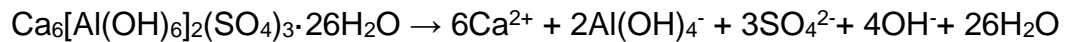
FIGURA N° 2.9

ETRINGITA



Fuente : Brandt, F. (2008), Comportamiento del hormigón que tiene entre sus componentes moléculas de nanosílice, ante el ataque químico de Sulfato de Magnesio

La reacción de disolución de la etringita es la siguiente:



El producto de solubilidad, K_{ps} se determina con la siguiente ecuación :

$$K_{ps} = [\text{Ca}^{2+}]^6 [\text{Al}(\text{OH})_4^-]^2 [\text{SO}_4^{2-}]^3 [\text{OH}^-]^4 [\text{H}_2\text{O}]^{26}$$

La constante del producto de solubilidad es $K_{ps} = 10^{-43.13}$ a 25°C . (Morales Escalante, 2016)

La etringita es estable a un pH de 11,5, pero se hace inestable por debajo de 10 y altamente inestable en el rango de pH=6. (López Sánchez, 2015)

b) Aplicaciones de la etringita :

1) Cementos de etringita.- Según (Fernández Carrasco & Vásquez, 2008) la industria del Cemento Portland (CP) requiere unos altos consumos energéticos unidos a emisión de gases invernadero asociados al proceso de fabricación, por cada tonelada de cemento, se emite cerca de 1 tonelada de CO_2 . Los cementos compuestos destacan por su característica de contribuir a la reducción de emisión de CO_2 . Materiales cementantes suplementarios (SCMs) tales como las cenizas volantes permiten que la industria del hormigón utilice grandes cantidades con el fin de reducir el consumo de CP por unidad de volumen de hormigón.

Los productos basados en etringita presentan características especiales que les adecuan para un rango de aplicaciones concretas: formulaciones con contenidos de agua próximos al mínimo requerido para asegurar plasticidad son utilizados de manera frecuente en materiales de reparación y recubrimiento de grietas. Al igual que el Cemento de Aluminato de Calcio (CAC), los productos ricos en etringita proporcionan una gran reducción del tiempo fraguado y endurecimiento del CP. Las resistencias a

compresión dependen de las formulaciones pero son comparables a aquellas mostradas por las composiciones de CAC libres de sulfato.

Según (Gallardo, Almanza, Cortés, & Escobedo, 2016) el cemento es un material que se emplea en la construcción de urbes y viviendas las cuales crecen en demanda a la par del crecimiento demográfico. El uso de concretos constituidos con materiales apropiados, convenientemente proporcionados y bien consolidados, aseguran la durabilidad de las construcciones. El material ligante que más se utiliza en la construcción es el cemento Portland, sin embargo en los procesos de su producción se consumen grandes cantidades de combustibles fósiles y, de forma paralela, en el proceso de descarbonatación de las materias primas se emiten grandes volúmenes de CO_2 a la atmósfera, contribuyendo con alrededor del 7% de las emisiones mundiales de este gas. Existe una variedad de materiales alternativos y viables (desechos industriales) para la sustitución del cemento Portland. El uso de éstos está basado en la importancia de minimizar las emisiones de CO_2 , incrementándose el interés en la producción de materiales cementivos que desarrollen buenas propiedades mecánicas y buena estabilidad en ambientes corrosivos.

Una alternativa para sustituir total o parcialmente el uso del cemento Portland, es la manufactura del cemento de sulfoaluminato de calcio (SAC) que presenta una estructura cristalina que consiste de un arreglo tridimensional de tetraedros de AlO_4 entrelazados con iones Ca^{+2} y SO_4^{-2} localizados en los intersticios existentes. Este tipo de cemento presenta una baja emisión de CO_2 , formándose a una temperatura aproximada de $1\ 250^\circ\text{C}$, además de desarrollar buenas propiedades mecánicas (resistencia a la compresión) Por otro lado, existe una gran cantidad de desechos tales como escorias, yesos y cenizas entre

otros, que presentan en su composición química cantidades considerables de Al_2O_3 , CaO , CaSO_4 entre otros, siendo estos los componentes principales para la producción de clinkers de SAC. Una ventaja muy importante derivada de la manufactura de éste clinker a partir de desechos industriales, es la disminución de la contaminación del aire, suelo y visual que éstos originan (almacenados al aire libre) y la disminución de emisiones de CO_2 al medio ambiente.

2.4. Marco teórico – conceptual

2.4.1. Tratamiento de efluentes industriales

Según (Ramos Burga, 2015) para el tratamiento de efluentes industriales se puede hablar de los siguientes procesos industriales: primarios, secundarios y terciarios, utilizándose solo los que sean de aplicación concreta al proceso industrial.

En los tratamientos primarios, los métodos de tratamientos son: cribado, neutralizado, coagulación – floculación, sedimentación, filtración, desarenado y desaceitado; tienen por objeto eliminar los sólidos en suspensión, coloides, metales pesados, aceites y grasas.

En los tratamientos secundarios, los métodos que se utilizan son: lodos activados, filtros percolados, lagunaje, etc.; en estos métodos se elimina la materia orgánica biodegradable.

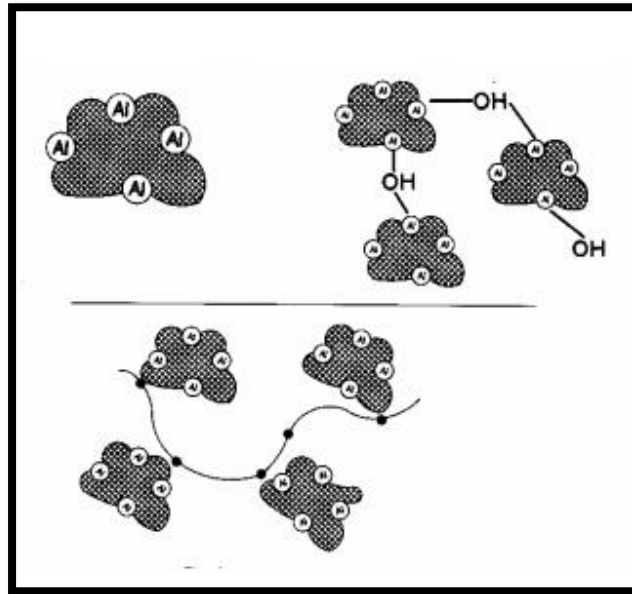
En los métodos terciarios se pueden enumerar los siguientes métodos: procesos de oxidación, destrucción o transformación de materia orgánica y compuestos inorgánicos oxidables; procesos de precipitación química, eliminación de metales y aniones inorgánicos; arrastre con agua o vapor (stripping), eliminación de compuestos volátiles.

También existen otros tratamientos como: procesos de membrana (ósmosis inversa, ultrafiltración, electrodiálisis, etc.) y de intercambio iónico: especies disueltas y coloides; procesos de absorción con carbón activado que eliminan compuestos orgánicos; procesos de incineración que eliminan

materia orgánica; y procesos electroquímicos como la electrólisis y electromembranas, que eliminan y transforman las especies disueltas.

FIGURA N° 2.10

MECANISMO DE FLOCULACIÓN



Fuente : Sánchez, F. (2007), Tratamientos combinados físicos-químicos y de oxidación para la depuración de aguas residuales de la industria corchera

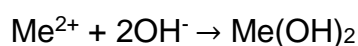
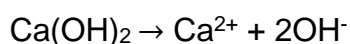
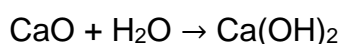
2.4.2. Remoción de sulfatos en procesos industriales

Existen diferentes métodos utilizados para remover sulfatos, como por ejemplo:

a) Tratamientos químicos.- (Martínez Londoño, 2010) Nos presenta que en este tipo de tratamientos, la precipitación mineral es el proceso más común y dentro de todos, la neutralización con cal es el más desarrollado debido a su eficiencia en la remoción de los sulfatos junto con metales y a los bajos costos de este material.

1) Neutralización con caliza y cal.- La caliza (CaCO_3) y particularmente la cal (CaO) han sido usadas para neutralizar

sustancias ácidas, sin embargo es más usada la cal por su bajo costo y por su eficiencia en la remoción de metales disueltos debido a que con el incremento del pH que genera, los metales se vuelven insolubles y reaccionan con los iones hidroxilos para precipitarse como hidróxidos, como se muestra a continuación:



En el caso de los hidróxidos, es deseable que se presente el caso de la reacción $\text{Me}^{2+} + 3\text{OH}^- \rightarrow \text{Me(OH)}_3$ porque los efluentes que contienen complejos metálicos de este tipo son más estables y por ejemplo, en el caso del hierro, la precipitación se presenta a menores valores de pH. Cuando hay una alta concentración de sulfatos en el efluente y hay una sobresaturación de iones de calcio, ocurre la precipitación de yeso, mineral que ha sido considerado como un problema en el tratamiento.

Mediante las siguientes reacciones, se puede representar la precipitación del yeso.

En la reacción $\text{CaCO}_3 + \text{H}_2\text{SO}_4 + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O} + \text{CO}_2$ se presenta la reacción general para la neutralización con caliza, como se puede observar, en este proceso se libera CO_2 , lo cual resulta inconveniente si se considera que en la actualidad la disminución de emisiones de este gas es fundamental para mitigar los efectos del cambio climático.

En la reacción $\text{Ca(OH)}_2 + \text{H}_2\text{SO}_4 \rightarrow \text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$, se presenta la reacción con la cal, en este caso, el yeso es el único producto de la reacción. La reducción en la concentración de sulfatos está directamente relacionada con la solubilidad del yeso, que depende de la composición y fuerza iónica de la solución.

Cuando se usan la cal y la caliza por separado para precipitar yeso, la eficiencia no es muy alta, por lo tanto quedan unos remanentes de sulfato que permiten concluir que su uso es adecuado como pretratamiento, mas no como tratamiento final. La mezcla de cal y caliza para la remoción de sulfatos, ha generado muy bajas concentraciones remanentes, la secuencia del proceso es como se describe a continuación:

- Neutralización con caliza, incremento del pH hasta un valor cercano a 7 unidades, se produce dióxido de carbono y se precipita yeso.
- Adición de cal, se incrementa el pH hasta 12, se precipita $Mg(OH)_2$ y se mejora la cristalización del yeso.
- Ajuste de pH con el dióxido de carbono recuperado en la neutralización precipitando caliza.

La generación de un mineral con alto contenido de sulfato de calcio en el proceso, es vista como un inconveniente porque produce atasques en los dispositivos electromecánicos usados en el tratamiento y su acumulación reduce el diámetro de las tuberías de conducción de aguas tratadas.

2) Neutralización con sales de Bario.- Generan remociones altas de sulfatos en solución pero tienen un costo elevado.

En cuanto a las variaciones de proceso, la inclusión de nuevas etapas de tratamiento, donde se adicionan cristales de yeso, hidróxido de aluminio e inclusive CO_2 , han demostrado incrementos en la remoción de sulfatos.

Adicional a los tratamientos químicos existen tratamientos con membranas (electro diálisis y la ósmosis inversa) y tratamientos por intercambio iónico y por remoción biológica.

b) Tratamientos por membranas.- Según (Calvo Brenes, Mora Molina, Quesada Kimsey, & Quesada Carvajal, 2010) la tecnología de membranas permite separar especies contaminantes en los ámbitos de

tamaño molecular e iónico. Debido a la versatilidad que ha demostrado su uso y a su importancia en el proceso de fabricación en muchas industrias del mundo, esta metodología está adquiriendo rápidamente aceptación global. La capacidad para producir separaciones/purificaciones muy específicas a temperaturas bajas o ambientales, con frecuencia hace que la filtración por membranas sea una tecnología más rentable que los métodos más convencionales, como los filtros rotatorios al vacío o los filtros de prensa.

1) Operaciones de diálisis.- (Ramírez Gómez, 2006) Nos explica que estas son operaciones de membrana aplicadas a soluciones o disoluciones en las que el soluto es el que se transfiere a través de la membrana. La fuerza motriz es una actividad o una diferencia de potencial eléctrico en ausencia de una diferencia de presión.

- **Diálisis (DIA).**- La fuerza directriz es una diferencia de concentración a través de la membrana. En este caso existe un paso selectivo de iones y de sustancias de bajo peso molecular mientras que los solutos coloidales mayores y de gran peso molecular quedan retenidos. Útil en el mejoramiento de bioproductos y recuperación de iones valiosos de agua industrial.
- **Electrodiálisis (ED).**- Es una operación por la cual los iones son dirigidos a través de membranas selectivas bajo la influencia de una diferencia de potencial eléctrico. Alternando las membranas selectoras catiónicas y aniónicas en una disposición alterna con canales finos entre ellas, es posible producir canales alternantes de fluidos que están enriquecidos o faltos de iones respectivamente. La aplicación más importante es la producción de agua potable a partir de agua salobre, también para la remoción de nitratos desde una fuente de aguas subterráneas.

2) Operaciones de membranas mediante presión.- (Ramírez Gómez, 2006) Nos explica que estas son operaciones de membrana en las que la fuerza directora actuante es una diferencia de presión a través de la membrana. Se encuentra la mayor aplicación para el tratamiento de agua, los tipos de operaciones más importantes son :

- **Ósmosis Inversa (OI).**- La OI es una operación de membrana en la que, por medio de presión, el solvente de una solución se transfiere a través de una densa membrana fabricada expresamente para retener sales y solutos de bajo peso molecular. Si una solución salina concentrada está separada del agua pura por medio de esta membrana, la diferencia de potencial químico tiende a promover la difusión del agua desde el compartimiento diluido al compartimiento concentrado para igualar las concentraciones. En el equilibrio, la diferencia de niveles entre los compartimientos corresponde a la presión osmótica de la solución.
- **Nanofiltración (NF).**- La NF, también llamada OI a baja presión o desendurecimiento por membranas, relaciona la OI y la ultrafiltración en términos de selectividad de la membrana, la cual está diseñada para eliminar iones polivalentes (Calcio y magnesio) en operaciones de ablandamiento. Más recientemente, la NF ha sido empleada para eliminar o separar materia orgánica. En esta técnica los iones monovalentes son rechazados débilmente por la membrana, pues la NF permite contrapresión osmótica mucho más baja que la de OI, la presión de trabajo es de 0,5 a 1,5 MPa

FIGURA N° 2.11

PLANTA DE ÓSMOSIS INVERSA



Fuente : Gálvez, A. (2008), Aplicabilidad de procesos de coagulación-floculación y de sistema de biopelícula en el tratamiento de lixiviados de vertederos de ríos urbanos

c) Tratamientos por Intercambio Iónico.- Las resinas de intercambio iónico son materiales que contienen un gran intercambio polar grupos unidos por una red tridimensional. (Helfferich, 1962)

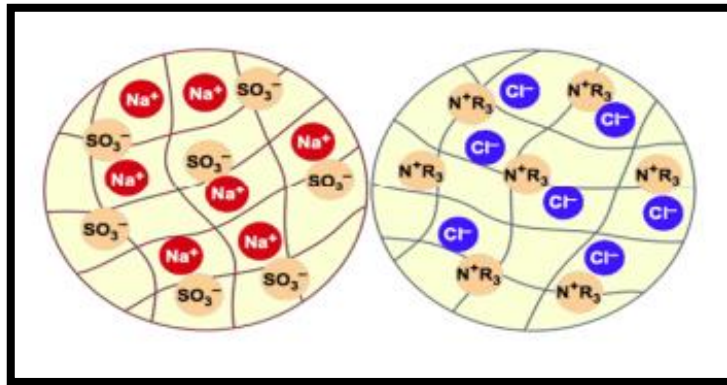
Según (Bowell, 2004) el proceso es un intercambio de iones o moléculas entre sólido y líquido sin un cambio sustancial en la estructura sólida. Uno de los iones dirigidos es esencialmente eliminado de la fase líquida y unido a la estructura sólida a cambio de otro ion (típicamente hidrógeno o hidroxilo) por lo tanto haciendo que el ion objetivo permanezca inmóvil.

En el caso del CaSO_4 , un anión, normalmente se intercambia para hidroxilo en una resina cargada positivamente (una resina aniónica) mientras que el calcio, un catión, se intercambiará por hidrógeno y se adjuntará a una resina cargada negativamente (una resina catiónica). Como con ósmosis inversa, el escalado de CaSO_4 es común en los

circuitos convencionales. Para superar estos problemas se ha desarrollado una forma modificada de intercambio iónico para tratar las aguas de sulfato de calcio (GYPCIX)

FIGURA N° 2.12

REPRESENTACIÓN ESQUEMÁTICA DE RESINAS INTERCAMBIADORAS DE CATIONES Y ANIONES



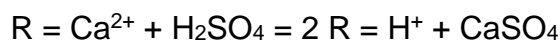
Fuente : Reyna, B. (2014), El intercambio iónico, su descripción y comportamiento químico

El proceso GYPCIX es un proceso novedoso basado en resinas de intercambio iónico que utiliza un bajo costo de reactivos como la cal y el ácido sulfúrico para la regeneración de la resina.

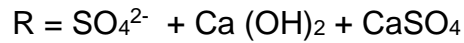
Las resinas utilizadas han sido diseñadas para concentrarse en el calcio y el sulfato de manera para reducir los niveles de yeso en el efluente, lo que reduce la TDS (Total sólidos disueltos) y la corrosión potencial. Además, un producto de yeso puro es el resultado del intercambio catiónico y aniónico y pueden venderse comercialmente, compensando así el tratamiento costoso.

Las reacciones ocurren por mecanismos tales como:

Regeneración de cationes



Regeneración de aniones



Los resultados de las plantas piloto en Sudáfrica sugieren que las incrustaciones causadas por el yeso la precipitación en circuitos convencionales de intercambio de iones puede evitarse el proceso GYPCIX. Como las corrientes de desechos se pueden combinar el yeso en la lechada se puede sedimentar y el sobrenadante agua reciclada para mejorar la recuperación de agua.

En una planta piloto, el efluente de Berkeley Pit, Butte, Montana fue tratado por el proceso GYPCIX. El proceso GYPCIX puede ser utilizado para tratar soluciones con sulfato hasta 2 000 mg/L y calcio hasta 1 000 mg/L.

Después de eso se requiere filtración de membrana para eliminar sales. Una variante del proceso GYPCIX fue desarrollada por Feng para co-eliminar metales y sulfato. En este enfoque, el agua de la mina estaba completamente oxidada con peróxido de hidrógeno como pretratamiento y esto fue seguido de precipitación de semilla de magnetita para crear precipitado de hidróxido de Fe – Mn. Esto se logró a pH > 5 para evitar la formación de gas H₂S.

La adición de sulfuro de sodio siguió esto para formar sulfuros metálicos, que eran precipitados a pH > 8 por adición de cal. El óxido de hidróxido de Fe-Mn la fracción se puede separar magnéticamente de la fracción de sulfuro de metal base.

- d) Tratamientos biológicos.**- Según (Macingova & Luptakova, 2011) la eliminación biológica de sulfatos de las aguas residuales puede realizarse a través de reducción anaeróbica a sulfuro usando bacterias reductoras de sulfato (SRB). Las bacterias reductoras de sulfato son un grupo heterogéneo de microorganismos, que se caracterizan por la respiración anaeróbica utilizando sulfato, tiosulfato o sulfito como

aceptor de electrones terminal y un sustrato orgánico o hidrógeno como donador de electrones. El lactato es el sustrato más ampliamente utilizado en las condiciones de cultivo de laboratorio SRB, sin embargo, es demasiado costoso para un proceso a gran escala. Se han usado varios compuestos orgánicos de bajo peso molecular como donantes de electrones alternativos, como el acetato, propionato, metanol y etanol.

Además, se han investigado varios tipos de sustancias orgánicas como donadores de electrones, incluidos lodos de aguas residuales, mantillo de hojas, virutas de madera, estiércol animal, compost vegetal, aserrín, compost de hongos, suero de leche y otros residuos agrícolas. Sin embargo, los compuestos orgánicos más complejos primero deben someterse a la hidrólisis y fermentación por bacterias productoras de ácido antes de que puedan ser utilizados por SRB.

Las investigaciones han demostrado que el uso de mezclas de sustratos en lugar de un solo sustrato aumenta la reducción de sulfato. Debido a la gran cantidad de sustratos potenciales, se introdujo la demanda química de oxígeno (DQO) para cuantificar la masa o concentración del material orgánico. Las aguas residuales ricas en sulfato generalmente son deficientes en donadores de electrones y requieren su adición externa en para lograr la reducción completa del sulfato.

2.4.3. Precipitación de etringita

La precipitación química de la etringita es una importante alternativa para aquellos sectores industriales cuyos efluentes presenten un alto contenido de sulfatos, principalmente las provenientes del sector minero-metalúrgico y los que utilicen el ácido sulfúrico en sus operaciones (energético, químico, etc.). (Morales Escalante, 2016)

La síntesis de etringita consiste en aportar calcio, aluminio y sulfatos en la relación estequiometría indicada en la reacción $6\text{Ca}^{2+} + 2\text{Al}^{3+} + 3\text{SO}_4^{2-} \rightarrow \text{Ca}_6[\text{Al}(\text{OH})_6]_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 26\text{H}_2\text{O}$, manteniendo el pH en valores próximos a

12,5. La precipitación de etringita es favorable en un rango de pH comprendido entre 12 y 13. De las distintas fuentes de calcio, sulfato y aluminio existentes, las más habituales son el hidróxido de calcio y el sulfato de aluminio. La mezcla se mantiene con agitación y a temperatura ambiente durante dos horas. La reacción es rápida y al cabo de ese tiempo la conversión de todos los reactivos iniciales a etringita es completa. (Moreno Monge, 2014)

2.5. Normatividad

2.5.1. Valores máximos admisibles

Entiéndase por Valores Máximos Admisibles (VMA) como aquel valor de la concentración de elementos, sustancias o parámetros físicos y/o químicos, que caracterizan a un efluente no doméstico que va a ser descargado a la red de alcantarillado sanitario, que al ser excedido causa daño inmediato o progresivo a las instalaciones, infraestructura sanitaria, maquinarias y equipos de los sistemas de alcantarillado y tratamiento de aguas residuales, y tiene influencias negativas en los procesos de tratamiento de las aguas residuales. (Ministerio de Vivienda, 2009)

Estas concentraciones de elementos se presentan en la **Tabla N° 2.4 (Ver pág. N° 49)**

2.5.2. Importancia ambiental y sanitaria de los sulfatos

El sulfato es uno de los aniones menos tóxicos, sin embargo, tiene una dosis letal de 45 g. para humanos, como sal de potasio o de zinc, en este caso no se ha definido si la toxicidad se debe al sulfato o al ion asociado. Aguas con una concentración mayor de 600 mg/L pueden tener efectos laxantes, pero, según la Organización Mundial de la Salud (OMS), se ha encontrado que los humanos se pueden adaptar a altas concentraciones de este ion.

Un alto consumo de sulfato de magnesio o de sodio, por las personas, puede causar efectos adversos como la deshidratación. El límite de concentración de sales de sulfatos que generan sabor en las aguas está

entre 250 y 500 mg/L. La OMS no ha establecido un valor para el contenido de sulfatos en el agua potable, sin embargo debido a sus propiedades laxantes, recomienda que se debe avisar a las autoridades de salud cuando se encuentren concentraciones mayores de 500 mg/L, la USEPA (United States Environmental Protection Agency) acogió el valor de 250 mg/L con fundamento en el umbral de sabor.

También se ha establecido que puede haber efectos adversos cosméticos como la decoloración de los dientes y estéticos como la generación de olor y sabor en el agua. (Martínez Londoño, 2010)

2.6. Definición de términos básicos

- a) **Catalizador.**- Sustancia que acelera o retarda una reacción química sin participar en ella.
- b) **Concentración.**- La concentración de una solución es la proporción o relación que hay entre la cantidad de soluto y la cantidad de disolución o de disolvente. A menor proporción de soluto disuelto en el solvente, menos concentrada está la solución, y a mayor proporción más concentrada está.
- c) **Exotérmica.**- Reacción que se produce con desprendimiento de calor.
- d) **LAB.**- Alquil benceno lineal, un tensoactivo para la producción de algunos detergentes.
- e) **LABSA.**- Ácido sulfónico alquil benceno lineal.
- f) **Neutralización.**- Reacción de neutralización es una reacción química que ocurre entre un ácido y una base produciendo una sal y agua.
- g) **Planta.**- Lugar en el que se desarrollan diversas operaciones industriales, entre ellas operaciones unitarias, con el fin de transformar, adecuar o tratar alguna materia prima en particular a fin de obtener productos de mayor valor agregado.
- h) **Precipitación.**- Formación de un sólido producido en una disolución por efecto de una reacción química.

TABLA N° 2.4
VALORES MÁXIMOS ADMISIBLES (VMA)

Parámetro	Unidad	Expresión	VMA para descargar al sistema de alcantarillado
Demanda Bioquímica de Oxígeno	mg/L	DBO	500
Demanda Química de Oxígeno	mg/L	DQO	1 000
Sólidos suspendidos totales	mg/L	S.S.T.	500
Aceites y grasas	mg/L	AyG	100
Aluminio	mg/L	Al	10
Arsénico	mg/L	As	0.5
Boro	mg/L	B	4
Cadmio	mg/L	Cd	0.2
Cianuro	mg/L	CN	1
Cobre	mg/L	Cu	3
Cromo hexavalente	mg/L	Cr ⁺⁶	0,5
Cromo total	mg/L	Cr	10
Manganeso	mg/L	Mn	4
Mercurio	mg/L	Hg	0,02
Níquel	mg/L	Ni	4
Plomo	mg/L	Pb	0,5
Sulfatos	mg/L	SO ₄ ⁻²	1 000
Sulfuros	mg/L	S ⁻²	5
Zinc	mg/L	Zn	10
Nitrógeno Amoniacal	mg/L	NH ⁺⁴	80
pH	Unidad	pH	6 – 9
Solidos sedimentables	ml/L/h	S.S.	8,5
Temperatura	°C	T	< 35

Fuente : SUNASS (2015), Resolución N° 009–2015–SUNASS–CD

- i) **Precipitado.**- Un precipitado es el sólido que se produce en una disolución por efecto de una reacción química. A este proceso se le llama precipitación. Dicha reacción puede ocurrir cuando una sustancia insoluble se forma en la disolución debido a una reacción química.
- j) **Reactor multitubular.**- Equipo donde se lleva a cabo la formación de un producto, conformado por varios tubos por el cual se desciende un líquido en forma de película y ascenso o descenso de gases.
- k) **Remoción.**- Acción y/o resultado de remover algo.
- l) **Sedimentación.**- Consiste en la separación, por la acción de la gravedad de las partículas suspendidas cuyo peso específico es mayor que el del agua y no pueden retenerse en las unidades de pretratamiento, por su finura o densidad, ni pueden separarse por flotación.
- m) **Soluto.**- El soluto es la sustancia que se disuelve, es decir, que se reparte o se dispersa en otra sustancia, que es el disolvente
- n) **Solvente.**- Un disolvente o solvente, es una sustancia en la que se diluye un soluto (un sólido, líquido o gas químicamente diferente), resultando en una disolución; normalmente es el componente de una disolución presente en mayor cantidad.
- o) **Sulfonación.**- Introducción de un grupo sulfo en un compuesto orgánico con el fin de producir, por ejemplo, ácido sulfónico aromático a partir del hidrocarburo proveniente.
- p) **Viscosidad.**- La viscosidad de un fluido es una medida de su resistencia a las deformaciones graduales producidas por tensiones cortantes o tensiones de tracción.
- q) **VMA.**- Valor máximo admisible

III. HIPÓTESIS Y VARIABLES

3.1. Hipótesis

3.1.1. Hipótesis general

La remoción de los sulfatos del efluente del lavador de gases de una planta de sulfonación se logra mediante precipitación de etringita.

3.1.2. Hipótesis específicas

- 1)** Las características fisicoquímicas del efluente del lavador de gases de una planta de sulfonación son alta concentración de sulfatos y pH.
- 2)** Las condiciones óptimas para lograr la precipitación de etringita son una razón másica entre Pac HB y sulfatos, y una concentración de cal adecuada.
- 3)** Las características fisicoquímicas del efluente del lavador de gases de una planta de sulfonación después de la precipitación de etringita son baja concentración de sulfatos y pH.

3.2. Variables

La presente investigación se caracteriza por ser longitudinal por el estudio de las variables a lo largo del tiempo establecido, por ser éste el determinante en la relación causa efecto.

3.2.1. Definición de variables

Por su naturaleza, las variables identificadas son del tipo cuantitativas. Por su dependencia X es dependiente, y las variables Y es independiente; es decir: $X = f(Y)$

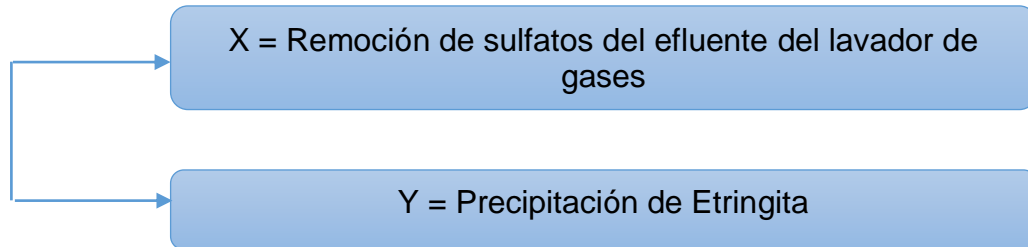
La **Figura N° 3.1 (Ver pág. N° 52)** muestra la relación entre las variables de investigación.

3.2.2. Operacionalización de variables

Para demostrar y comprobar la hipótesis formulada, se realizó la operacionalización de variables a través de dimensiones, indicadores y métodos de ensayo como se muestra a continuación:

FIGURA N° 3.1

DEFINICIÓN DE VARIABLES



Fuente : Elaboración propia

TABLA N° 3.1

OPERACIONALIZACIÓN DE VARIABLES

VARIABLE DEPENDIENTE	DIMENSIONES	INDICADORES	MÉTODO
X = Remoción de sulfatos del efluente del lavador de gases	Características fisicoquímicas del efluente	<ul style="list-style-type: none"> – ppm sulfatos – % Remoción 	<ul style="list-style-type: none"> – Turbidimétrico – Cálculo matemático
VARIABLE INDEPENDIENTE	DIMENSIONES	INDICADORES	MÉTODO
Y = Precipitación de etringita	Condiciones óptimas para lograr la precipitación de etringita	<ul style="list-style-type: none"> – Razón másica Pac HB:SO₄²⁻ – Concentración de cal 	<ul style="list-style-type: none"> – Análisis experimentales fisicoquímicos – Flotación

Fuente : Elaboración propia

IV. METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN

4.1. Tipo y diseño de la investigación

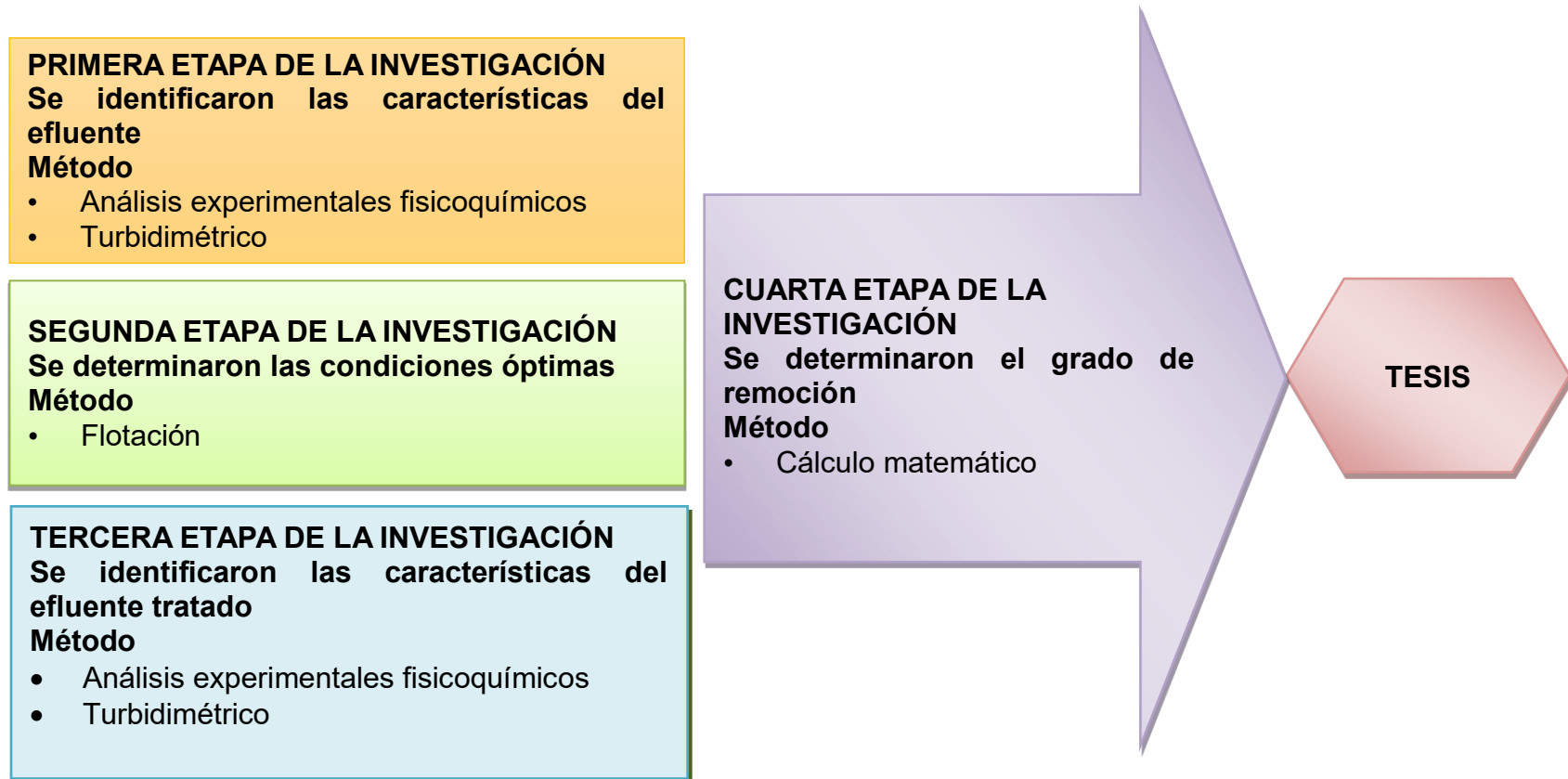
4.1.1. Tipo de investigación

- a) Por su finalidad es de tipo aplicada, puesto que los resultados sirven para aplicarlos a la práctica, dado que con la remoción de sulfatos del efluente del lavador de gases de una planta de sulfonación se redujo considerablemente las altas concentraciones de sulfatos, que contaminan el medio ambiente durante su disposición sin ningún control al alcantarillado.
- b) Por su diseño interpretativo es experimental porque se requirió de la observación, registro, análisis, y manipulación de las variables, para determinar el efecto deseado mediante precipitación de etringita.
- c) Por el énfasis en la naturaleza de los datos manejados es del tipo cuantitativo porque las variables de la investigación son de carácter cuantitativo, ya que mediante las pruebas experimentales realizadas y posterior análisis de éstas, se determinaron las concentraciones de sulfato finales y con dichos resultados se determinó el porcentaje de remoción de sulfatos del efluente del lavador de gases de una planta de sulfonación.

4.1.2 Diseño de la investigación

El diseño de la presente investigación obedece a un modelo experimental-longitudinal, considerando cuatro etapas, las cuales se muestran en la **Figura N° 4.1 (Ver pág. N° 54)**

FIGURA N° 4.1
DISEÑO DE LA INVESTIGACIÓN



Fuente : Elaboración propia

- a) **Primera etapa de la investigación.**- En la primera etapa de la investigación se realizó los análisis en el laboratorio vinculado a la variable de investigación, con el propósito de identificar las características fisicoquímicas del efluente del lavador de gases.
- b) **Segunda etapa de la investigación.**- En la segunda etapa de la investigación en base al resultado obtenido en la primera etapa, se realizó los ensayos en el laboratorio vinculado a la variable de investigación. En esta etapa se identificó la razón másica entre Pac HB y sulfatos, y concentración de cal.
- c) **Tercera etapa de la investigación.**- En la tercera etapa de la investigación se realizó los análisis en el laboratorio vinculado a la variable de investigación, con el propósito de identificar las características fisicoquímicas del efluente del lavador de gases después de la precipitación de etringita.
- d) **Cuarta etapa de la investigación.**- En la cuarta etapa de la investigación se analizaron los resultados obtenidos y se calculó el porcentaje de remoción.

4.2. Población y muestra

- a) **Población.**- Caudal del efluente del lavador de gases de la planta de sulfonación equivalente a un promedio de 357 L/h.
- b) **Muestra.**- La muestra de efluente utilizada para la remoción de sulfatos se determinó dado el diseño del equipo, equivalente a 1,5 L.

4.3. Técnicas e instrumentos para la recolección de la información de campo

4.3.1. Materiales y equipos

- a) **Materia prima :**
 - 1) Efluente del lavador de gases de la planta de sulfonación
- b) **Materiales :**
 - 1) **Reactor (balde de plástico de 6 L.)**- La reacción de formación de etringita se llevó a cabo en un reactor de capacidad de 6 litros, suficiente para la cantidad de muestra tratada. Se emplea esta

capacidad para evitar rebose y salpicaduras durante el proceso de remoción.

FIGURA N° 4.2

DETERMINACIÓN DE CAUDAL DEL EFLUENTE



Fuente : Elaboración propia

FIGURA N° 4.3

EFLUENTE DEL LAVADOR DE GASES



Fuente : Elaboración propia

FIGURA N° 4.4

REACTOR



Fuente : Elaboración propia

- 2) **Tanque de homogenización (bidón de 60 L.)**.- Se requirió de un tanque para homogenizar y almacenar el efluente muestreado de la planta de sulfonación.
- 3) Vasos precipitados de 1 000 y 500 mL
- 4) Probetas de 1 000, 500 y 250 mL
- 5) Picetas
- 6) Baguetas
- 7) Espátula
- 8) Envases de plástico de 500 mL
- 9) Luna de reloj
- 10) Papel toalla
- 11) Tela filtrante
- 12) Jeringas

FIGURA N° 4.5

TANQUE DE HOMOGENIZACIÓN Y ALMACENAMIENTO



Fuente : Elaboración propia

c) REACTIVOS

- 1) **Pac HB (Policloruro de aluminio).**- El Pac HB es un coagulante ácido que nos otorga los iones aluminato, componente principal de formación de etringita. El porcentaje de pureza es mayor al 20% en contenido de alúmina.
- 2) **Cal viva (Óxido de Calcio).**- Se empleó cal viva para la preparación de lechada de cal al 15%, este aporta la cantidad de iones calcio necesario para la reacción de precipitación de etringita. Otra función importante es de incrementar el pH de la solución dentro del rango de precipitación de etringita entre 11 y 12,5.

La cal viva es adicionada lentamente en un recipiente que contiene la cantidad de agua necesaria y en agitación para llevar la solución al 15%, por ejemplo para preparar 1 Kg de lechada de cal al 15% es necesario adicionar 150 g de cal en 850 g de agua. La solubilidad de la cal en el agua es muy baja y los cristales del

hidrato están suspendidos. Una buena y apropiada agitación evitará la formación de aglomerados y decantaciones.

FIGURA N° 4.6

PAC HB



Fuente : Elaboración propia

FIGURA N° 4.7

CAL VIVA



Fuente : Elaboración propia

- 3) **Floculante (ARIFLOC C606).**- Se empleó un floculante aniónico para formar flocs de etringita y acelerar el tiempo de sedimentación.
- 4) **Buffer.**- Se emplearon buffers de valores 4, 7 y 10 para la calibración y control de pH.

FIGURA N° 4.8

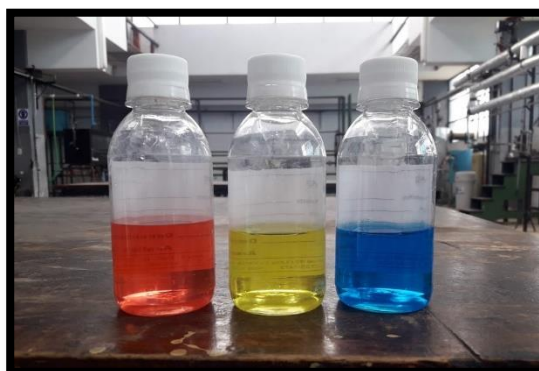
FLOCULANTE



Fuente : Elaboración propia

FIGURA N° 4.9

BUFFERS



Fuente : Elaboración propia

d) EQUIPOS :

1) Equipo de Flotación DENVER.- El equipo que se empleó para las pruebas tiene un tubo vertical de acero inoxidable con válvula de control de aire, utilizado para pruebas de flotación y desbaste por burbujeo. El mecanismo se apoya en un brazo móvil con resorte regulado que se eleva o baja en una columna mediante una manivela a través de un engranaje de piñón y cremallera, se puede bloquear a cualquier altura deseada.

La máquina accionada a motor incluye un motor monofásico de 1/4 HP que funciona tanto con corriente de 220 V, 60 Hz, una transmisión con correa en V, interruptor de palanca, indicador de RPM y una perilla de ajuste de velocidad.

FIGURA N° 4.10

EQUIPO DE FLOTACIÓN DENVER



Fuente : Elaboración propia

Impulsor de la celda de flotación: El impulsor que se utilizó fue de tipo mariposa. Tiene 8 aletas.

FIGURA N° 4.11

IMPULSOR DE CELDA DE FLOTACIÓN



Fuente : Elaboración propia

Difusor: Empleado para dispersar las burbujas de aire.

FIGURA N° 4.12

DIFUSOR



Fuente : Elaboración propia

- 2) **pHmetro portátil.**- El pHmetro empleado para la medición de pH fue de marca Adwa AD 12 waterproof, medidor de pH digital con medidor de temperatura. Precisión de 0,01 pH.

FIGURA N° 4.13

PHMETRO PORTÁTIL



Fuente : Elaboración propia

- 3) **Secador.-** Se empleó una estufa como equipo de secado para retirar la humedad de los lodos de etringita y poder cuantificar los pesos, además de realizar la caracterización de su contenido. El equipo utilizado fue de la marca Ceramic Instruments.

FIGURA N° 4.14

ESTUFA



Fuente : Elaboración propia

- 4) **Balanza electrónica.**- Para el control de pesos de la preparación de lechada de cal al 15% y floculante se utilizó una balanza electrónica marca HENKEL de precisión 300/0,01 g.

FIGURA N° 4.15

BALANZA ELECTRÓNICA



Fuente : Elaboración propia

- 5) **Agitador.**- Se utilizó un agitador mecánico con el fin de mantener la lechada de cal en suspensión.
- 6) **Sistema de filtración prensa.**- Para filtrar el lodo generado de etringita durante las pruebas, se utilizó un sistema de filtración que consta de un compresor marca DYNAMIC con una potencia de trabajo del motor de 1,5 kW y rango de operación de 0 a 8 bares; y una cámara de filtración, que posee como partes una válvula reguladora de presión y una tapa tipo prensa.

FIGURA N° 4.16
AGITADOR MECÁNICO



Fuente : Elaboración propia

FIGURA N° 4.17
SISTEMA DE FILTRACIÓN



Fuente : Elaboración propia

4.3.2. Obtención de muestras

La recolección de muestra del efluente vertido al drenaje del lavador de gases de la planta de sulfonación se llevó a cabo transcurridos 15 días de operación de la planta con el fin de tomar una muestra representativa de la planta en funcionamiento.

Se recolectó en un bidón plástico, empleado como tanque de homogenización y almacenamiento, el total de 60 L. de efluente del lavador de gases, cantidad suficiente para poder realizar las pruebas, y este se trasladó al LOPU (Laboratorio de Operaciones y Procesos Unitarios) de la Facultad de Ingeniería Química de la Universidad Nacional del Callao.

FIGURA N° 4.18

OBTENCIÓN DE MUESTRAS



Fuente : Elaboración propia

4.3.3. Determinación de las características fisicoquímicas del efluente

- a) **Determinación de sulfatos.**- La determinación de la concentración de los iones sulfato del efluente del lavador de gases de la planta de sulfonación y la concentración de los iones sulfato de las muestras después del proceso de remoción, fueron analizadas por un laboratorio externo con el fin de garantizar un resultado confiable.

El procedimiento que se empleó es una modificación del método turbidimétrico del sulfato de bario. Los iones sulfato en la muestra reaccionan con el cloruro de bario y forman una turbidez de sulfato de bario insoluble, la cantidad de turbidez formada es proporcional a la concentración de sulfatos en la muestra y se mide empleando un espectrofotómetro.

Como primer paso se realiza la construcción de la curva de calibración, preparando una curva con patrones de 0 a 50 ppm de concentración de sulfatos, de cada patrón se toma 25 mL de muestra y se agrega 0,25 g. de reactivo y se deja desarrollar la turbidez en 5 minutos. Posteriormente se da lectura a la absorbancia ($\lambda = 450 \text{ nm}$) Se construye la curva: Absorbancia vs. Concentración de sulfatos (ppm).

Luego se determina la concentración de sulfatos de la muestra; se mide 25 mL de muestra y se le adiciona 0,25 g. de cloruro de bario, se deja desarrollar la turbidez por 5 min. y se da lectura a la absorbancia en el espectrofotómetro. Según la curva de calibración se da lectura a la concentración de sulfatos.

- b) **Determinación de pH.**- Antes de realizar cualquier medición con el pHmetro se calibró el equipo. Para la calibración se introduce el electrodo en las soluciones buffer de pH 7 y 10.

Después de haber calibrado el pHmetro se procede a medir el pH de las muestras en el reactor. Se espera hasta que la lectura del pH se estabilice.

FIGURA N° 4.19

LECTURA DE pH



Fuente : Elaboración propia

4.3.4. Precipitación de etringita

Se debe de tener en cuenta que se empleó como reactor un balde plástico de capacidad de 6 litros donde se agregó 1,5 litros de muestra de efluente del lavador de gases de la planta de sulfonación. Se añadieron los reactivos Pac HB y lechada de cal de acuerdo a las cantidades definidas para cada experimento a una velocidad de agitación de 1 000 rpm durante un lapso de tiempo de 30 minutos. Después de este tiempo se añadió 200 mL de floculante a altas velocidades de agitación con el fin de formar los flocs de etringita y estos puedan sedimentar con mayor velocidad. Posteriormente de 1 hora de tiempo de sedimentación se procedió a tomar muestra del efluente tratado para su respectivo análisis.

- a) Determinación de la razón másica entre Pac HB y sulfatos.-** En primer lugar se fijó la concentración de cal y se determinó una razón másica inicial entre Pac HB: SO_4^{2-} en base a los antecedentes de estudio, los cuales indican que a una razón másica de 7 se obtienen altos porcentajes de remoción.

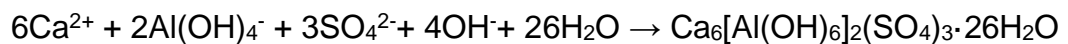
FIGURA N° 4.20

FORMACIÓN DE ETRINGITA EN EL REACTOR



Fuente : Elaboración propia

La concentración de cal fijada se determinó de acuerdo a la reacción de formación de etringita:



El cálculo estequiométrico se realizó para una lechada de cal preparada al 15% en peso. La concentración de cal debe ser en exceso debido a la presencia de otros contaminantes en el efluente. Para determinar el comportamiento de la razón másica entre Pac HB: SO_4^{2-} se empleó una concentración de 40977 ppm de cal.

Para las pruebas, se modificó el valor de la razón másica entre Pac HB: SO_4^{2-} con el fin de observar los efectos que se obtendrían sobre la concentración final de sulfatos y por ende sobre el porcentaje de remoción alcanzado. Las razones másicas escogidas fueron de 4,5; 6; 6,5; 7; 8; 9 y 11. Esta variación de razón másica se verifica de forma

rápida sobre el valor de pH y por la formación de lodos al final de la reacción.

Posteriormente las muestras obtenidas se analizaron con el propósito de determinar el contenido residual de sulfatos y los resultados se anotaron en la **Tabla N° 4.1** con el fin de ver la comparativa entre ellos.

TABLA N° 4.1

DETERMINACIÓN DE LA RAZÓN MÁSCICA PAC HB: SO₄²⁻

Concentración inicial de SO ₄ ²⁻ (ppm)	Razón másica Pac HB:SO ₄ ²⁻	Concentración final de SO ₄ ²⁻ (ppm)	%Remoción
C _{is}	R ₁	C _{f1}	%R ₁
	R ₂	C _{f2}	%R ₂
	R ₃	C _{f3}	%R ₃

	R _n	C _{fn}	%R _n

Fuente : Elaboración propia

b) Determinación de la concentración de cal.- En este caso se fijó la mejor razón másica entre Pac HB: SO₄²⁻ obtenida en el paso anterior y se varió la concentración de cal para observar los efectos que se obtendrían sobre la concentración final de sulfatos, debido a un déficit y exceso de este. Su variación se ve detectada por el pH, con valores dentro y fuera de rango de la reacción de formación de etringita.

Las concentraciones de cal empleadas fueron de 28 115, 33 386, 40 977, 42 492, 46 451, 50 079 y 56 500 ppm.

Posteriormente las muestras obtenidas se analizaron con el propósito de determinar el contenido residual de sulfatos y los resultados se anotaron en la **Tabla N° 4.2 (Ver pág. N° 71)** con el fin de ver la comparativa entre ellos.

TABLA N° 4.2

DETERMINACIÓN DE LA CONCENTRACIÓN DE CAL

Concentración inicial de SO ₄ ²⁻ (ppm)	Concentración de cal (ppm)	Concentración final de SO ₄ ²⁻ (ppm)	% Remoción
C _{is}	C ₁	C _{f1}	%R ₁
	C ₂	C _{f2}	%R ₂
	C ₃	C _{f3}	%R ₃

	C _n	C _{fn}	%R _n

Fuente : Elaboración propia

4.3.5. Determinación del porcentaje de remoción

El porcentaje de remoción se determinó según la siguiente ecuación:

$$\% \text{Remoción} = \frac{C_{is} - C_{fs}}{C_{is}} * 100$$

Donde:

C_{is} : Concentración inicial de sulfatos (ppm)

C_{fs} : Concentración final de sulfatos (ppm)

4.3.6. Determinación de las características del lodo de etringita

Los lodos generados después del proceso de remoción de cada experimento, se someten a un proceso de filtración con el fin de determinar sus masas.

El lodo es transportado desde el reactor al filtro prensa, donde se añade su contenido a la cámara de filtración donde previamente se instaló una malla y tela filtrante en el fondo, la cual retiene la torta de etringita y permite el paso del líquido filtrado.

Encendido el compresor, se tapa la cámara de filtración y se regula la presión a 2 bares para dar inicio al proceso de filtración. Posteriormente se despresuriza, se retira la tapa y se obtiene la torta de etringita.

FIGURA N° 4.21

ADICIÓN DE LODO A LA CÁMARA DE FILTRACIÓN



Fuente : Elaboración propia

Esta torta se seca hasta peso constante en una estufa a 80°C.

Encontrada la razón másica de Pac HB:SO₄²⁻ y concentración de cal óptimas, se determina el contenido de etringita del lodo que generó mayor % de remoción mediante determinación de metales realizado en un laboratorio externo.

4.4. Análisis y procesamiento de datos

Para los análisis y procesamiento de datos se utilizó la plataforma de EXCEL versión 2016 como herramienta para realizar gráficos y regresiones de los resultados de las variables que se controlaron, como la razón másica entre Pac HB y sulfatos, concentración de cal, tiempo y pH. Además se empleó el Software SPSS 22 para el tratamiento estadístico de datos por su capacidad para trabajar con grandes bases de datos y una sencilla interfaz para los análisis correlacionales entre las variables.

FIGURA N° 4.22
TORTA DE ETRINGITA



Fuente : Elaboración propia

V. RESULTADOS

5.1. Resultados descriptivos

5.1.1. Características fisicoquímicas del efluente

En la siguiente tabla se puede apreciar los resultados de la caracterización del efluente del lavador de gases de la planta de sulfonación, donde se tomó como interés el pH y la concentración de iones sulfato.

TABLA N° 5.1

CARACTERÍSTICAS FISICOQUÍMICAS DEL EFLUENTE

Característica	Valor
pH	8,03
Concentración SO_4^{2-} (ppm)	25535

Fuente : Elaboración propia

5.1.2. Concentración final de sulfatos al variar la razón másica Pac HB: SO_4^{2-}

En la **Tabla N° 5.2** se observa los resultados de la concentración final de sulfatos de las muestras tratadas a una concentración constante de cal de 40 977 ppm frente a la variación de la razón másica de Pac HB: SO_4^{2-}

TABLA N° 5.2

RAZÓN MÁSCICA Pac HB: SO_4^{2-} VS. CONCENTRACIÓN FINAL DE SULFATOS

Razón másica Pac HB:SO_4^{2-}	Concentración final de SO_4^{2-} (ppm)
4.5	13830.1
6	12995.1
6.5	11398.8
7	11175.5
8	10579.5
9	13579.3
11	15153.1

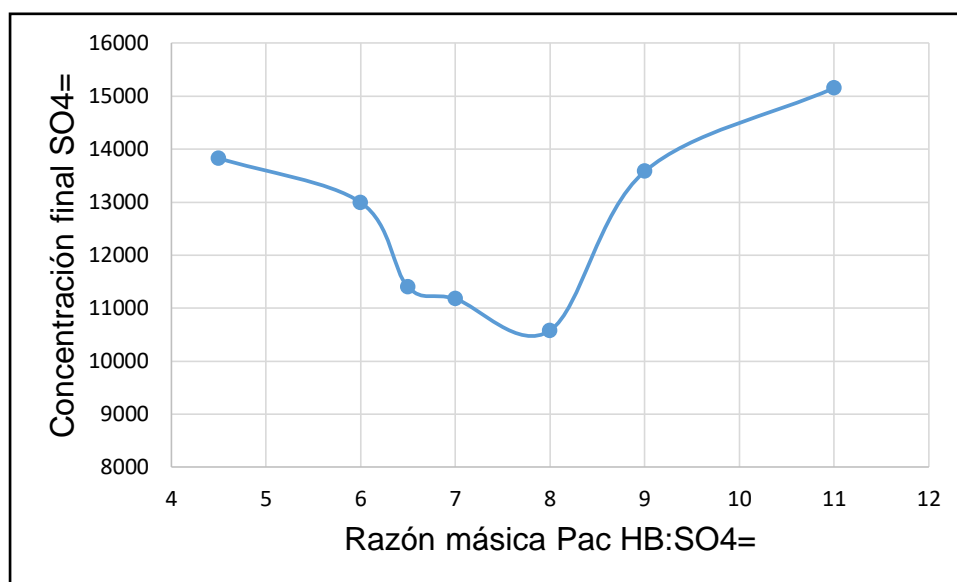
Fuente : Elaboración propia

En el siguiente gráfico se aprecia el comportamiento de la concentración final de sulfatos frente a la razón másica Pac HB: SO_4^{2-} y se observa que a medida que aumenta la razón másica de 4,5 a 8 disminuye la concentración debido al incremento de dosificación de Pac HB

A razones másicas mayores a 8 aumenta la concentración final de sulfatos debido a la formación de la sal de Friedel, $\text{Ca}_6[\text{Al}(\text{OH})_6]_2\text{Cl}_6$, esta sal se obtiene por un exceso del anión cloruro en la solución, desplazando el anión sulfato de la etringita.

GRÁFICO N° 5.1

RAZÓN MÁSCICA Pac HB: SO_4^{2-} VS. CONCENTRACIÓN FINAL DE SULFATOS



Fuente : Elaboración propia

5.1.3. Porcentaje de remoción al variar la razón másica Pac HB: SO_4^{2-}

En la **Tabla N° 5.3 (Ver pág. N° 76)** se presenta el % de remoción alcanzado frente a la variación de la razón másica Pac HB: SO_4^{2-} .

TABLA N° 5.3

RAZÓN MÁSICA Pac HB:SO₄²⁻ VS. %REMOCIÓN

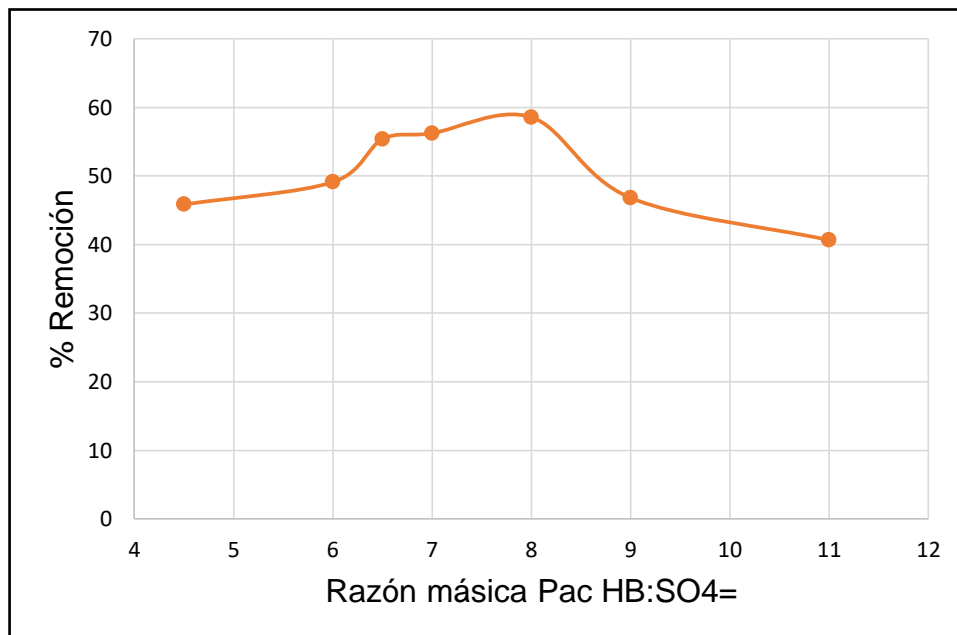
Razón másica Pac HB:SO ₄ ²⁻	% Remoción
4.5	45,84
6	49,11
6.5	55,36
7	56,23
8	58,57
9	46,82
11	40,66

Fuente : Elaboración propia

En el **Gráfico N° 5.2** se aprecia que se alcanza el mayor % de remoción al utilizar la razón másica de 8 y a medida que se excede de esta razón, el % de remoción disminuye.

GRÁFICO N° 5.2

RAZÓN MÁSICA Pac HB:SO₄²⁻ VS. % REMOCIÓN



Fuente : Elaboración propia

En la **Tabla N° 5.4** y **Gráfico N° 5.3** se presentan la relación entre la concentración final de sulfatos y el % de remoción frente a la variación de la razón másica Pac HB: SO_4^{2-} y se concluye que al aumentar el contenido de Pac HB se disminuye la concentración final de sulfatos y por ende aumenta el % de remoción.

TABLA N° 5.4

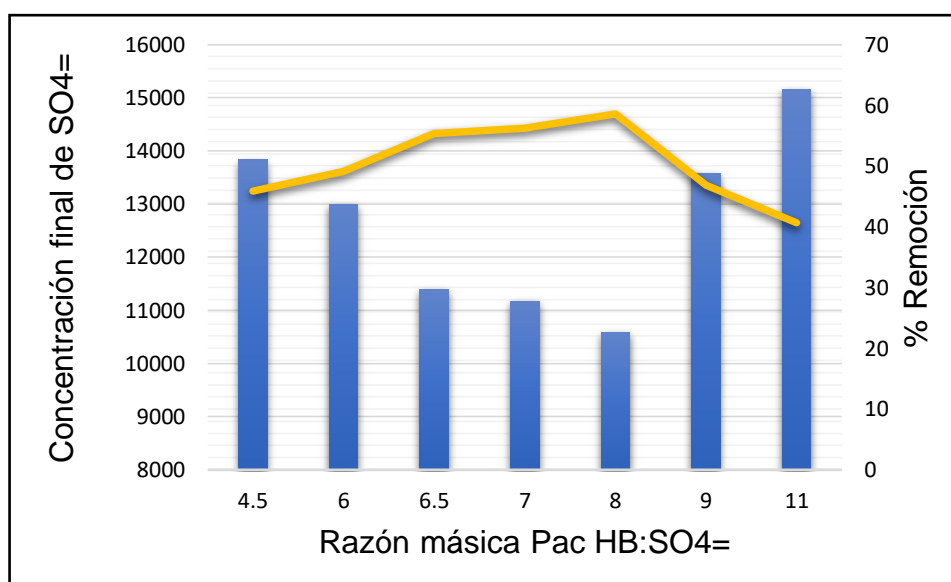
EFFECTO DE LA RAZÓN MÁSCICA PAC HB: SO_4^{2-}

Concentración inicial de SO_4^{2-} (ppm)	Razón másica Pac HB: SO_4^{2-}	Concentración final de SO_4^{2-} (ppm)	%Remoción
25535	4.5	13830,1	45,8
	6	12995,1	49,1
	6.5	11398,8	55,4
	7	11175,5	56,2
	8	10579,5	58,6
	9	13579,3	46,8
	11	15153,1	40,7

Fuente : Elaboración propia

GRÁFICO N° 5.3

RAZÓN MÁSCICA Pac HB: SO_4^{2-} VS.CONCENTRACIÓN FINAL DE SULFATOS Y % REMOCIÓN



Fuente : Elaboración propia

5.1.4. pH al variar la razón másica de Pac HB:SO₄²⁻

En la **Tabla N° 5.5** se presenta los valores de pH al variar la razón másica Pac HB: SO₄²⁻.

TABLA N° 5.5

RAZÓN MÁLICA Pac HB:SO₄²⁻ VS. pH

Razón másica Pac HB:SO₄²⁻	pH
4.5	12.22
6	11.81
6.5	11.39
7	11.30
8	11.15
9	11.01
11	10.29

Fuente : Elaboración propia

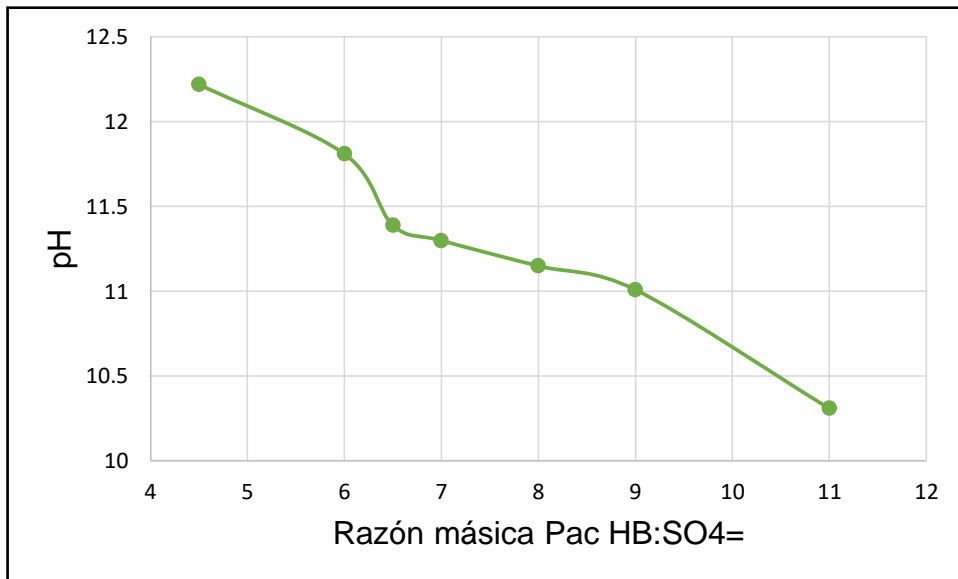
En el **Gráfico N° 5.4 (Ver pág. N° 80)** se observa la variación de pH a diferentes valores de razón másica. A medida que se incrementa la dosificación de Pac HB los valores del pH disminuye, esto debido a que el Pac HB es un coagulante ácido con un rango de pH de 2 a 3.

5.1.5. Lodo generado al variar la razón másica de Pac HB: SO₄²⁻

En la **Figura N° 5.1 (Ver pág. N° 79)** se observa que al aumentar la razón másica, el volumen de lodo generado también aumenta, esto quiere decir que el volumen está en relación directa con la razón másica Pac HB: SO₄²⁻.

GRÁFICO N° 5.4

RAZÓN MÁSCICA Pac HB : SO_4^{2-} VS. pH



Fuente : Elaboración propia

FIGURA N° 5.1

LODO GENERADO AL VARIAR LA RAZÓN MÁSCICA Pac HB : SO_4^{2-}



Fuente : Elaboración propia

En la **Tabla N° 5.6 (Ver pág. N° 80)** se presenta los resultados de la masa de los lodos generados después de realizar la filtración en el filtro prensa frente a la variación de la razón másica Pac HB: SO_4^{2-}

TABLA N° 5.6

RAZÓN MÁSCICA Pac HB:SO₄²⁻ VS. MASA DE LODO

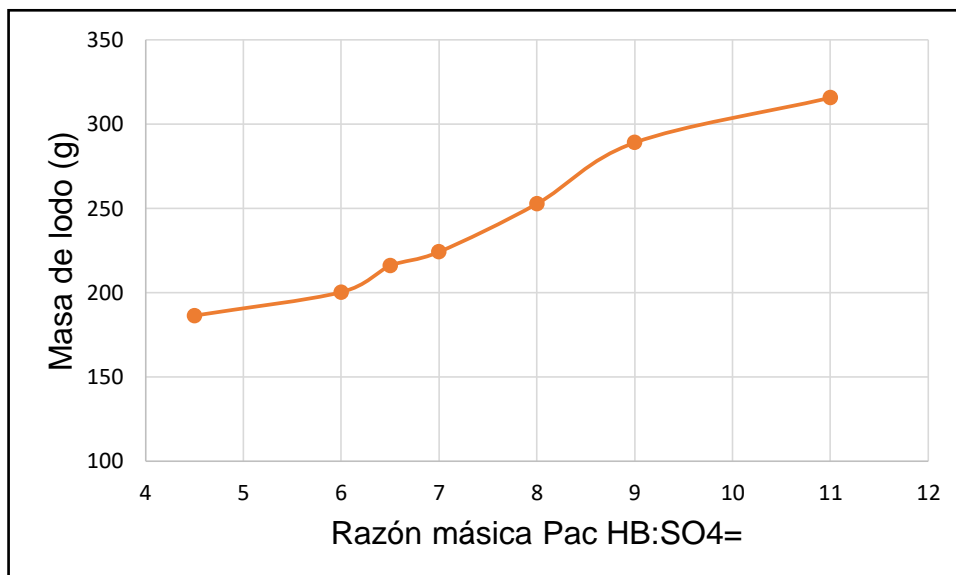
Razón másica Pac HB : SO ₄ ²⁻	Masa de lodo (g)
4,5	186,3
6	200,2
6,5	215,8
7	224,1
8	252,6
9	288,9
11	315,5

Fuente : Elaboración propia

En el **Gráfico N° 5.5** se observa la tendencia que a mayor dosificación de Pac HB se genera mayor masa de lodos.

GRÁFICO N° 5.5

RAZÓN MÁSCICA PAC HB:SO₄²⁻ VS. MASA DE LODO



Fuente : Elaboración propia

5.1.6. Concentración final de sulfatos al variar la concentración de cal

En la **Tabla N° 5.7** se observa los resultados de la concentración final de sulfatos de las muestras tratadas a una razón másica constante de Pac HB: SO_4^{2-} de 8 frente a la variación de la concentración de cal.

TABLA N° 5.7
CONCENTRACIÓN DE CAL VS. CONCENTRACIÓN FINAL DE SULFATOS

Concentración de cal (ppm)	Concentración final de SO_4^{2-} (ppm)
28115	20361,8
33386	18516,0
40977	10579,5
42492	14815,6
46451	18350,9
50079	18528,5
56500	19135,7

Fuente : Elaboración propia

En el **Gráfico N° 5.6 (Ver pág. N° 83)** se aprecia el comportamiento de la concentración final de sulfatos frente a la concentración de cal y se observa que a medida que aumenta la concentración de cal de 28 115 a 40 977 ppm disminuye la concentración debido al incremento de iones calcio.

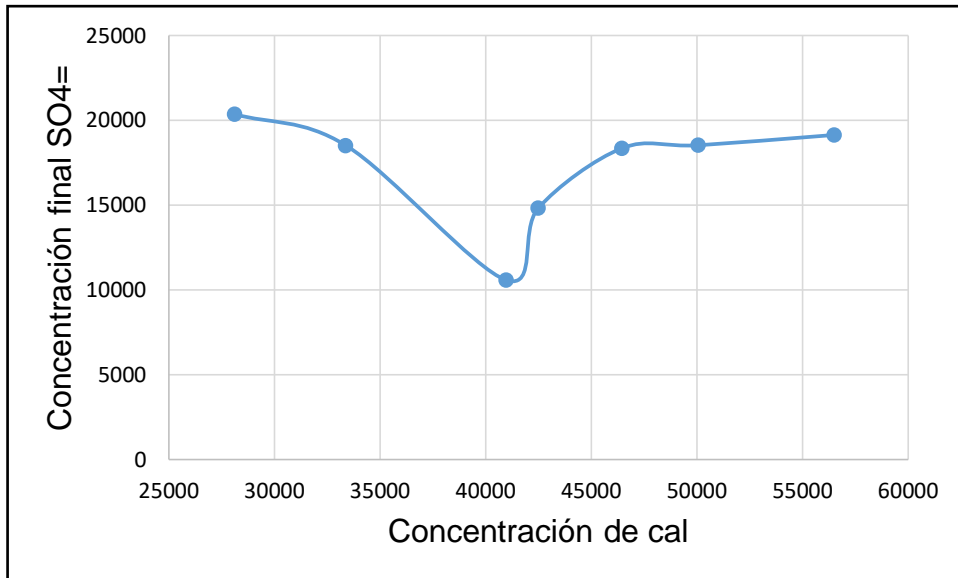
A concentraciones de cal mayores a 40 977 ppm aumenta la concentración final de sulfatos debido a un déficit de los iones aluminato aportados por el Pac HB.

5.1.7. Porcentaje de remoción al variar la concentración de cal

En la **Tabla N° 5.8 (Ver pág. N° 82)** se presenta el porcentaje de remoción alcanzado frente a la variación de la concentración de cal.

GRÁFICO N° 5.6

CONCENTRACIÓN DE CAL VS. CONCENTRACIÓN FINAL DE SULFATOS



Fuente : Elaboración propia

TABLA N° 5.8

CONCENTRACIÓN DE CAL VS. %REMOCIÓN

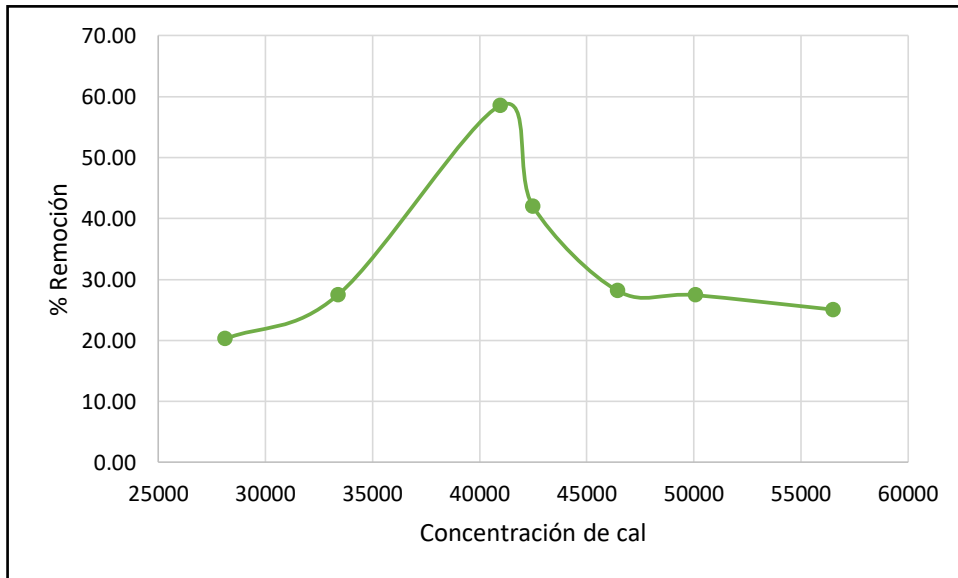
Concentración de cal (ppm)	% Remoción
28115	20,26
33386	27,49
40977	58,57
42492	41,98
46451	28,13
50079	27,44
56500	25,06

Fuente : Elaboración propia

En el **Gráfico N° 5.7 (Ver pág. N° 83)** se aprecia que se alcanza el mayor porcentaje de remoción al utilizar la concentración de cal de 40 977 ppm y a medida que se excede de esta concentración, el porcentaje de remoción disminuye.

GRÁFICO N° 5.7

CONCENTRACIÓN DE CAL VS. % REMOCIÓN



Fuente : Elaboración propia

En el **Gráfico N° 5.7** se presenta la relación entre la concentración final de sulfatos y el porcentaje de remoción frente a la variación de la concentración de cal y se concluye que al aumentar el contenido de cal, aumenta la concentración final de sulfatos y por ende disminuye el porcentaje de remoción.

TABLA N° 5.9

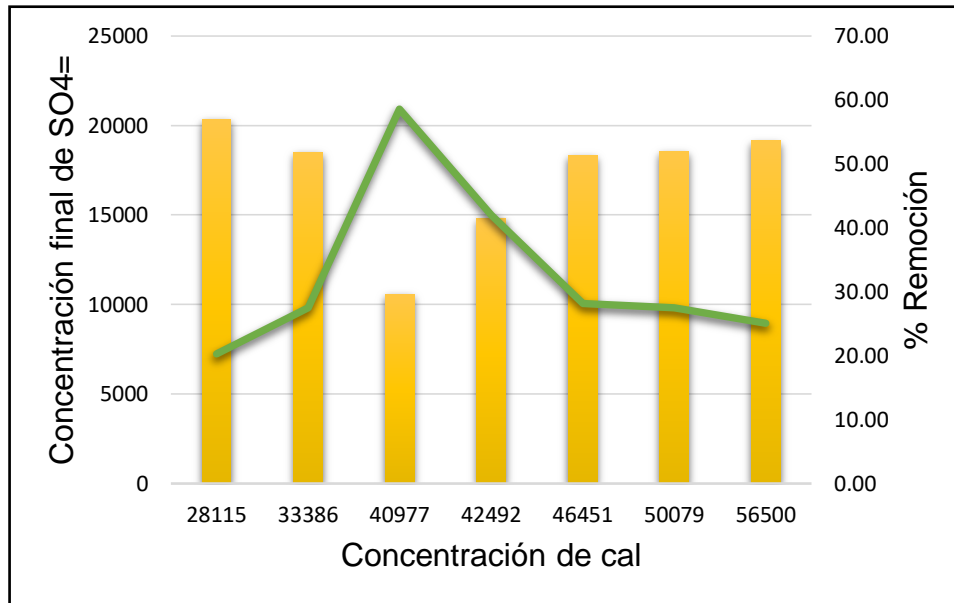
EFFECTO DE LA CONCENTRACIÓN DE CAL

Concentración inicial de SO ₄ ²⁻ (ppm)	Concentración de cal (ppm)	Concentración final de SO ₄ ²⁻ (ppm)	%Remoción
25535	28115	20361,8	20,3
	33386	18516,0	27,5
	40977	10579,5	58,6
	42492	14815,6	41,9
	46451	18350,9	28,1
	50079	18528,5	27,4
	56500	19135,7	25,1

Fuente : Elaboración propia

GRÁFICO N° 5.8

CONCENTRACIÓN DE CAL VS. CONCENTRACIÓN FINAL DE SULFATOS Y % REMOCIÓN



Fuente : Elaboración propia

5.1.8. pH al variar la concentración de cal

En la **Tabla N° 5.10** se presenta los valores de pH al variar la concentración de cal.

TABLA N° 5.10

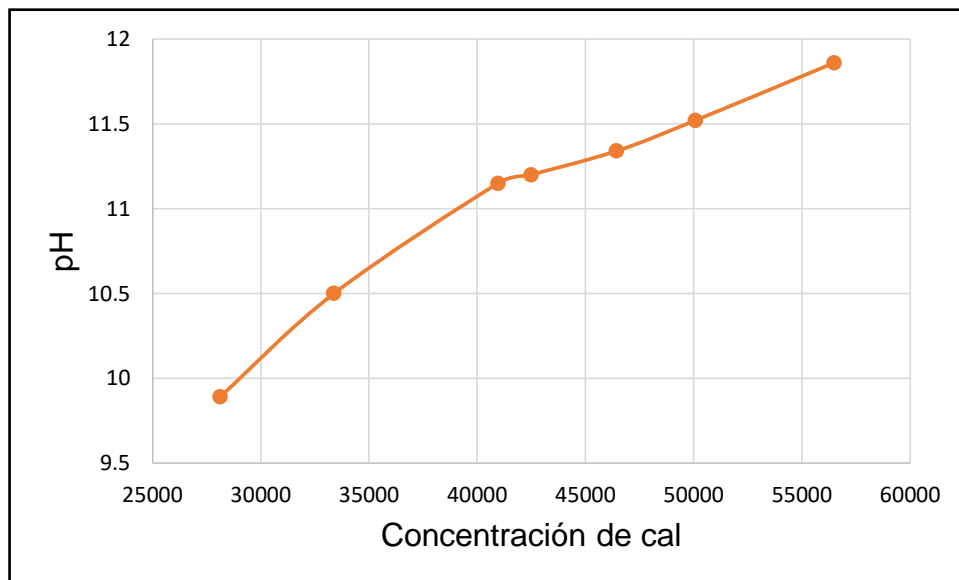
CONCENTRACIÓN DE CAL VS. pH

Concentración de cal (ppm)	pH
28115	9,89
33386	10,50
40977	11,15
42492	11,20
46451	11,34
50079	11,52
56500	11,86

Fuente : Elaboración propia

En el **Gráfico N° 5.9** se observa la variación de pH a diferentes valores de concentración de cal. A medida que se incrementa la concentración de cal los valores del pH aumentan, esto debido a que la cal es una sustancia alcalina.

GRÁFICO N° 5.9
CONCENTRACIÓN DE CAL VS. pH



Fuente : Elaboración propia

5.1.9. Lodo generado al variar la concentración de cal

En la **Figura N° 5.2 (Ver pág. N° 86)** se observa que al aumentar la concentración de cal, el volumen de lodo generado disminuye y luego aumenta, esto debido a la voluminosidad de las diferentes sales al variar la concentración de cal.

En la **Tabla N° 5.11 (Ver pág. N° 86)** se presenta los resultados de la masa de los lodos generados después de realizar la filtración en el filtro prensa frente a la variación de la concentración de cal.

FIGURA N° 5.2

LODO GENERADO AL VARIAR LA CONCENTRACIÓN DE CAL



Fuente : Elaboración propia

TABLA N° 5.11

CONCENTRACIÓN DE CAL VS. MASA DE LODO

Concentración de cal (ppm)	Masa de lodo (g)
28115	200,4
33386	223,9
40977	252,6
42492	284,3
46451	303,5
50079	400,7
56500	518,1

Fuente : Elaboración propia

En el **Gráfico N° 5.10 (Ver pág. N° 87)** se observa la tendencia que a mayor dosificación concentración de cal se genera mayor masa de lodos.

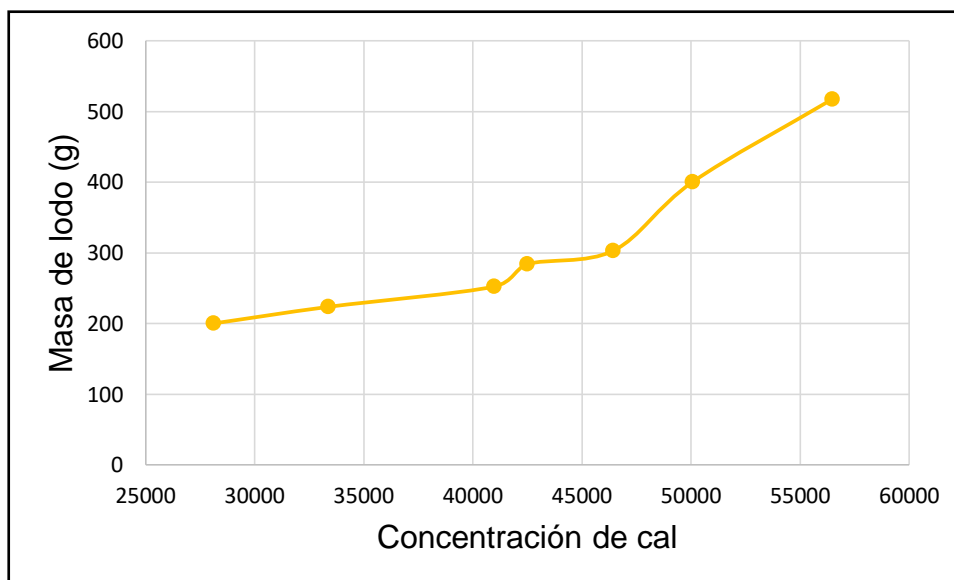
5.1.10. Caracterización del lodo de etringita

Debemos de tener en cuenta que una etringita pura tiene un contenido de 8,3% en alúmina (Al_2O_3).

En la **Tabla N° 5.12 (Ver pág. N° 87)** se presenta el contenido de etringita del lodo que generó el mayor % de remoción de sulfatos.

GRÁFICO N° 5.10

CONCENTRACIÓN DE CAL VS. MASA DE LODO



Fuente : Elaboración propia

TABLA N° 5.12

CARACTERIZACIÓN DEL LODO DE ETRINGITA

Muestra	Alúmina (%)	Etringita (%)
Etringita pura	8,3	100,0
Lodo de etringita	6,6	79,5

Fuente : Elaboración propia

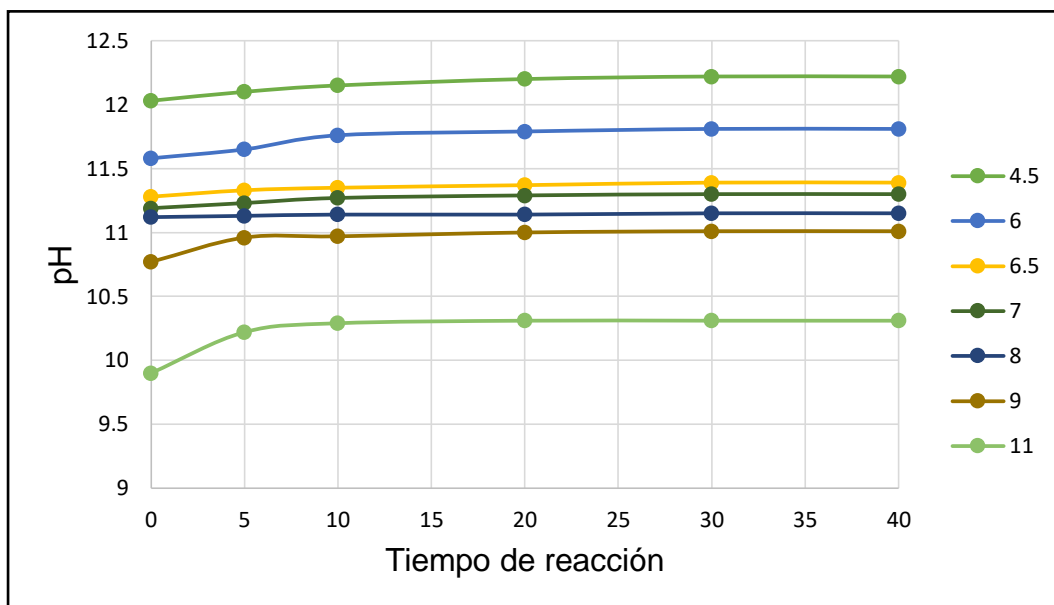
5.2. Resultados inferenciales

5.2.1. Tiempo de reacción

- a) **Relación entre el tiempo de reacción y el pH al variar la razón másica de Pac HB: SO_4^{2-} .** En el siguiente gráfico se muestra el comportamiento del pH a lo largo del tiempo de reacción a diferentes razones másicas Pac HB: SO_4^{2-} .

GRÁFICO N° 5.11

pH, TIEMPO DE REACCIÓN Y RAZÓN MÁSCA Pac HB : SO₄²⁻



Fuente : Elaboración propia

b) Relación entre el tiempo de reacción y el pH al variar la concentración de cal.- En el **Gráfico N° 5.12 (Ver pág. N° 89)** se muestra el comportamiento del pH a lo largo del tiempo de reacción a diferentes concentraciones de cal.

De los gráficos mostrados anteriormente se infiere que el tiempo de reacción (formación de etringita) es de 30 min.

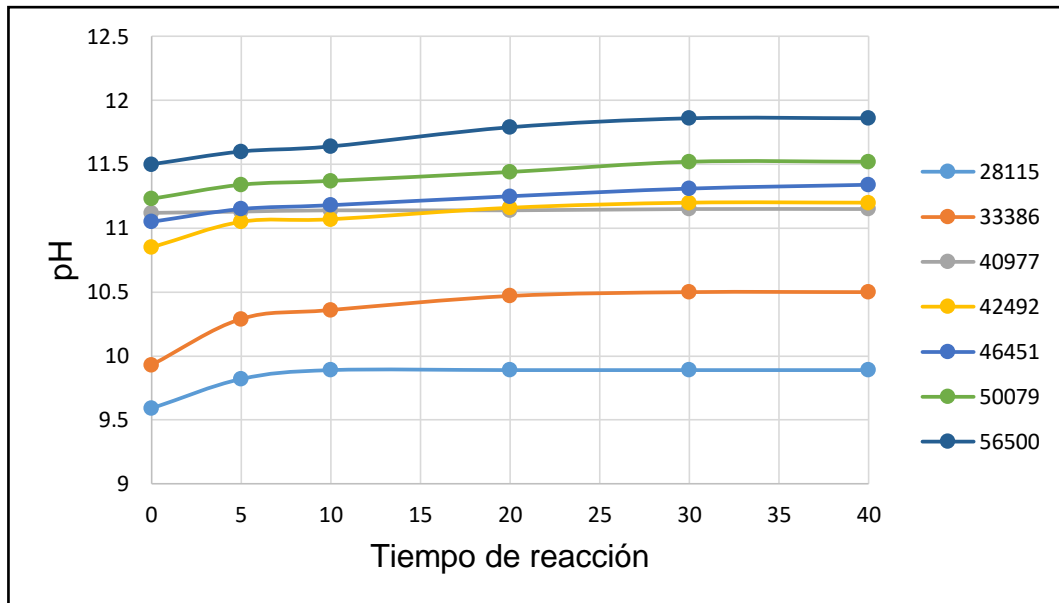
5.3. Técnicas estadísticas para análisis de datos

Para analizar los datos obtenidos se aplicó:

1) Análisis estadísticos descriptiva.- Es una técnica que ayuda a comprender la estructura de los datos, de manera de detectar tanto un patrón de comportamiento general como apartamientos del mismo.

GRÁFICO N° 5.12

pH, TIEMPO DE REACCIÓN Y CONCENTRACIÓN DE CAL



Fuente : Elaboración propia

TABLA N° 5.13

ESTADÍSTICOS DESCRIPTIVOS RAZÓN MÁSCA

	N	Mínimo	Máximo	Media	Desv. típ.
Razón máscica Pac HB : SO ₄ ²⁻	7	4,50	11,00	7,4286	2,12972
Remoción	7	40,66	58,57	50,3700	6,52527
N válido (según lista)	7				

Fuente : Software SPSS 22

2) Análisis de Correlación.- Es una técnica usada para determinar la relación entre dos o más variables cuantitativas.

El coeficiente de correlación de Pearson (r) se mide en una escala de 0 a 1, tanto en dirección positiva como negativa. Un valor de “0” indica que no hay relación lineal entre las variables. Un valor de “1” o

“-1” indica, respectivamente, una correlación positiva perfecta o negativa perfecta entre dos variables.

TABLA N° 5.14

ESTADÍSTICOS DESCRIPTIVOS CONCENTRACIÓN DE CAL

	N	Mínimo	Máximo	Media	Desv. típ.
Concentración De cal	7	28115	56500	42571,43	9672,373
Remoción	7	20,26	58,57	32,7043	13,19214
N válido (según lista)	7				

Fuente : Software SPSS 22

TABLA N° 5.15

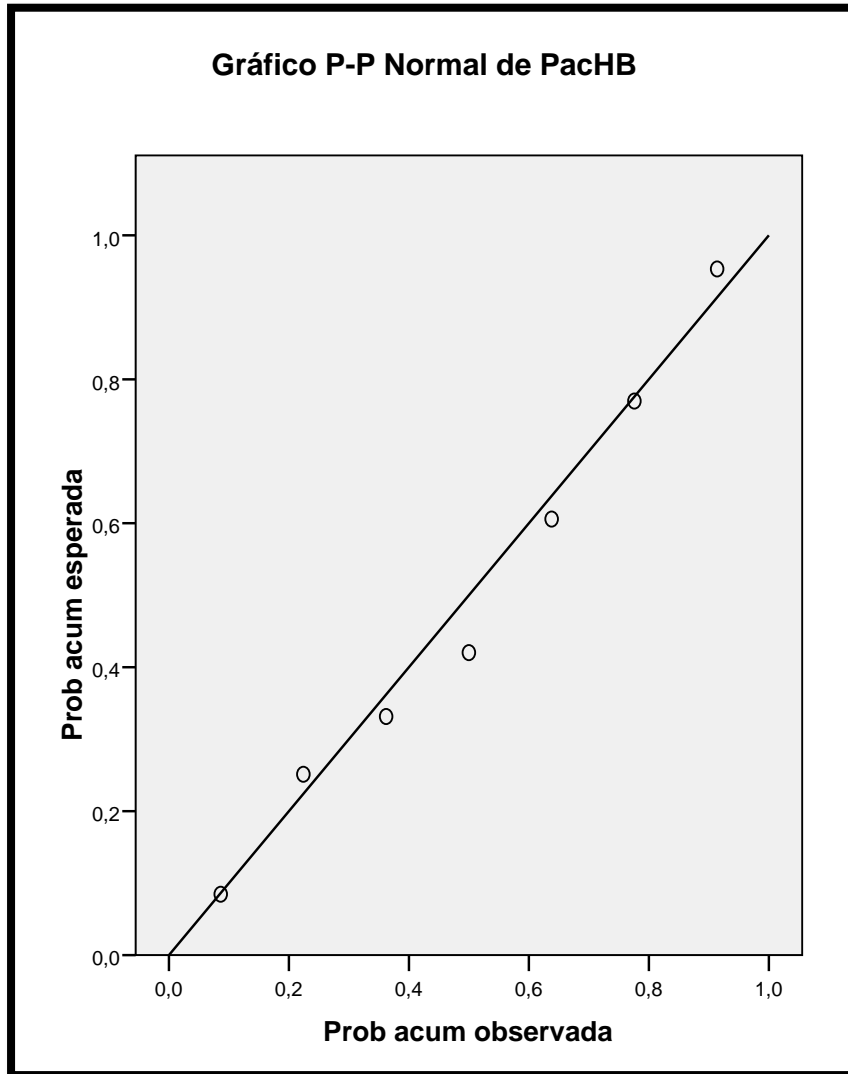
CORRELACIÓN RAZÓN MÁSICA

			Razón másica Pac HB:SO ₄ ²⁻	Remoción
Razón másica Pac HB : SO ₄ ²⁻	Correlación de		1	-.332
	Pearson			.467
	Sig. (bilateral)			
	N		7	7
Remoción	Correlación de		-.332	1
	Pearson			.467
	Sig. (bilateral)			
	N		7	7

Fuente : Software SPSS 22

GRÁFICO N° 5.13

CORRELACIÓN RAZÓN MÁSCA

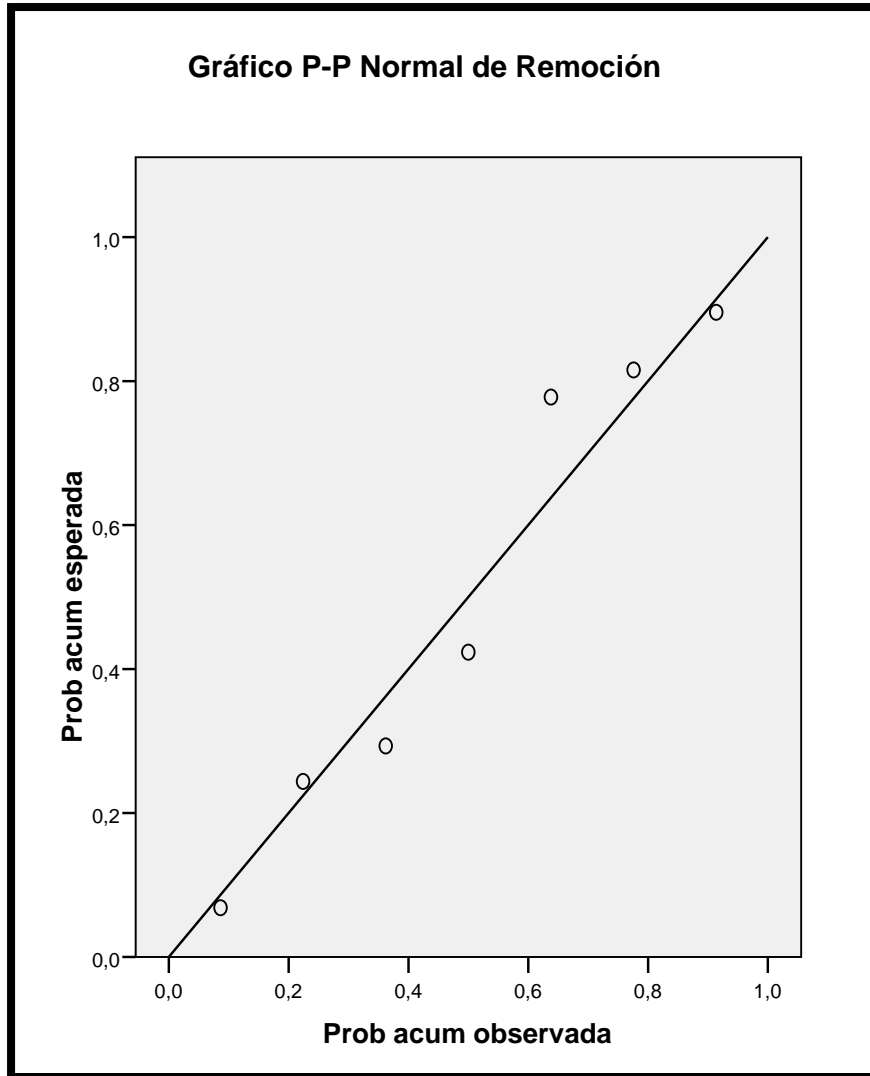


Fuente : Software SPSS 22

GRÁFICO N° 5.14

CORRELACIÓN RAZÓN MÁSCA Y %REMOCIÓN

Correlaciones



Fuente : Software SPSS 22

TABLA N° 5.16

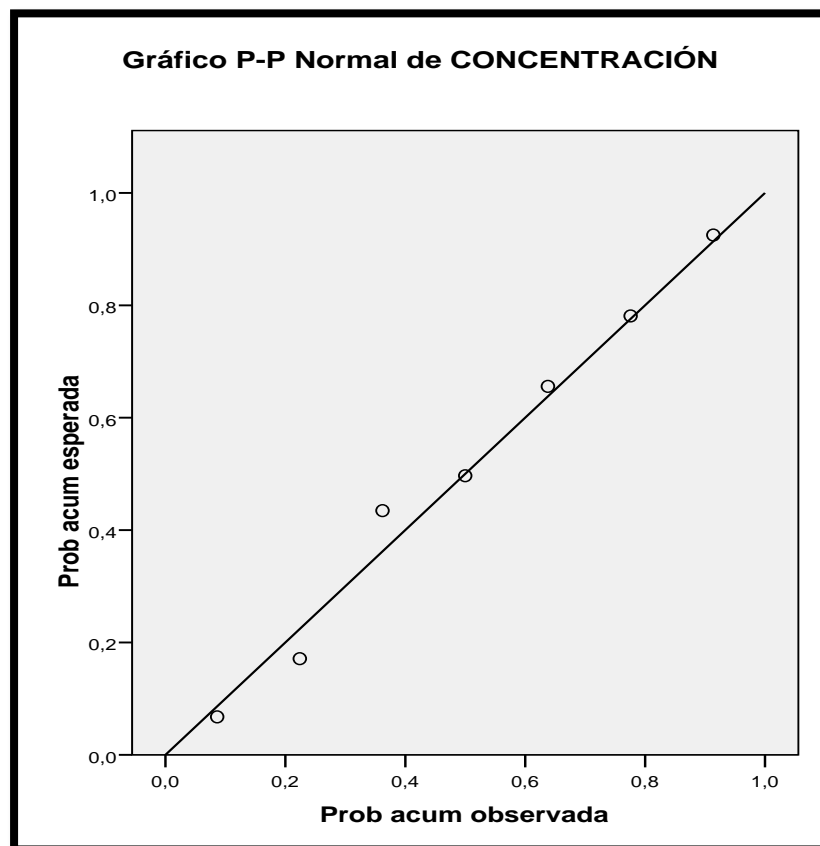
CORRELACIÓN CONCENTRACIÓN DE CAL

		Concentración de cal	Remoción
Concentración de cal	Correlación de Pearson	1	-.029
	Sig. (bilateral)		.951
	N	7	7
Remoción	Correlación de Pearson	-.029	1
	Sig. (bilateral)	.951	
	N	7	7

Fuente : Software SPSS 22

GRÁFICO N° 5.15

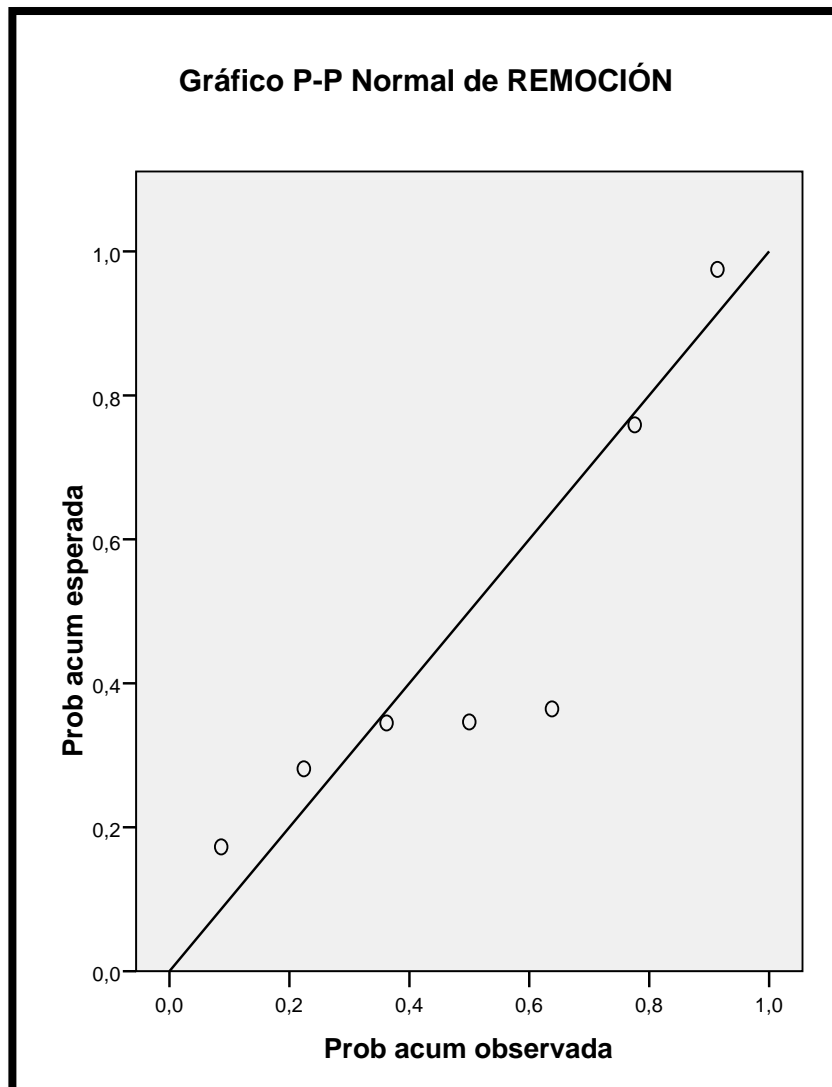
CORRELACIÓN CONCENTRACIÓN DE CAL



Fuente : Software SPSS 22

GRÁFICO N° 5.16

CORRELACIÓN CONCENTRACIÓN DE CAL Y %REMOCIÓN



Fuente : Software SPSS 22

VI. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

6.1. Contrastación de la hipótesis

- 1) **Hipótesis general.**- La hipótesis general planteada en el trabajo fue que la remoción de los sulfatos del efluente del lavador de gases de una planta de sulfonación se logra mediante precipitación de etringita y demostramos que si se logró obteniendo un valor de 58,6% de remoción mediante precipitación de etringita.
- 2) **Hipótesis específicas.**- Las hipótesis específicas planteadas fueron que:
 - a) Las características fisicoquímicas del efluente del lavador de gases de una planta de sulfonación son alta concentración de sulfatos y pH; verificamos que la concentración de sulfatos del efluente del lavador de gases fue de 25 535 ppm, un valor muy alto referente al valor máximo admisible y que el pH fue de 8,03.
 - b) Las condiciones óptimas para lograr la precipitación de etringita son una razón másica entre Pac HB y sulfatos, y una concentración de cal adecuada; encontramos que las condiciones óptimas adecuadas para lograr la precipitación de etringita son una razón másica entre Pac HB y sulfatos de 8 y una concentración de cal de 40 977 ppm, al variar estas condiciones se forman otras sales distintas a la de etringita ocasionando disminución en el porcentaje de remoción.
 - c) Las características fisicoquímicas del efluente del lavador de gases de una planta de sulfonación después de la precipitación de etringita son baja concentración de sulfatos y pH; verificamos que la concentración de sulfatos del efluente del lavador de gases después de la precipitación de etringita fue de 10 579,5 ppm, un valor alto referente al valor máximo admisible pero bajo referente al valor inicial de concentración de sulfatos del efluente y que el pH fue de 11,15.

6.2. Contrastación de los resultados con estudios similares

- 1) El autor en el antecedente “Remoción de sulfatos del efluente del sistema de refrigeración de una central termoeléctrica de ciclo combinado mediante la precipitación química de la Etringita”, concluye que alcanzó un porcentaje de remoción de sulfatos del 91,2% y como sabemos en este trabajo, alcanzamos un porcentaje de remoción de sulfatos del 58,6%. Debemos tener en consideración que la concentración inicial de sulfatos de su efluente tratado fue de 1969 ppm y de nuestra muestra fue de 25 535 ppm; existiendo una notable diferencia, siendo 13 veces mayor del valor de dicha concentración.
- 2) Así mismo, en el otro antecedente cuyo título es “Influencia del pH y dosis de hidróxido de aluminio sobre el porcentaje de eliminación de sulfatos en agua de mina artificial mediante tratamiento por precipitación mineral”, se alcanzó un porcentaje de remoción de 89.6% pero a partir de una concentración inicial de sulfatos de 1 740 ppm y de nuestra muestra fue de 25 535 ppm; existiendo una notable diferencia, siendo 15 veces mayor del valor de dicha concentración.

6.3. Responsabilidad ética

Toda la información que se ha detallado en el presente trabajo de investigación ha sido referenciada y para la obtención de la muestra del efluente se obtuvo consentimiento por parte de la empresa.

VII. CONCLUSIONES

- 1)** Se logró remover el 58,6% de sulfatos del efluente del lavador de gases de una planta de sulfonación mediante precipitación de etringita.
- 2)** Identificamos las características fisicoquímicas del efluente del lavador de gases de una planta de sulfonación siendo estas 25 535 ppm de concentración de sulfatos y pH de 8,03.
- 3)** Determinamos las condiciones óptimas para lograr la precipitación de etringita, resultando una razón másica entre Pac HB y sulfatos de 8 a una concentración de cal de 40 977 ppm.
- 4)** Identificamos las características fisicoquímicas del efluente del lavador de gases de una planta de sulfonación después de la precipitación de etringita siendo estas 10 579,5 ppm de concentración de sulfatos y pH de 11,15.
- 5)** Determinamos el tiempo de reacción de formación de etringita siendo este de 30 min.
- 6)** Determinamos el contenido de etringita del lodo generado por el experimento donde se obtuvo mayor porcentaje de remoción, siendo este de 79,5% en etringita.

VIII. RECOMENDACIONES

- 1)** Evaluar el efecto de la temperatura en la precipitación de etringita. Como sabemos la temperatura tiene un papel importante en la solubilidad de las sales.
- 2)** Evaluar el porcentaje de remoción a diferentes tiempos, ya que sería una alternativa a determinar el tiempo de reacción óptimo.
- 3)** Evaluar la cantidad de floculante adicionado mediante un test de jarras, pues se adicionó una cantidad de floculante acorde a las necesidades pero no se evaluó la cantidad óptima a adicionar.
- 4)** Evaluar el tiempo de sedimentación de los lodos de etringita.
- 5)** Evaluar el incremento del porcentaje de remoción al realizar la precipitación de etringita en serie, pues se espera llegar a cumplir los valores máximos admisibles.
- 6)** Escalar el estudio realizado a planta piloto, ya que el siguiente objetivo es realizarlo a grandes escalas y ponerlo en marcha en la planta de sulfonación.

IX. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- 1) Ballestra, Grupo Desmet. (1999) Plant for continuous SO₃ film sulphonation & sulphation. *SULPHUREX F*, 24 - 25
- 2) Bowell, R. (2004) A review of Sulfate removal options for mine waters. *SRK Consulting, Windsor Court, 1 Windsor Place, Cardiff CF10 3BX, Wales*, 6 - 8
- 3) Brandt Brandt, F. A. (2008) *Comportamiento del hormigón que tiene entre sus componentes moléculas de nanosílice, ante el ataque químico de Sulfato de Magnesio*. Valdivia.
- 4) Brown, T., LeMay, H., Bursten, B., & Burdge, J. (2004) *Química La ciencia central*. México: Pearson Educación
- 5) Cadorin, L., Carissimi, E., & Rubio, J. (2007) Avances en el Tratamiento de Aguas Ácidas de Minas. *Scientia et Technica año XIII*, 849 - 854
- 6) Calvo Brenes, G., Mora Molina, J., Quesada Kimsey, J., & Quesada Carvajal, H. (2010) Aplicación de la tecnología de membranas en el tratamiento de algunos residuos líquidos altamente peligrosos. *Tecnología en Marcha*, 94 - 106
- 7) Castillo López, V. M., & Chávez Pozo, R. R. (2016) *Influencia del pH y dosis de hidróxido de aluminio sobre el porcentaje de eliminación de sulfatos en agua de mina artificial mediante tratamiento por precipitación mineral*. Trujillo
- 8) Chang, R. (2002) *Química*. Santiago de Compostela: Mc Graw Hill
- 9) Fernández Carrasco, L., & Vásquez, E. (2008) Formación de Etringita en Mezclas Ternarias. *X Congreso Nacional de Materiales*, 1
- 10) Fernández López, P. (10 de Febrero de 2012) *Webs de Profesorado-UCLM*. Obtenido de <https://previa.uclm.es/profesorado/pablofernandez/QA-03-equilibrioyvolumentriasprecipitacion.htm>
- 11) Galeano Gallego, J. (2015) *Propuesta para el aprendizaje del concepto de solubilidad en soluciones acuosas en el grado undécimo*. Medellín
- 12) Gallardo, M., Almanza, J. M., Cortés, D. A., & Escobedo, J. C. (2016) Comportamiento mecánico y químico de cementos de sulfoaluminato de calcio obtenido a partir de desechos industriales. *Revista de la*

Asociación Latinoamericana de Control de Calidad, Patología y Recuperación de la Construcción, 15 - 27

- 13)** Gálvez Pérez, A. (2008) *APLICABILIDAD DE PROCESOS DE COAGULACIÓN-FLOCULACIÓN Y DE SISTEMA DE BIOPELÍCULA EN EL TRATAMIENTO DE LIXIVIADOS DE VERTEDEROS DE RESIDUOS URBANOS*. Granada
- 14)** Hassibi, M., & Singh, I. (2014) *LA PREPARACIÓN DE LA LECHADA DE CAL Y SU IMPACTO EN LA EFICIENCIA DEL PROCESO DE FLOTACIÓN Y COSTO DE OPERACIÓN*. Lima
- 15)** Helfferich, F. (1962) *Ion Exchange*. San Francisco: Mc Graw - Hill
- 16)** Henao Granada, V. (2010) *Producción y caracterización de películas semiconductoras de ZnO sobre sustratos de vidrio por la técnica de baño químico (CBD)*. Manizales
- 17)** Herman de Groot, W. (1991) *Sulphonation Technology in Detergent Industry*
- 18)** Huané Jamanca, L. R., & Rivera Reyes, R. G. (2014) *Evaluación de la adición de un inóculo para estimular a escala de laboratorio la biodegradación de efluentes grasos*. Lima
- 19)** López Sánchez, P. (2015) *Estudio sobre la durabilidad de los nuevos tipos de cemento para la evaluación del comportamiento de morteros y hormigones frente a la agresión química de los sulfatos y del agua de mar*. Madrid
- 20)** Macingova, E., & Luptakova, A. (2011) Bioremediation of Sulphate-Rich wastewater. *Proceedings of the 12 th International Conference on Environmental Science and Technology*, 3 - 4
- 21)** Martínez Londoño, E. A. (2010) *Remoción de sulfatos de drenajes ácidos de minería de carbón para producción de yeso sintético mediante el uso de un subproducto industrial*. Medellín
- 22)** Ministerio de Vivienda, C. y. (2009) *Aprueban Valores Máximos Admisibles (VMA) de las descargas de aguas residuales no domésticas en el sistema de alcantarillado sanitario. DECRETO SUPREMO N° 021-2009-VIVIENDA*
- 23)** Morales Escalante, J. 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*. Lima

- 24) Moreno Monge, N. (2014) *Estudio del proceso de precipitación de Etringita para la eliminación de sulfatos en los efluentes generados en Industrias Químicas del Ebro*. Zaragoza
- 25) Nolasco León, L. G., & Rojas Baltazar, J. C. (2013) *Cinética de cristalización de sulfato de Cobre a partir de chatarra de un reactor batch*. Huancayo
- 26) Ramírez Gómez, W. (2006) *CONSIDERACIONES BÁSICAS Y VIABILIDAD DE PROCESOS DE MEMBRANAS DE ÓSMOSIS INVERSA Y NANOFILTRACIÓN COMO ALTERNATIVA PARA EL TRATAMIENTO DE AGUA EN COLOMBIA*. Manizales
- 27) Ramos Burga, L. B. (2015) *Propuesta de un sistema de tratamiento del agua residual del área de teñido de la empresa Hilados Richard's S.A.C. para su reutilización*. Chiclayo
- 28) Reyna Avila, B. (2014) *EL INTERCAMBIO IÓNICO, SU DESCRIPCIÓN Y COMPORTAMIENTO QUÍMICO*. México
- 29) Ruiz Manrique, H., & Wong García, O. (2013) *Evaluación físico-químicos del efluente industrial de Embotelladora la Selva S.A en comparación con el valor máximo admisible de descargas residuales no domésticas de alcantarillado sanitario de la ciudad de Iquitos*. Iquitos
- 30) Sánchez Alvarado, P. C. (2009) *Evaluación técnica y económica de una planta piloto de efluentes industriales*. Lima
- 31) Sánchez Lavado, F. (2007) *Tratamientos combinados físico-químicos y de oxidación para la depuración de aguas residuales de la industria corchera*. Badajoz
- 32) Sans Fonfría, R., & de Pablo Rivas, J. (1989) *Ingeniería Ambiental: Contaminación y tratamientos*. Barcelona: MARCOMBO
- 33) Scribd. (16 de 09 de 2018) Obtenido de <https://es.scribd.com/document/265092135/Especificaciones-de-Cementos-alta-resistencia-inicial>
- 34) Sosa, R. (2013) *Propuesta preliminar para la implementación de un sistema de tratamiento de efluentes en una bodega de Maipú, Mendoza*. Mendoza
- 35) SUNASS, S. N. (2015) *Modifican la Directiva sobre Valores Máximos Admisibles de las descargas de aguas residuales no domésticas en el sistema de alcantarillado sanitario*. 009-2015-SUNASS-CD

- 36)** Verdugo Gallegos, L. A. (2013) *Remoción de iones sulfatos y metales pesados desde soluciones acuosas que simulan aguas de mina usando mezcla de cal, silicatos nano-estructurados y policloruro de aluminio en una celda DAF.* Santiago

ANEXOS

ANEXO A1

MATRIZ DE CONSISTENCIA

“REMOCIÓN DE SULFATOS DEL EFLUENTE DEL LAVADOR DE GASES DE UNA PLANTA DE SULFONACIÓN MEDIANTE PRECIPITACIÓN DE ETRINGITA”

PROBLEMA GENERAL	OBJETIVO GENERAL	HIPÓTESIS GENERAL	VARIABLE DEPENDIENTE	DIMENSIONES	INDICADORES	MÉTODO
¿Cómo remover los sulfatos del efluente del lavador de gases de una planta de sulfonación mediante precipitación de etringita?	Remover los sulfatos del efluente del lavador de gases de una planta de sulfonación mediante precipitación de etringita	La remoción de los sulfatos del efluente del lavador de gases de una planta de sulfonación se logra mediante precipitación de etringita	X = Remoción de sulfatos del efluente del lavador de gases	– Características fisicoquímicas del efluente	– ppm sulfatos – % Remoción	– Turbidimétrico – Cálculo matemático
PROBLEMAS ESPECIFICOS	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	HIPÓTESIS ESPECÍFICAS	VARIABLES INDEPENDIENTES	DIMENSIONES	INDICADORES	MÉTODO
a) ¿Cuáles son las características fisicoquímicas del efluente del lavador de gases de una planta de sulfonación?	a) Identificar las características fisicoquímicas del efluente del lavador de gases de una planta de sulfonación	a) Las características fisicoquímicas del efluente del lavador de gases de una planta de sulfonación son alta concentración de sulfatos y pH	Y = Precipitación de Etringita	– Condiciones óptimas para lograr la precipitación de etringita	– Razón másica Pac $\text{H}_2\text{B}_4\text{O}_7$: SO_4^{2-} – Concentración de cal	– Análisis experimentales fisicoquímicos – Flotación
b) ¿Cuáles son las condiciones óptimas para lograr la precipitación de etringita?	b) Determinar las condiciones óptimas para lograr la precipitación de etringita	b) Las condiciones óptimas para lograr la precipitación de etringita son una razón másica entre Pac $\text{H}_2\text{B}_4\text{O}_7$ y sulfatos, y una concentración de cal adecuada				
c) ¿Cuáles son las características fisicoquímicas del efluente del lavador de gases de una planta de sulfonación después de la precipitación de etringita?	c) Identificar las características fisicoquímicas del efluente del lavador de gases de una planta de sulfonación después de la precipitación de etringita	c) Las características fisicoquímicas del efluente del lavador de gases de una planta de sulfonación después de la precipitación de etringita son baja concentración de sulfatos y pH				

ANEXO A3

HOJA TÉCNICA DE PAC PANTERA HB



HOJA TÉCNICA

PAC PANTERA HB

Versión: 003-2018

1. DESCRIPCIÓN DEL PRODUCTO

El PAC Pantera HB es el nombre comercial del Policloruro de Aluminio fabricado por Aris Industrial S.A., conocido también como cloruro de polialuminio, el cual es un polímero inorgánico de Alta Basicidad, fabricado por reacción de materias primas seleccionadas, bajo estrictas condiciones de proceso. Corresponde a un producto cuya fórmula general es $Al_n(OH)_mCl_{(3n-m)}$, para $0 < m < 3n$. Es un coagulante-floculante que se presenta en forma líquida, lo cual facilita el manejo y su aplicación en planta.

2. CARACTERÍSTICAS DEL PRODUCTO

NOMBRE COMERCIAL	PAC PANTERA HB
APARIENCIA	SOLUCIÓN CLARA O LIGERAMENTE OSCURA, LIBRE DE MATERIAS EXTRAÑAS O SEDIMENTOS VISIBLES.

PARAMETROS	ESPECIFICACIÓN	CONFORMIDAD
Aluminio, Al_2O_3 , %	20.0 – 25.0	Cumple con la Norma Técnica Peruana NTP 311.333 – 1999, así como Nuestras especificaciones.
Basicidad, %	70.0 - 85.0	
pH _{Directo}	2.0 - 3.0	
Densidad, g/ml	1.30 – 1.36	
Turbidez, NTU	50 máx.	

3. APLICACIONES

Se emplea como coagulante/floculante en la clarificación del agua para consumo humano y tratamiento de agua residual. Antes de aplicar en planta, se recomienda determinar la dosis óptima en un ensayo de "prueba de jarras" en un laboratorio. Es importante indicar que durante el proceso de coagulación/floculación, no altera considerablemente el pH del agua tratada a diferencia de otros coagulantes inorgánicos.

4. PRESENTACIÓN Y DESPACHO

El PAC Pantera HB se envasa en recipientes de polietileno con contenidos netos de 25, 250, 270 y container tipo IBC de 1250 kg.

5. CONDICIONES DE ALMACENAJE

Almacenar en depósitos de PVC, polietileno, polipropileno ó material plástico en general ya que el producto es ligeramente corrosivo; protegido contra el sol y la lluvia. Para el embarque y transporte via marítima se recomienda cubrir los recipientes adecuadamente para protegerlos de la humedad, luz solar directa y cambios de temperatura extremos.

Aris Industrial garantiza que al momento de emitir esta hoja técnica el producto cumple con la especificación declarada. Es responsabilidad del comprador determinar que el producto cumple con los requisitos para su uso, incluyendo mediante la realización de pruebas de aplicación, así como de tomar todas las medidas de seguridad razonables.

ARIS INDUSTRIAL S.A.

Av. Industrial 491 – Lima. Teléfono: (511) 336-5428 Fax: (511) 336-7473 www.aris.com.pe

ANEXO A4

HOJA DE DATOS DE SEGURIDAD DE PAC PANTERA HB



HOJA DE DATOS DE SEGURIDAD

PAC PANTERA HB

Versión: 001-2018

1. DESCRIPCIÓN DEL PRODUCTO

Nombre comercial: PAC PANTERA HB

Dirección/ Teléfono de la empresa formuladora y titular del registro:

Aris Industrial S.A.

Av. Industrial 491- Lima 1 – PERU

Teléfono: 336-5428 Anexo 256

e-mail: vquimicos@aris.com.pe

2. IDENTIFICACIÓN DE RIESGOS.

a. Riesgos para la salud humana:

Ojos: Puede causar irritación.

Piel: Puede causar irritación.

Inhalación: La inhalación de vapores puede causar irritación al tracto respiratorio y pulmones.

Ingestión: Pueden causar dolor abdominal, náusea, vómitos; por cantidades mayores puede causar quemaduras en la boca, sangrado en el estómago, descoordinación, espasmos musculares y daños renales.

b. Riesgos para el medio ambiente: Es un producto ácido, los grandes derrames pueden acidificar las aguas, peligroso para la vida acuática.

c. Riesgos especiales de la sustancia: Es un producto se puede hidrolizar y formar un precipitado de hidróxido de aluminio de color blanco. Corrosivo

d. Carcinógeno: No hay evidencia

3. COMPOSICIÓN E INFORMACIÓN SOBRE SUS COMPONENTES

COMPOSICIÓN	
Aluminio, Al ₂ O ₃ , %	20.0 – 25.0
Basicidad, %	70.0 – 85.0
Densidad, g/mL, 20°C	1.300 – 1.360
Nº CAS	1327-41-9
PROCEDENCIA	Perú

4. PRIMEROS AUXILIOS.

En caso de contacto accidental con el producto, proceder de acuerdo con:

Contacto con los Ojos: Sostenga el ojo abierto y enjuague suavemente con abundante agua durante 15-20 minutos. Sacarse los lentes de contacto, si están presentes, después de los primeros 5 minutos; y luego continuar enjuagando, si la irritación persiste, solicitar asistencia médica.

Contacto con la piel: Quitar las ropas empapadas con el producto y lavar inmediatamente con abundante agua corriente y jabón durante 15-20 minutos, las zonas afectadas. Si la irritación persiste, solicite asistencia médica.

Inhalación: Lleve a la persona al aire fresco. Bajo condiciones normales este producto muestra muy baja presión de vapor, por lo tanto el riesgo de inhalación es reducido. Si el malestar persiste, Solicitar asistencia médica.

Ingestión: Lavar la boca con abundante agua y administrar una solución de bicarbonato de sodio al 5%. No inducir al vómito. Solicitar asistencia médica.

En caso de

EMERGENCIA:

CICOTOX 0800-1-30-40

Aló Essalud 0801-10-200 (Las 24 horas del

día) Aris Industrial S. A. 01-336-5428 Anexo

2549

Notas para quien preste los primeros auxilios: el producto no es considerado peligroso. Notas para el médico tratante: inducir al vómito

5. EXTINCIÓN DE INCENDIOS

Medios de extinción adecuados: Espuma química, agua, dióxido de carbono o polvo seco ABC.

Riesgos especiales: Los bomberos deben colocarse el traje completo de protección.

Información adicional: Por sí solo no genera riesgos de fuego y explosión. Sometido al fuego, puede generar gases irritantes y tóxicos, incluidos óxidos de carbono y óxidos de aluminio.

Procedimientos especiales para combatir el fuego: Asperjar con agua para enfriar envases.

Equipo de protección personal para el combate del fuego: El personal debe ingresar utilizando ropa adecuada para combatir incendios de productos químicos corrosivos, y equipo de respiración autónoma, botas de seguridad.

Productos peligrosos que se liberan de la combustión: Óxido de azufre y óxido de aluminio.

6. DERRAMES ACCIDENTALES

Medidas de emergencia a tomar si hay derrames del material: El producto derramado se controla mediante diques de arena o tierra, evitar que el producto llegue al alcantarillado o a cauces públicos, el producto derramado se puede recoger usando un material absorbente como tierra, arena, neutralizar el suelo con bicarbonato de sodio o una solución de soda cáustica, cal. Recoger y depositar en un envase identificado, para su posterior eliminación.

Equipo de Protección Personal para atacar la emergencia: Usar ropa de seguridad personal para productos químicos, así como también guantes, anteojos y protector facial.

Precauciones a seguir para evitar daños al ambiente: Evitar que el producto y la solución de lavado ingresen a cursos de agua, alcantarillas y/o desagües.

Métodos de Eliminación de Desechos: Barrer y recoger en recipientes claramente identificados, finalmente trasladar a un botadero autorizado para este tipo de sustancias, de acuerdo a lo dispuesto por la autoridad competente.

7. MANIPULACIÓN Y ALMACENAJE

Precauciones a Tomar: Manipulación con implementos de seguridad, guantes de goma puño largo, lentes, ropa para productos químicos, mascarilla para polvos.

Recomendaciones específicas sobre manipulación segura: Manipular en un local de trabajo bien ventilado. Durante la manipulación no beber, comer ni fumar. Evitar el contacto con los ojos. El personal involucrado con su manipulación debe tener todos los elementos de protección recomendados.

Condiciones de Almacenamiento: Almacene en un lugar fresco y seco y bien ventilado, los envases deben ser resistente al ácido, estar cerrados se pueden almacenar en envases de PVC, polipropileno, etc.; para preservar el producto del medio ambiente.

8. CONTROL DE LA EXPOSICIÓN Y PROTECCIÓN PERSONAL

Medidas para reducir la posibilidad de exposición: Utilizar los elementos de protección recomendados.

Parámetros de Control: No Aplicables.

Límites Permisibles ponderados (LPP) y Absoluto (LPA): No establecidos.

Protección respiratoria: Se recomienda el uso de mascarilla para polvos.

Guantes de protección: De Neopreno o PVC.

Protección de la vista: Gafas de seguridad o protector facial.

Otros equipos de Protección: overol de algodón.

Ventilación: Use sólo en áreas bien ventiladas.

9. PROPIEDADES FÍSICAS Y QUÍMICAS

Estado Físico:	Líquido
Color:	Solución clara o ligeramente oscura.
Olor:	Característico.
Densidad (g/mL):	1.300 – 1.360
pH Directo:	2.0 – 3.0
Temperatura de Ebullición:	No Disponible.
Temperatura de Fusión:	No Disponible.
Temperatura de Inflamación:	Disponible.
Solubilidad en Agua, 20 °C:	Completamente soluble.



HOJA DE DATOS DE SEGURIDAD

PAC PANTERA HB

Versión: 001-2018

10. ESTABILIDAD Y REACTIVIDAD QUÍMICA

Estabilidad: Estable en las condiciones normales de almacenamiento; lugar fresco y seco. En presencia de fuego puede desprender humos tóxicos.
Condiciones que deben evitarse: Se debe evitar almacenar con materiales como acero templado, cobre, zinc y plata.
Materiales incompatibles: Agentes fuertemente oxidantes, como el hipoclorito, sulfitos, etc. Reacciona con álcalis y ataca a muchos metales en presencia de agua.

11. INFORMACIÓN TOXICOLÓGICA

Toxicidad oral Aguda: DL₅₀ (rata): 2000 a 5000 mg/Kg.
Toxicidad para la reproducción: No disponible.
Efectos mutagénicos: No disponible.
Efectos carcinogénicos: No disponible.

12. INFORMACIÓN RELACIONADA AL MEDIO AMBIENTE

Biodegradabilidad: No disponible
Consideraciones generales: En exceso puede ser dañino para la vida acuática. Su toxicidad está asociada con el pH ácido. Cuando el suelo se contamina con este material se acidifica.

13. CONSIDERACIONES PARA SU DISPOSICIÓN

Cumplir con todas las reglamentaciones estatales y locales. Desechar en forma segura de acuerdo a la normativa nacional.
Para obtener información sobre la eliminación de los no utilizados, producto no deseado, póngase en contacto con el fabricante o el organismo regulador provincial y también para la limpieza de vertidos.

14. INFORMACIÓN PARA EL TRANSPORTE

Se requieren los códigos y clasificaciones de acuerdo con las regulaciones y normas nacionales, para el transporte de sustancias peligrosas.

Clase: 8 Sustancias Corrosivas
N° ONU: 3264
NFPA:
Salud: 1
Inflamabilidad: 0
Reactividad: 0



15. INFORMACIÓN REGLAMENTARIA

Según las normativas internacionales:
Normas internacionales aplicables: IATA, IMDG
Normas nacionales aplicables: DS 298/94 – 198/0

16. INFORMACIÓN ADICIONAL

Las opiniones expresadas en este formulario son de profesionales capacitados. La información que se entrega en él, es la conocida actualmente sobre la materia. Considerando que el uso de esta información y de sus productos está fuera del control del proveedor, la empresa no asume responsabilidad alguna por este concepto. Es obligación del usuario trabajar en condiciones de uso seguro del producto, en base a la presente información.

ANEXO A5

HOJA TÉCNICA DE ARIFLOC C606



HOJA TÉCNICA

ARIFLOC C606

POLÍMERO ANIÓNICO

Versión: 002-2018

1. DESCRIPCIÓN DEL PRODUCTO

El **ARIFLOC 606**, es un polímero de poliácridamida aniónico, en forma de polvo blanco de muy alto peso molecular.

2. CARACTERÍSTICAS DEL PRODUCTO

PARAMETROS	ESPECIFICACION
Densidad	Bajo
Peso Molecular	Muy alto
Tamaño de Partícula	
% > malla 10	2 máx.
% < malla 100	6 máx.
Densidad a granel	0.60
pH Aproximado	
0.1 %	6.5
0.2 %	6.3
0.5 %	6.0
Viscosidad Aproximado (cps)*	
0.1 %	125
0.2 %	225
0.5 %	1650
Concentración Recomendada Para operación	5.0
Concentración máxima De operación	10
Tiempo de Disolución en agua DI 5g/l a 25°C	60
Estabilidad de Agua DI en solución	1.0

3. APLICACIONES

Como floculante para procesos de remoción de contaminantes y clarificación del agua. Se emplea en condiciones de agua que presentan una alta cantidad de contaminantes, en tratamiento de efluentes y relaves mineros, tratamiento de agua de cola en la actividad pesquera, tratamiento de efluentes con alta carga orgánica, etc. Agente astringente en el proceso de concentración de lodos.

4. PRESENTACIÓN

Bolsas de polipropileno 25 Kg.

5. CONDICIONES DE USO Y ALMACENAJE

Su manejo y uso debe realizarse usando ropa e implementos de protección personal. Durante su manipulación, evitar el contacto con los ojos, piel y ropa; usar guantes de jebe, lavar las partes del cuerpo que estuvieran expuestas al producto y cambiarse de ropa. No comer, beber ni fumar durante la aplicación. No ingerir el producto.

Almacenaje

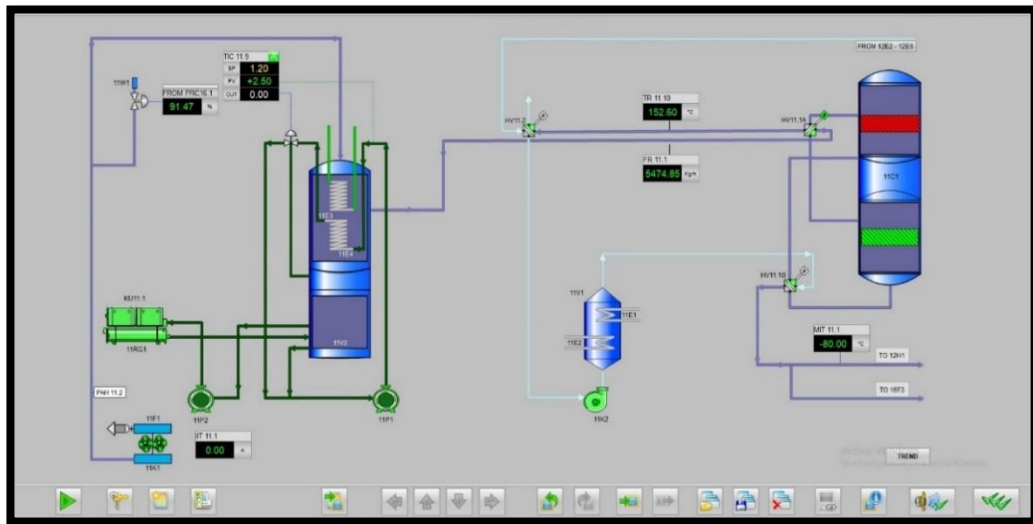
Mantenga el producto en sus envases originales, herméticamente cerrados, en lugares frescos y secos, ventilados, bajo sombra y lejos del alcance de los niños.

ANEXO A6

SISTEMA DE CONTROL DE LA PLANTA DE SULFONACIÓN

FIGURA N° A.1

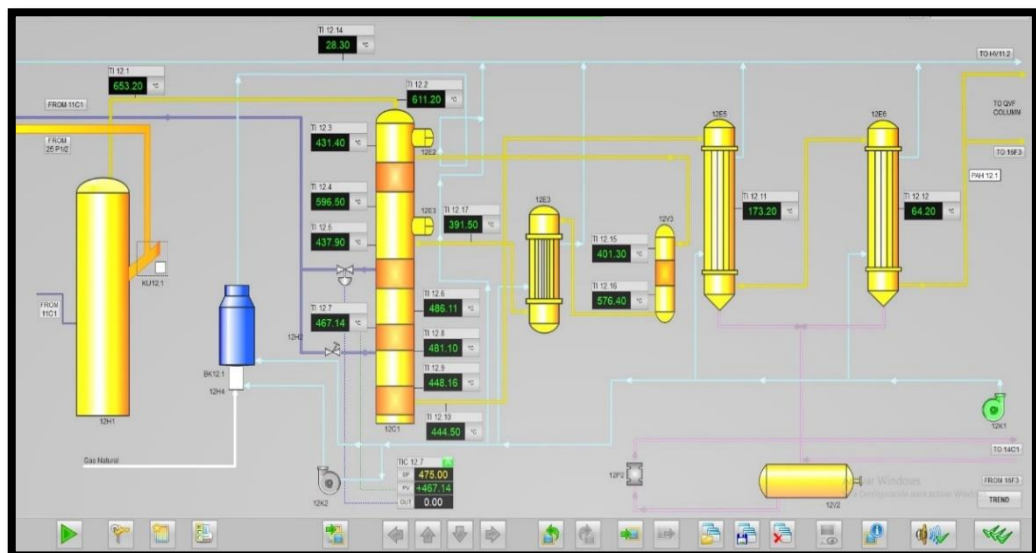
ZONA DE SECADO



Fuente : Elaboración propia

FIGURA N° A.2

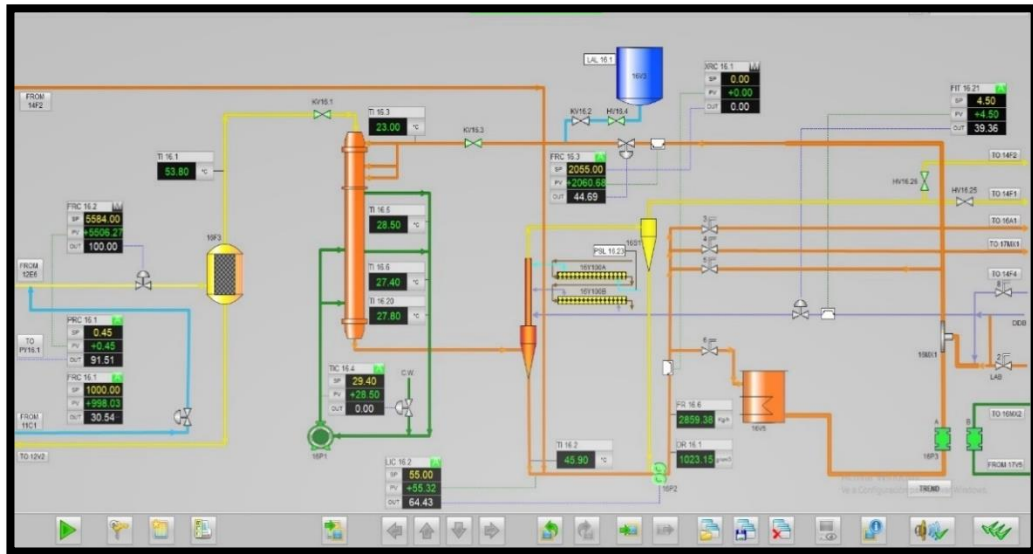
ZONA DE GENERACIÓN DE SO₃



Fuente : Elaboración propia

FIGURA N° A.3

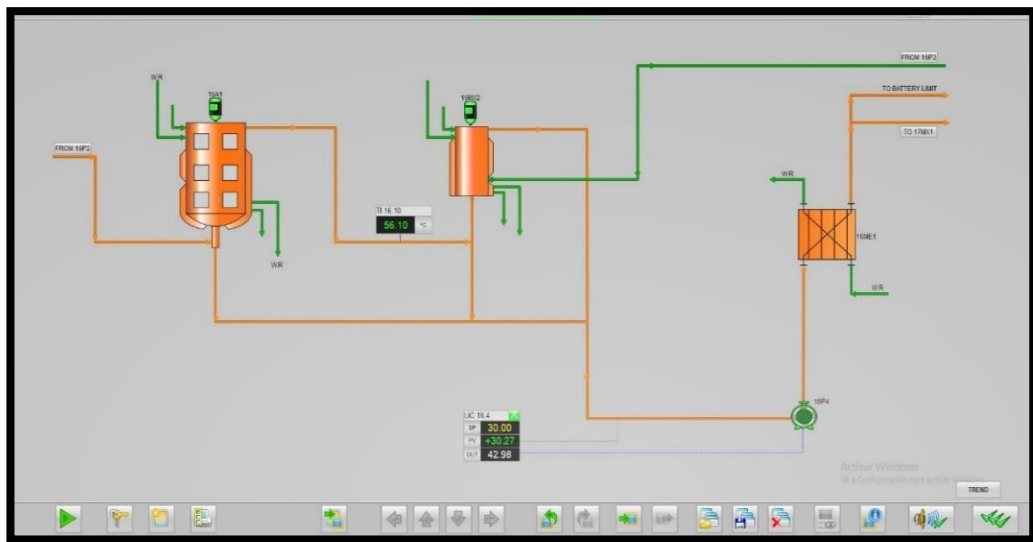
ZONA DE SULFONACIÓN



Fuente : Elaboración propia

FIGURA N° A.4

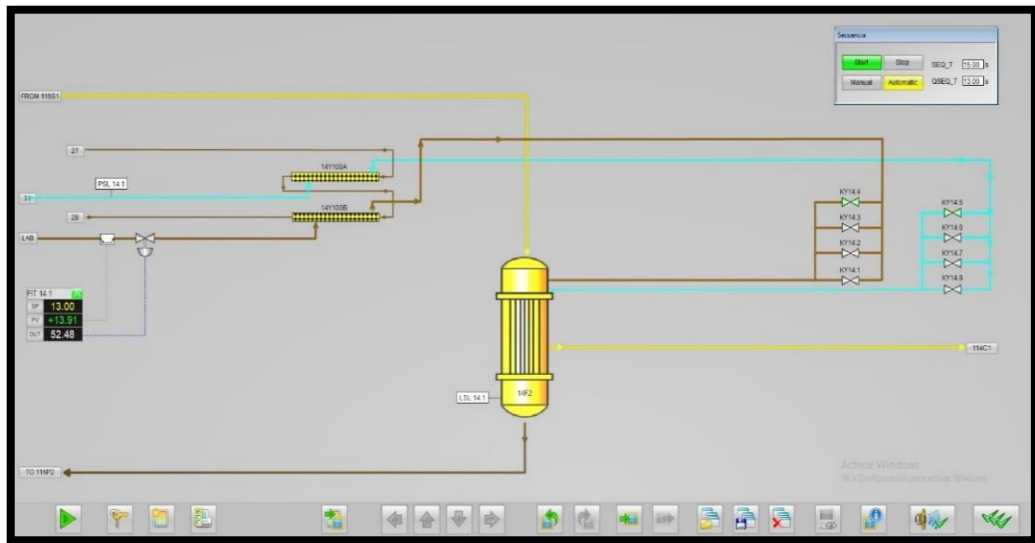
ZONA DE ENVEJECIMIENTO Y ESTABILIZACIÓN



Fuente : Elaboración propia

FIGURA N° A.5

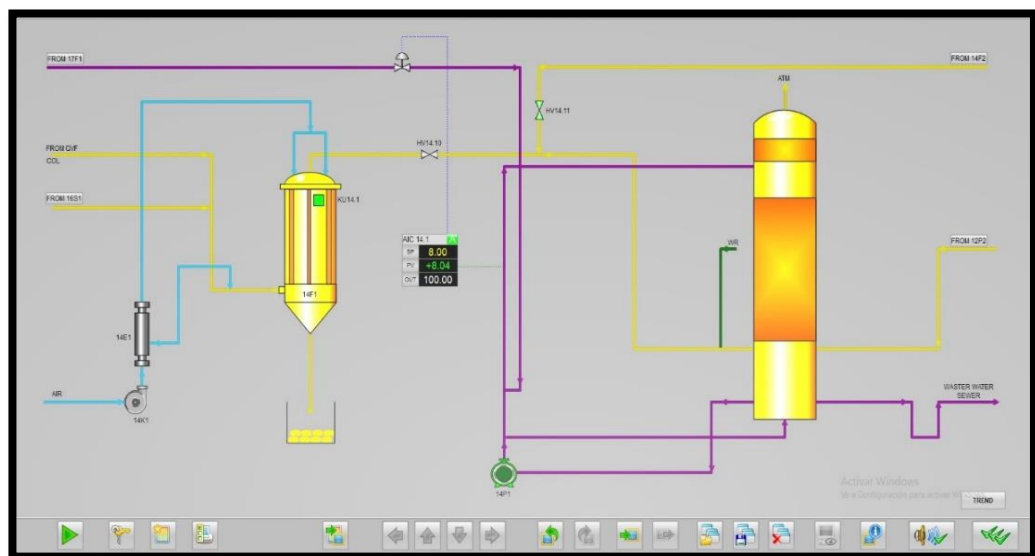
ZONA DE TRATAMIENTO DE GASES 1



Fuente : Elaboración propia

FIGURA N° A.6

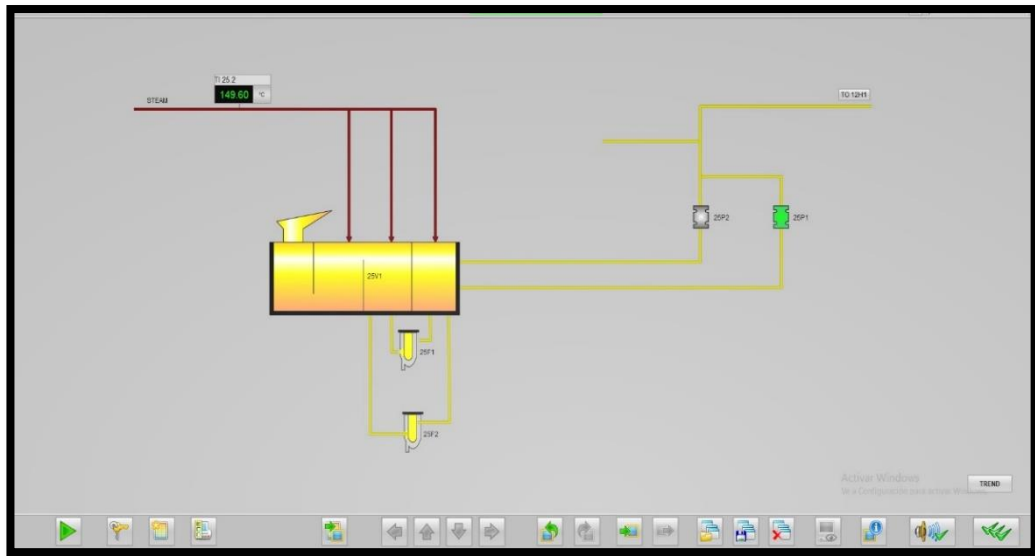
ZONA DE TRATAMIENTO DE GASES 2



Fuente : Elaboración propia

FIGURA N° A.7

ZONA DE ALMACENAMIENTO Y DOSIFICACIÓN DE AZUFRE



Fuente : Elaboración propia