

UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERÍA
FACULTAD DE INGENIERÍA GEOLÓGICA, MINERA Y METALÚRGICA



TESIS

“OPTIMIZACIÓN DE LA PLANTA DE TRATAMIENTO DEL
AGUA DE MINA PARA REMOVER ARSÉNICO Y CADMIO
CUMPLIENDO CON LA CATEGORÍA 3 EN EL CUERPO
RECEPTOR CONVERGENTE AL RÍO SANTA”

PARA OBTENER EL GRADO ACADÉMICO DE MAESTRO EN
MINERÍA Y MEDIO AMBIENTE

PRESENTADO POR:
CARINA JHANINA DE LA CRUZ GARCÍA

ASESOR
M.Sc. Lic. ATILIO MENDOZA APOLAYA

LIMA – PERÚ
2024

DEDICATORIA

Esta tesis se la dedico a mis padres Solís y Celedonia, por su constante apoyo, sus consejos, la motivación continua que me ha permitido ser una persona de bien, y por su amor.

A Dios por darme la oportunidad de seguir viviendo y cumplir todos mis sueños.

A una persona especial, José, mi compañero de vida por su apoyo incondicional para culminar esta etapa en mi vida profesional.

AGRADECIMIENTO

Mi sincero agradecimiento está dirigido a mi alma mater, y en especial al M.Sc. Atilio Mendoza Apolaya, por su apoyo y consejos durante la realización del presente trabajo.

ÍNDICE

DEDICATORIA	II
AGRADECIMIENTO	III
ÍNDICE.....	IV
ÍNDICE DE TABLAS	X
ÍNDICE DE FIGURAS.....	XIV
RESUMEN	XVI
ABSTRACT	XVII
INTRODUCCIÓN	18
CAPÍTULO I: GENERALIDADES.....	19
1.1. Antecedentes	19
1.1.1. Internacionales	19
1.1.2. Nacionales	25
1.2. Situación Problemática.....	27
1.3. Formulación del Problema	29
1.3.1. Problema General.....	29
1.3.2. Problemas Específicos	29
1.4. Justificación de la Investigación	29
1.4.1. Justificación Teórica	29
1.5. Objetivos	30
1.5.1. Objetivo General	30
1.5.2. Objetivos Específicos.....	30
1.6. Hipótesis.....	31
1.6.1. Hipótesis General.....	31

1.6.2.	Hipótesis Específicas	31
1.7.	Identificación de Variables	31
1.7.1.	Variables Independientes	31
1.7.2.	Variables Dependientes.....	31
1.7.3.	Variables Controladas o Intervinientes	31
CAPÍTULO II: EL MARCO TEÓRICO Y MARCO CONCEPTUAL.....		32
2.1.	Drenaje Ácido de Mina (AMD).....	32
2.1.1.	Mecanismo de Formación del Drenaje Ácido de Mina	32
2.1.2.	Impacto Ambiental del Drenaje Ácido de Mina	34
2.2.	Métodos de Tratamiento del Drenaje Ácido de Mina.....	35
2.2.1.	Tratamiento Activo para Drenajes Ácidos de Mina... 35	
2.2.2.	Tratamientos Pasivos para Drenajes Ácidos de Mina 36	
	2.2.2.1.1. Humedales Aerobios	36
	2.2.2.1.2. Humedales Anaerobios o Balsas Orgánicas.....	37
	2.2.2.1.3. Drenaje Anóxico Calizo (ALD).....	39
	2.2.2.1.4. Sistema de Producción Sucesiva de Alcalinidad (SAPS)	40
	2.2.2.1.5. Barreras Reactivas Permeables (PRB).....	40
2.2.3.	Selección del Tipo de Tratamiento	41
2.2.4.	Métodos más Utilizados para el Tratamiento de Drenaje Ácido de Mina.....	42
	2.2.4.1. Neutralización	43
	2.2.4.2. Microorganismos	43

2.2.4.3.	Humedal Construido	44
2.2.4.4.	Adsorción	45
2.2.4.5.	Separación de Membranas	45
2.2.4.6.	Procesos Combinados	46
2.3.	Coagulación.....	47
2.3.1.	Tipos de Coagulación.....	48
2.3.2.	Coagulantes Utilizados.....	49
2.3.3.	Alcalinidad	50
2.3.4.	Sistema de Aplicación del Coagulante.....	51
2.4.	Floculación.....	52
2.4.1.	Tipos de Floculación	53
2.4.1.1.	Floculación Pericínética	53
2.4.1.2.	Floculación Ortocínética	53
2.4.2.	Parámetros de la Floculación	53
2.4.3.	Floculantes	54
2.5.	Agitación.....	55
2.5.1.	Diseño de un Sistema de Agitación	56
2.6.	Sedimentación.....	57
2.6.1.	Formas de Sedimentación	57
2.6.2.	Clasificación de los Sedimentadores.....	58
2.6.3.	Variables que Afectan el Proceso de Sedimentación.	59
2.7.	Marco Legal	59
2.7.1.	Decreto Supremo N° 010-2010-MINAM	59
2.7.2.	Decreto Supremo N° 004-2017-MINAM	61

CAPÍTULO III: METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN	63
3.1. Tipo y Diseño de Investigación	63
3.1.1. Unidad de Análisis	64
3.1.2. Área de estudio.....	64
3.1.3. Tamaño de Muestra.....	64
3.1.4. Selección de Muestra	65
3.1.5. Técnicas e Instrumentos para Recoger Información..	65
3.1.6. Técnicas de Procedimientos de Datos.....	65
3.2. Desarrollo del Trabajo de la Investigación	66
3.2.1. Pruebas a Nivel Laboratorio (Fase 01).....	66
3.2.1.1. Determinación del Hidróxido de Calcio Adecuado (Primera Etapa)	68
3.2.1.2. Determinación del Floculante Adecuado (Segunda Etapa)	73
3.2.1.3. Determinación de los Parámetros Óptimos (Tercera Etapa)	80
3.2.2. Pruebas a Nivel Preliminar (Fase 02)	115
3.2.2.1. Cálculos Previos.....	115
3.2.2.1.1. Cálculo de los Parámetros de Cal ($\text{Ca}(\text{OH})_2$ al $65\% \pm 5\%$).....	115
3.2.2.1.2. Cálculo de los Parámetros para el Floculante	116
3.2.2.1.3. Balance de Masa de la Planta de Tratamiento de Aguas	117

3.2.2.1.4.	Balance de aguas de la Planta de Tratamiento de Aguas	118
3.2.2.2.	Diseño de Sedimentador	118
3.2.2.3.	Diseño del Filtro Artificial	120
3.2.2.4.	Tanque de Agitación de Lechada de Cal.....	122
3.2.2.5.	Tanque de Agitación para Dilución del Floculante AR-1032	124
3.2.2.6.	Tanque Reactor	126
3.2.3.	Memoria Descriptiva (Fase 03).....	128
3.2.3.1.	Etapas Captación de Aguas de Mina	128
3.2.3.1.1.	Captación de Aguas Ácidas	128
3.2.3.1.2.	Pre – sedimentación	128
3.2.3.2.	Etapas de Tratamiento de las Aguas de Mina.....	129
3.2.3.2.1.	Reactivos Utilizados.....	129
3.2.3.2.2.	Proceso de Neutralización.....	130
3.2.3.2.3.	Proceso de Oxidación.....	130
3.2.3.2.4.	Proceso de Sedimentación.....	130
3.2.3.2.5.	Sistema de Filtración.....	131
3.2.3.2.6.	Lodos generados.....	131
CAPÍTULO IV: RESULTADOS DE LA INVESTIGACIÓN		133
4.1.	Análisis de los Resultados de Investigación	133
4.1.1.	Resultados Obtenidos en el Laboratorio y/o planta industrial	133
4.2.	Contrastación de Hipótesis.....	134

4.2.1.	Contrastación de la Hipótesis General	134
4.2.1.1.	Contrastación de la Hipótesis Específica 1	137
4.2.1.2.	Contrastación de la Hipótesis Específica 2	137
CONCLUSIONES		141
RECOMENDACIONES		143
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS		144
ANEXOS		161
ANEXO N°1: MATRIZ DE CONSISTENCIA.....		162
ANEXO N°2: Álbum Fotográfico		163
ANEXO N°3: Flow Shett de la planta de tratamiento de agua de mina		167
ANEXO N°4. Cálculo del diseño.....		168
ANEXO N°5: Resultados de Laboratorio Químico.....		186
ANEXO N°5. Formulario de Autorización.....		194
ANEXO N°6. Currículum Vitae.		195

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2. 1 Clasificación de sedimentadores.....	59
Tabla 2. 2 Límites Máximos Permisibles para la Descarga de Efluentes Líquidos de Actividad Minera – Metalúrgicos	61
Tabla 3. 1 <i>Caracterización fisicoquímica del agua ácida proveniente de un efluente minero</i>	67
Tabla 3. 2 <i>Resultados obtenidos de análisis químico de las muestras tratadas a diferentes purezas de hidróxido de calcio</i>	72
Tabla 3. 3 <i>Resultados obtenidos de % en peso de metales en el lodo generado en las muestras a diferentes purezas de hidróxido de calcio</i>	72
Tabla 3. 4 <i>Resultados de turbidez en las pruebas de selección de floculante (3min)</i> 76	
Tabla 3. 5 <i>Resultados de turbidez en las pruebas de comparación de velocidad de floculante (5min)</i>	76
Tabla 3. 6 <i>Resultados de nivel de solidos sedimentados en la comparación de velocidad de floculante</i>	77
Tabla 3. 7 <i>Resultados de turbidez a los 5min en las pruebas de comparación de velocidad de floculante a diferentes concentraciones de dilución del floculante AR-1032</i>	78
Tabla 3. 8 <i>Resultados de nivel de solidos sedimentados en la comparación de velocidad de floculante AR-1032 a diferentes concentraciones de preparación</i>	78
Tabla 3. 9 <i>Resultados de nivel de solidos sedimentados en la comparación de velocidad de floculante AR-1032 a diferentes concentraciones de preparación</i>	82
Tabla 3. 10 <i>Resultados de turbiedad residual a los diferentes pH trabajados</i>	84

Tabla 3. 11 <i>Resultado del análisis químico en las muestras tratadas a los diferentes pH trabajados</i>	85
Tabla 3. 12 <i>Condiciones de operación para determinar la concentración óptima de lechada de cal</i>	87
Tabla 3. 13 <i>Resultados de turbiedad residual a las diferentes concentraciones de cal en la lechada</i>	89
Tabla 3. 14 <i>Resultado del análisis químico en las muestras tratadas a las diferentes concentraciones de lechada de cal</i>	90
Tabla 3. 15 <i>Condiciones de operación para determinar la concentración óptima del floculante</i>	93
Tabla 3. 16 <i>Resultados de turbiedad residual a diferentes concentraciones del floculante</i>	96
Tabla 3. 17 <i>Resultado del análisis químico en las muestras tratadas a las diferentes concentraciones de floculante</i>	97
Tabla 3. 18 <i>Condiciones de operación para determinar la dosis óptima de la solución de floculante</i>	99
Tabla 3. 19 <i>Resultados obtenidos de la turbiedad residual a diferentes dosis de solución de floculante</i>	101
Tabla 3. 20 <i>Resultado de los análisis químicos de las muestras tratadas (efluentes) a las diferentes dosis de solución de floculante</i>	102
Tabla 3. 21 <i>Condiciones de operación para determinar los parámetros de diseño para la floculación</i>	104
Tabla 3. 22 <i>Resultados de la turbiedad residual a un tiempo y velocidad de agitación determinado para la etapa de floculación</i>	106

Tabla 3. 23 <i>Resultados de análisis químico a las muestras tratadas a determinada velocidad de agitación y tiempo de floculación</i>	107
Tabla 3. 24 <i>Condiciones de operación para determinar los parámetros de diseño para la floculación</i>	109
Tabla 3. 25 <i>Resultados de turbiedad final en los ensayos</i>	112
Tabla 3. 26 <i>Resultados de fracción remanente de turbiedad (C_0) y velocidad de sedimentación (V_s)</i>	112
Tabla 3. 27 <i>Valores de una constante y la fracción no removida de partículas para el caso en estudio</i>	113
Tabla 3. 28 <i>Resultados de porcentaje total de remoción (R_t), la turbiedad removida (T_r) y la turbiedad remanente (T_{re})</i>	113
Tabla 3. 29 <i>Cuadro resumen de los parámetros óptimos y sus condiciones de operación</i>	114
Tabla 3. 30 <i>Resultados del análisis químico de la muestra tratada con los parámetros óptimos</i>	114
Tabla 3. 31 <i>Resultados de los parámetros de la lechada de cal</i>	116
Tabla 3. 32 <i>Resultados de los parámetros para el floculante AR-1032</i>	116
Tabla 3. 33 <i>Resultados de los parámetros para el floculante AR-1032</i>	119
Tabla 3. 34 <i>Dimensionamiento del filtro artificial</i>	121
Tabla 3. 35 <i>Dimensionamiento del tanque de agitación de la lechada de cal</i>	123
Tabla 3. 36 <i>Dimensionamiento del tanque para dilución del floculante</i>	125
Tabla 3. 37 <i>Dimensionamiento del tanque reactor</i>	128
Tabla 4. 1 <i>Comparación con la normativa ambiental de los resultados del tratamiento de aguas con los parámetros óptimos</i>	135

Tabla 4. 2 <i>Dosis y concentración optima de los reactivos para el tratamiento de agua de mina</i>	137
---	-----

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2. 1 <i>Diagrama esquemático de la formación de AMD</i>	34
Figura 2. 2 <i>Impacto ambiental de AMD</i>	35
Figura 2. 3 <i>Organización de las unidades celulares en un humedal de tipo aeróbico y el movimiento del agua dentro de cada una de ellas</i>	37
Figura 2. 4 <i>Humedal anaerobio de flujo horizontal (a) y vertical (b)</i>	38
Figura 2. 5 <i>Sistema ALD y humedal</i>	39
Figura 2. 6 <i>Disposición de sustratos y dirección del flujo en un SAPS</i>	41
Figura 2. 7 <i>Flujo gráfico destinado a elegir el sistema o la mezcla de sistemas para la depuración pasiva de drenajes ácidos provenientes de explotaciones mineras</i>	42
Figura 2. 8 <i>Flujo de proceso del tratamiento de AMD por el método microbiano</i>	44
Figura 2. 9 <i>Mecanismos de remoción en las membranas: a) Exclusión por tamaño o mecanismo de barrera selectiva; b) Mecanismo de adsorción; c) Exclusión por tamaño o mecanismo de barrera selectiva; d) Rechazo de Donnan (exclusión de carga)</i>	46
Figura 2. 10 <i>Coagulación</i>	47
Figura 2. 11 <i>Coagulación por adsorción</i>	48
Figura 2. 12 <i>Coagulación por barrido</i>	49
Figura 2. 13 <i>Condiciones de mezcla</i>	51
Figura 2. 14 <i>Esquema general de un agitador</i>	56
Figura 3. 1 <i>Esquema general del proceso</i>	69
Figura 3. 2 <i>Gráfico de rendimiento de los tipos de floculante en el tiempo</i>	77

Figura 3. 3 <i>Gráfico de rendimiento del floculante AR-1032 a diferentes concentraciones de preparación</i>	79
Figura 3. 4 <i>Gráfica de turbiedad residual vs. pH</i>	84
Figura 3. 5 <i>Gráfica de turbiedad residual vs. concentración de lechada de cal</i>	90
Figura 3. 6 <i>Gráfica de Fe disuelto (mg/l) vs. concentración de cal (%)</i>	91
Figura 3. 7 <i>Gráfica de As total (mg/l) vs. concentración de cal (%)</i>	91
Figura 3. 8 <i>Gráfica de turbiedad residual vs. concentración del floculante</i>	97
Figura 3. 9 <i>Gráfica de turbiedad residual vs. dosis de solución de floculante</i>	102
Figura 3. 10 <i>Gráfica de turbiedad residual vs. tiempo</i>	107
Figura 3. 11 <i>Gráfica de fracción remanente de turbiedad vs. Velocidad de sedimentación</i>	112
Figura 3. 12 <i>Diagrama de sustratos en el filtro artificial</i>	121
Figura 3. 13 <i>Esquema de la propuesta óptima</i>	132
Figura 4. 1 <i>Gráfica de control Concentración As después de las mejoras</i>	136
Figura 4. 2 <i>Gráfica de control Concentración Cd después de las mejoras</i>	136
Figura 4. 3 <i>Gráfica de control pH después de la optimización</i>	138
Figura 4. 4 <i>Gráfica pH e hidróxido de calcio antes y después</i>	138

RESUMEN

Para llevar a cabo la investigación se tomaron 90 L de agua ácida de un efluente minero proveniente de las 03 bocaminas de nombres Hércules, Coturcan y Caridad, ubicadas en Ancash. Los ensayos químicos de la muestra determinaron una alta concentración de 249,238 mg/l de Fe, 495.025 mg/l de Zn, 13.621 mg/l de As, y 1,357 mg/l de Cd; valores que exceden los LMP establecidos en la normativa vigente (D.S. N° 010-2010-MINAM), por lo cual se debe realizar el tratamiento antes de verter al medio ambiente. Con muestras representativas se realizaron pruebas de tratamiento de aguas de mina, determinando que con una pureza del 65% de hidróxido de calcio se alcanzó % en peso de metales en el lodo generado valores de 0.539% de Pb, y 1.775% de As. Así también, las pruebas de floculación determinaron que a 600 segundos se formó el menor nivel de sólidos de 139 mm correspondiente a una dosis de 2.1 ppm de floculante AR-1032, el cual fue preparado a una concentración de 0.024%.

Para el diseño preliminar de los componentes de la planta de tratamiento de aguas de mina se realizaron pruebas de Jarras, determinando los valores óptimos de pH igual a 8,75 utilizando 14,8 ml de lechada de cal por cada litro de muestra a un pH inicial 3,2. Así también, se determinaron los valores óptimos de concentración de cal al 6%, una concentración de floculante AR 1032 de 0,05% a una dosificación de 3.5 ml. Las pruebas de floculación determinaron los valores óptimos de tiempo de agitación de 5 minutos y velocidad de agitación igual a 20 rpm, valores que generan la menor turbiedad de 1.38 NTU. Las pruebas de sedimentación determinaron un tiempo óptimo de 12 minutos y una velocidad de 0,039 cm/s. En base a los resultados en laboratorio, se diseñaron los equipos para el tratamiento de aguas a escala industrial, caudal 30l/s.

Palabra claves: Optimización, tratamiento de aguas, prueba de jarras, turbiedad, floculación, sedimentación.

ABSTRACT

For the development of the research, 90 L of acid water were taken from a mining effluent coming from the 03-pithead named Hércules, Coturcan and Caridad, located in Ancash. The chemical tests of the sample determined a high concentration of 249.238 mg/l of Fe, 495.025 mg/l of Zn, 13.621 mg/l of As, and 1,357 mg/l of Cd; values that exceed the LMP established in current regulations (D.S. No. 010-2010-MINAM), for which treatment must be carried out before discharging into the environment. Mine water treatment tests were carried out with representative samples, determining that with a purity of 65% of calcium hydroxide, % by weight of metals in the generated sludge values of % were reached in 0.539% of Pb and 1.775% of As. Likewise, the flocculation tests determined that at 600 seconds the lowest level of solids of 152 mm was formed corresponding to a dose of 2.1 ppm of AR-1032 flocculant, which was prepared at a concentration of 0.02%.

For the preliminary design of the components of the mine water treatment plant, Jar tests were carried out, determining the optimal Ph values equal to 8.75 using 14.8 ml of milk of lime for each liter of sample to initial Ph 3,2. Likewise, the optimal values of lime concentration at 6%, an AR 1032 flocculant concentration of 0.05% at a dosage of 3.5 ml were determined. The flocculation tests determined the optimal values of stirring time of 5 minutes and stirring speed equal to 20 rpm, values that generate the lowest turbidity of 1.38 NTU. The sedimentation tests determined an optimal time of 12 minutes, and a speed of 0.039 cm/s. Based on the results obtained in the laboratory, equipment for water treatment on an industrial scale was designed.

Keywords: Optimization, water treatment, jar test, turbidity, flocculation, sedimentation.

INTRODUCCIÓN

Las políticas medioambientales de la administración del recurso hídrico en el Perú, la cual fue aprobada para el sector minero hace pocos años, y ordena el cumplimiento de los estándares de calidad ambiental y los límites máximos permisibles de emisiones procedentes de la actividad minera de explotación y procesamiento, así también, ordena la disposición de un plan de manejo medioambiental, donde se toma en cuenta la gestión del recurso hídrico.

Las aguas ácidas de mina se forman por un proceso de oxidación química y bacteriana de los sulfuros, donde intervienen el oxígeno, y el agua en forma de vapor o líquida. La función de las bacterias es de catalizar la reacción de oxidación, es decir, acelera la formación de aguas ácidas. Sin embargo, las reacciones que se llevan a cabo son de cinética variable, y es una de las variables de mayor importancia. El tipo de tratamiento a emplear para tratar efluentes mineros mantiene una estrecha dependencia con las características del efluente, e inclusive puede llegar a condicionar el proceso.

Por lo mencionado anteriormente, es que la presente investigación pretende minimizar el impacto ambiental que es generado por los centros mineros de distritos altoandinos del Perú, lo cual es verificado por el ente regulador Organismo de Evaluación y Fiscalización Ambiental (OEFA) en las supervisiones especiales y/o regulares, mediante el cumplimiento in situ de los Límites Máximos Permisibles según el DS-010-2010-MINAM y ECA agua según el D.S.-N°004-2017-MINAM. Con ello se evitará procesos administrativos sancionadores (PAS) y multas ambientales.

CAPÍTULO I

GENERALIDADES

1.1. Antecedentes

1.1.1. Internacionales

(Hernández et al., 2023), en su proyecto de investigación ubicado en Chile “Arsenic (III) and arsenic (V) removal from acidic mine waters using an acidophilic sulfate-reducing biorreactor” examinaron la aplicación de biorreactores acidófilos de reducción de sulfato para depurar el arsénico contenido en aguas ácidas provenientes de minas. Se llevaron a cabo experimentos utilizando dos biorreactores que recibieron agua sintética ácida con diferentes cantidades de As^{3+} y As^{5+} , en concentraciones que variaron de 2 a 150 ppm, a lo largo de un período de 420 días. Los resultados demostraron que ambos biorreactores lograron reducir de manera efectiva los niveles de arsénico en el agua, alcanzando una tasa de eliminación de hasta el 99,9%.

(Jiang et al., 2023), en su artículo “Effect of ascorbic acid and combination with fulvic acid on the electrokinetic remediation of paddy soil contaminated by arsenic-containing acid mine drainage” en la China, investigaron sobre el impacto del ácido ascórbico y el ácido fúlvico en la mejora de la remediación electrocinética en un

suelo de arrozal afectado por la contaminación de arsénico a través del drenaje ácido proveniente de una mina. Los resultados revelaron que la inclusión de ácido ascórbico y ácido fúlvico influye en la movilización del arsénico en el suelo, aumentando así la eficacia de la remediación electrocinética. Luego de 21 días de tratamiento electrocinético con la adición de ácido ascórbico y ácido fúlvico, la cantidad de arsénico en el suelo se redujo en un 60%.

(**Han et al., 2022**), en su proyecto de investigación “Arsenic (III) oxidation and removal from artificial mine wastewater by blowing O₂ nanobubbles” ubicado en China, emplearon una solución de arseniato de sodio para examinar la estabilidad de burbujas de tamaño nanométrico en soluciones acuosas. Los autores evaluaron y afirmaron que la introducción de burbujas de tamaño nanométrico disminuyó notablemente la altura de la sedimentación en comparación con la solución sin burbujas. Sus resultados demostraron que, en la solución sin burbujas, la altura de la sedimentación alcanzó 4,5 cm, mientras que en la solución con burbujas nanométricas fue de 1,5 cm.

(**Lee et al., 2022**), en su estudio de investigación “Arsenic adsorption study in acid mine drainage using fixed bed column by novel beaded adsorbent” ubicado en Corea del Sur, presentaron un innovador material adsorbente en forma de esferas, sintetizado a partir de residuos de drenaje de minas de carbón, para el propósito de eliminar el arsénico presente en aguas residuales. Los resultados demuestran la alta eficacia del adsorbente en la reducción del contenido de arsénico, logrando una adsorción máxima de 17.5 mg/g.

(**Chen et al., 2023**), en su estudio de investigación titulada “Mechanism of arsenic immobilization and biotransformation in the biological aqua crust of mine

drainage” en la ciudad de Meizhou China, presentaron una investigación en la cual analizaron la corteza acuática biológica (BAC) en la retención del arsénico (As) en el contexto de drenaje minero. Los resultados obtenidos demuestran que la BAC exhibe una capacidad de retención de As que supera en un rango de 1.3 a 6.9 veces a la de los sedimentos (SEDs).

(Dillon et al., 2023), en su estudio de investigación “Porous titania beads for remediation of arsenic contamination from acid mine drainage” en la ciudad de Nueva Gales del Sur Australia, realizaron un estudio que abordó la utilización de perlas porosas de titania para abordar la contaminación de arsénico en el drenaje ácido proveniente de minas. Los resultados obtenidos destacan que estas perlas porosas de titania poseen una capacidad de adsorción altamente efectiva para el As(V).

(Fosso et al., 2017), en su estudio de investigación “Thermodynamic properties and adsorption behaviour of hydrogel nanocomposites for cadmium removal from mine effluents” ubicado en Sudáfrica, describieron la creación y análisis de un hidrogel y su híbrido nanocompuesto con clinoptilolita, evaluando su eficacia en la absorción de iones Cd^{2+} de soluciones acuosas y la adsorción de iones metálicos múltiples provenientes de aguas residuales de la minería. Los resultados demostraron que el nanocompuesto hidrogel-clinoptilolita exhibió una mayor capacidad de adsorción de Cd^{2+} en comparación con el hidrogel sin la mezcla. Además, este nanocompuesto demostró su eficacia en la eliminación de otros metales como Cu^{2+} , Zn^{2+} y Pb^{2+} de soluciones acuosas.

(López et al., 2021), en su artículo de investigación “Arsenic impact on the valorisation schemes of acidic mine waters of the Iberian Pyrite Belt: Integration of selective precipitation and spiral-wound nanofiltration processes” analizaron el

impacto del arsénico en los esquemas de valorización de las aguas ácidas procedentes de minas en la Faja Pirítica Ibérica, suroeste de España. Los autores implementaron procesos combinados de precipitación selectiva y nanofiltración en espiral con el objetivo de recuperar elementos de tierras raras y eliminar especies peligrosas. Sus resultados demostraron que la tasa de recuperación de elementos de tierras raras alcanzó un 80%, mientras que la reducción del flujo nominal logró un 50%.

(Okibe et al., 2023), en su proyecto de investigación titulado “Microbiological passive treatment of Mn/Zn-containing mine water” ubicado en Japón, utilizaron sedimentos negros como un agente inoculante para tratar aguas ácidas de minas que contenían Mn y Zn. Desarrollaron dos métodos biológicos, las cuales llamaron Tanque-I y Tanque-II. Utilizando agua sintética de mina exenta de CO_3^{2-} , el Tanque-I alcanzó una eficiencia de eliminación de más del 97% para Mn^{2+} y más del 80% para Zn^{2+} , en un período de retención hidráulica (HRT) de 15-17 horas. Así también, los autores demostraron que el Tanque-II logró una eliminación superior al 87% para Mn y más del 79% para Zn, con un HRT de 24 horas.

(Opitz et al., 2023), en su trabajo de investigación “Development of a novel sizing approach for passive mine water treatment systems based on ferric iron sedimentation kinetics” ubicado en la ciudad de Alto Palatinado sureste de Alemania, desarrollaron un nuevo método de dimensionamiento para sistemas de tratamiento de agua pasivos basado en la cinética de sedimentación del hierro férrico. Mediante un estudio piloto, evaluaron el desempeño de la eliminación de Fe en un sistema pasivo a escala piloto, logrando desarrollar un modelo de cálculo robusto y enfocado en la aplicación para la determinación del tamaño adecuado de estanques de sedimentación y humedales de flujo superficial. Los autores proponen una metodología para evaluar

la extracción de Fe en sistemas pasivos, proporcionando así una herramienta práctica para el diseño y dimensionamiento de sistemas de tratamiento de agua pasivos.

(**Villa et al., 2023**), en su trabajo de investigación “Element distribution (Villa et al., 2023) in electrochemically treated mine wastewater for efficient resource recovery and water treatment: A pilot study” ubicado en Inglaterra, emplearon una estrategia de modelado geoquímico y optimización de recuperación de recursos, demostrando la capacidad del proceso electroquímico para controlar exitosamente el nivel de pH y eliminar metales específicos del agua. Los resultados exhibieron que los metales predominantes, como Al, Cu y Fe, fueron eliminados del fluido a un pH de 5,9, mientras que una gran cantidad de Zn (57,2 ppm) permaneció presente. Por otro lado, a un pH de 7, el efluente estuvo mayormente compuesto por Mn (7,3 ppm).

(**Mayes et al., 2021**), en la investigación “Effect of an extreme flood event on solute transport and resilience of a mine water treatment system in a mineralised catchment” ubicado en Reino Unido, analizaron el impacto de eventos extremos de inundaciones en el transporte de sustancias disueltas y la capacidad de recuperación de un sistema de tratamiento de agua de mina ubicado en una cuenca con depósitos minerales. Los resultados indican que las inundaciones extremas provocaron un aumento significativo en la concentración de metales disueltos tanto en el agua de la mina como en el río receptor. Los autores subrayaron la necesidad de considerar los impactos del cambio climático en la gestión de cuencas con depósitos minerales y resaltan la importancia de desarrollar estrategias de adaptación con el fin de mejorar la capacidad de recuperación de los sistemas de tratamiento de agua de mina.

(**Dubuc et al., 2022**), en su proyecto de tesis titulado “Electro-Fenton treatment of contaminated mine water to decrease thiosalts toxicity to *Daphnia magna*” ubicado

en la ciudad Quebec Canadá, llevaron a cabo una comparación de la efectividad de tres métodos avanzados de oxidación en el tratamiento de tiosulfatos presentes en aguas afectadas por actividades mineras. Los resultados cuantitativos incluyen la capacidad de remoción de tiosulfatos en el agua de mina mediante tres enfoques avanzados de oxidación: el proceso electro-Fenton, el proceso de oxidación avanzada con peróxido de hidrógeno y el proceso de oxidación avanzada con ozono. Se encontró que el proceso electro-Fenton demostró ser el más eficaz en la eliminación de tiosulfatos. Los autores realizaron una evaluación de la toxicidad aguda de los efluentes mineros no tratados utilizando *Daphnia magna* como organismo de prueba, determinado que es posible eliminar la toxicidad aguda de los efluentes mineros empleando el proceso electro-Fenton.

(Bailey et al., 2016), en el trabajo de investigación “Heat recovery potential of mine water treatment systems in Great Britain” ubicado en Gran Bretaña, evaluaron el potencial de los sistemas de tratamiento de agua de minas en el Reino Unido para transformarse en generadores de energía, al aprovechar la recuperación de calor de baja intensidad. Realizaron un análisis exhaustivo de los sistemas de tratamiento de agua de minas en Inglaterra, Escocia y Gales. Los autores afirmaron que la recuperación de energía térmica podría tener un impacto significativo en la reducción de emisiones de carbono y brindar una fuente de energía renovable.

(Rey et al., 2021), en la investigación “Use of natural zeolite-rich tuff and siliceous sand for mine water treatment from abandoned gold mine tailings” ubicada en la ciudad de Santander Colombia, llevaron a cabo una evaluación de la eficacia de la toba rica en zeolita natural y la arena silíceas en el tratamiento de agua de mina contaminada con sulfuros y otros minerales provenientes de una mina de oro

desactivada en Colombia. Los resultados obtenidos indican que tanto la toba rica en zeolita natural como la arena silíceas son capaces de eliminar de manera efectiva sulfatos, hierro, aluminio, manganeso y otros metales pesados identificados en el efluente líquido. Lograron una eliminación del 99,9% en el caso de los sulfatos, y del 99,8%, 99,7% y 99,9% respectivamente para hierro, aluminio y manganeso. Además, afirmaron que tanto la toba rica en zeolita natural como la arena silícea sostuvieron el pH del agua de la mina tratada en niveles neutros.

(Fernández, 2022), en su tesis de maestría “Remoción electroquímica de arsénico en aguas residuales de procesos de plantas metalúrgicas en el cartón Camilo Ponce Enríquez” ubicada en el Ecuador, desarrollo un enfoque electroquímico para reducir la concentración del arsénico en el efluente líquido, logrando 91,90% de remoción del arsénico, a un pH de 4. Por otro lado, el autor demuestra valores de menos de 85% de eliminación de arsénico para valores de pH entre 2 y 8. Reporto valores finales de arsénico de 0,06 ppm, cumpliendo con los estándares establecidos por la normativa ecuatoriana, cuando se aplicó un pH de 4.

1.1.2. Nacionales

(Caso & Laureano, 2018), en su tesis de licenciatura “La goma de tara como agente floculante en la optimización del proceso de remoción de arsénico con FeCl_3 presente en agua de mina” demostraron que la incorporación de goma de tara al procedimiento de eliminación de arsénico mediante el uso de FeCl_3 tuvo un impacto positivo en la eficacia de la eliminación de arsénico. Demostraron que la concentración óptima de goma de tara fue de 0.5 g/L, mientras que la concentración óptima de FeCl_3

fue de 0.2 g/L. Al introducir la goma de tara en el proceso, la eficiencia de eliminación de arsénico aumentó del 60% al 95%.

(Ramos, 2022), en su tesis de “Optimización de la remoción de cadmio del drenaje ácido de la mina “La Esperanza” empleando humedales anaeróbicos artificiales a escala de laboratorio” realizaron experimentos en dos tipos de humedales construidos, uno con condiciones anaeróbicas y otro con condiciones aeróbicas. Sus mejores resultados demostraron la eficiencia de la tecnología de humedales construidos para disminuir las concentraciones de cadmio presentes en el agua contaminada. Los autores alcanzaron una reducción del 98,5% en la concentración de cadmio en el humedal anaeróbico artificial y del 99,5% en el humedal aeróbico artificial. Además, observaron que las concentraciones de sulfatos también experimentaron una disminución significativa, alcanzando un 99,9% en el humedal anaeróbico artificial y un 99,8% en el humedal aeróbico artificial.

(Puente & Calderón, 2018), en el artículo “Optimización del sistema de tratamiento y gestión sanitaria de aguas residuales industriales para vertimiento clase III, provenientes de la bocamina del nivel 250 (EF 03) al río San José – Perú” realizaron analizaron los parámetros de operación en un sistema de tratamiento destinado a aguas residuales industriales. Sus resultados demostraron que, a través de la optimización sistemática de la gestión de aguas residuales industriales, se logra alcanzar un nivel de vertimiento catalogado como clase III de acuerdo a los estándares de calidad requeridos para el medio ambiente.

(Tucto, 2019), en su investigación de tesis “Optimización del consumo del floculante para el tratamiento del Aluminio y Manganeso del agua de mina Unidad Minera Orcopampa – Buenaventura - Arequipa, 2019”, aplicó el método de

escalamiento de Likert, con el propósito de identificar distintas concentraciones del agente floculante y su interpretación. Logro demostrar que la concentración óptima de floculante para tratar aluminio y manganeso en el agua de mina en la Unidad Minera Orcopampa, fue de 0.5 g/L, mientras que el valor ideal de pH es de 8.5.

(**Borja, 2019**), en su tesis “Carbón activado de corteza de papa como filtro para la remoción de plomo y cadmio en aguas de mina, Casapalca – Lima, 2019” Desarrollo pruebas de adsorción de plomo y cadmio en agua de mina utilizando el filtro de carbón activado, evaluando el desempeño del filtro en términos de remoción de contaminantes. Los resultados obtenidos demostraron que el filtro fue altamente eficaz en la eliminación de plomo y cadmio presentes en el agua de mina, alcanzando niveles de remoción del 98,5% y 99,5%, respectivamente.

(**De la Cruz & Coronel, 2017**), en la investigación “Estudio de optimización del sistema de tratamiento de las aguas ácidas de un efluente minero” sustentan un estudio de prefactibilidad que puede ser aplicado a la problemática de aguas ácidas en un efluente minero con un caudal que oscila entre los 29 y 30 l/s, y que presenta un pH de 5,5, así como una notable concentración de hierro y sólidos suspendidos totales.

1.2. Situación Problemática

La explotación minera polimetálica genera el drenaje ácido de mina, siendo un problema que afronta actualmente el sector, por ello se toma medidas de plan de manejo ambiental, mediante sistemas de tratamiento de aguas activos y/o pasivos. Para cumplir los compromisos ambientales establecidos en los instrumentos de gestión ambiental (IGA) y normativas establecidas para el medio ambiente (Blanca, 2013).

Los drenajes de mina por lo general son ácidos y contienen elevadas concentraciones de Fe, Cu, Cd, Pb y As, son la principal fuente de biodisponibilidad de elementos contaminantes que degradan la calidad de los cuerpos receptores de agua. Esta problemática persiste durante décadas, para revertir en los últimos años en el sector minero de Perú, se han venido implementando normas y referencias para el control ambiental como los Estándares de Calidad Ambiental (ECA) y los Límites Máximos Permitidos (LMP), formando parte obligada de la gestión ambiental en minería. Para que las descargas de mina cumplan con estas exigencias es necesario que las empresas mineras implementen una planta de tratamiento o acometan la optimización del proceso de las actuales plantas de neutralización existentes. La ineficiencia de los equipos y el diseño de componentes en la planta de tratamiento de agua de mina determina controles deficientes en cada proceso (Aduvire, 2018).

La excesiva dosificación de reactivos es un factor importante en el proceso del tratamiento de agua, es decir un descontrol operativo, lo que significa el incumplimiento de los límites máximos permisibles, generando contaminantes que afectan la salud, la agricultura y medio ambiente de las comunidades de influencia directa.

En las operaciones mineras el incumplimiento de los Límites Máximos Permisibles, con excedencia de metales Mn, Cu, Fe, As y Cd en el cuerpo receptor generan procesos administrativos sancionadores que conlleva a multas ambientales bajo el ámbito de competencia del Organismo de Evaluación y Fiscalización Ambiental generando pérdidas para la empresa y conflictos sociales con las comunidades aledañas por generar impactos negativos al medio ambiente.

1.3. Formulación del Problema

1.3.1. Problema General

Tratamiento deficiente del compuesto del efluente minero, el cual se caracteriza por tener alta carga metálica y se encuentra en un rango de pH de 3 a 4, impactando negativamente al medio ambiente.

efluente minero compuesto se encuentra dentro del rango de PH 3 a 4, se caracteriza por tener alta carga metálica, el cual es tratado en la actual planta de tratamiento de aguas de manera deficiente, impactando al medio ambiente.

1.3.2. Problemas Específicos

En la actual planta de tratamiento de aguas ocurren limitaciones en el efluente minero respecto a la dosificación de reactivos.

Se requiere formular el diseño de los componentes de la planta de tratamiento del agua de mina para remover los metales As y Cd.

1.4. Justificación de la Investigación

1.4.1. Justificación Teórica

La presente investigación permitirá a los centros mineros polimetálicos la evaluación del sistema de tratamiento de agua de mina, con el propósito de identificar las oportunidades de mejora en la operación, así como evaluar la dosificación óptima de los reactivos y el diseño adecuado de los componentes de la planta, con la finalidad de cumplir los límites máximos permisibles y ECA agua de Categoría 3.

La optimización de los parámetros de la planta de tratamiento del agua mina permitirá remover los metales en el cuerpo receptor de Categoría 3 para Riego de vegetales y Bebida de animales riego, minimizando a los contaminantes que afectan la

salud, la agricultura y medio ambiente de las comunidades aledañas a los distritos altoandinos del Perú.

La dosificación óptima de los reactivos como cal (hidróxido de calcio) y floculante (MET) en el sistema de tratamiento de agua de mina permitirá el cumplimiento de los límites máximos permisibles. Asimismo, la disminución del consumo de reactivos genera menor volumen de lodo, beneficiando al costo de tratamiento (Soles/m³ de agua tratada) y la minimización del impacto ambiental al medio ambiente.

La presente investigación minimiza el impacto que se genera en el proceso de extracción del mineral (explotación) llamado residuos líquidos (afluente) lo cual permite obtener buenas relaciones sociales con la comunidad aledaña y asimismo el uso del agua (cuerpo receptor) para riego de los vegetales y bebida para sus animales.

1.5. Objetivos

1.5.1. Objetivo General

Optimizar la planta de tratamiento del agua de mina para remover As y Cd cumpliendo con la categoría 3 en el cuerpo receptor de distritos altoandinos del Perú.

1.5.2. Objetivos Específicos

Determinar la dosificación óptima de reactivos cumpliendo los límites máximos permisibles en la descarga del efluente minero.

Diseñar adecuadamente los componentes de la planta de tratamiento del agua de mina para remover los metales As y Cd.

1.6. Hipótesis

1.6.1. Hipótesis General

La optimización de la planta de tratamiento de agua de mina permitirá la remoción de metales As y Cd cumpliendo con la Categoría 3 en el cuerpo receptor.

1.6.2. Hipótesis Específicas

Una óptima dosificación de reactivos logrará el cumplimiento de los límites máximos permisibles.

Un adecuado diseño de componentes de la planta de tratamiento podrá remover los metales As y Cd.

1.7. Identificación de Variables

1.7.1. Variables Independientes

- Dosificación de reactivos
- Diseño de componentes de la planta de tratamiento

1.7.2. Variables Dependientes

- Remoción de metales, arsénico y cadmio

1.7.3. Variables Controladas o Intervenientes

- Método de estudio
- Revolución de agitación

CAPÍTULO II

EL MARCO TEÓRICO Y MARCO CONCEPTUAL

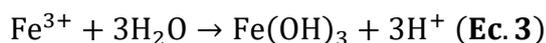
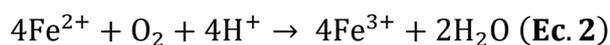
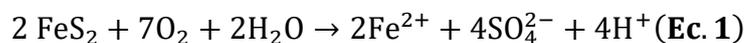
2.1. Drenaje Ácido de Mina (AMD)

La actividad de extracción de metales y la posterior molienda de minerales metálicos generan una perturbación en el equilibrio del ecosistema medioambiental. Los procedimientos como la molienda, voladura y trituración de estos minerales contribuyen a incrementar la superficie expuesta y facilitan la exposición de los residuos a los efectos atmosféricos, lo que puede llevar a una combinación con el oxígeno y el agua circundante para dar origen a iones metálicos y ácido sulfúrico (Ighalo et al., 2022), (Jamieson et al., 2015), (Jönsson et al., 2005). Estos elementos reaccionan con la estructura geológica, las fuentes superficiales y subterráneas de agua, generando compuestos químicos que resultan en niveles de pH más reducidos. A esta clase de agua se le identifica convencionalmente como drenaje ácido de mina (AMD) (Skousen et al., 2017).

2.1.1. Mecanismo de Formación del Drenaje Ácido de Mina

La génesis del drenaje ácido de mina (AMD) se deriva del proceso de oxidación de minerales sulfurosos, que involucra tanto una oxidación química como

biológica. El rol crucial en este proceso lo desempeña la oxidación biológica (Kefeni et al., 2017).



En presencia de agua y oxígeno, la pirita experimenta una transformación en la que se forma Fe^{2+} y H_2SO_4 , como se ilustra en la ecuación de reacción (1). Este proceso es fundamental para la generación de drenaje ácido de mina (AMD), tal y como se observa en la Figura 2.1. La composición mineral, la actividad microbiana en el entorno y condiciones externas, como la disponibilidad de oxígeno y agua, ejercen un control sobre la velocidad de oxidación de la pirita y la liberación de iones H^+ .

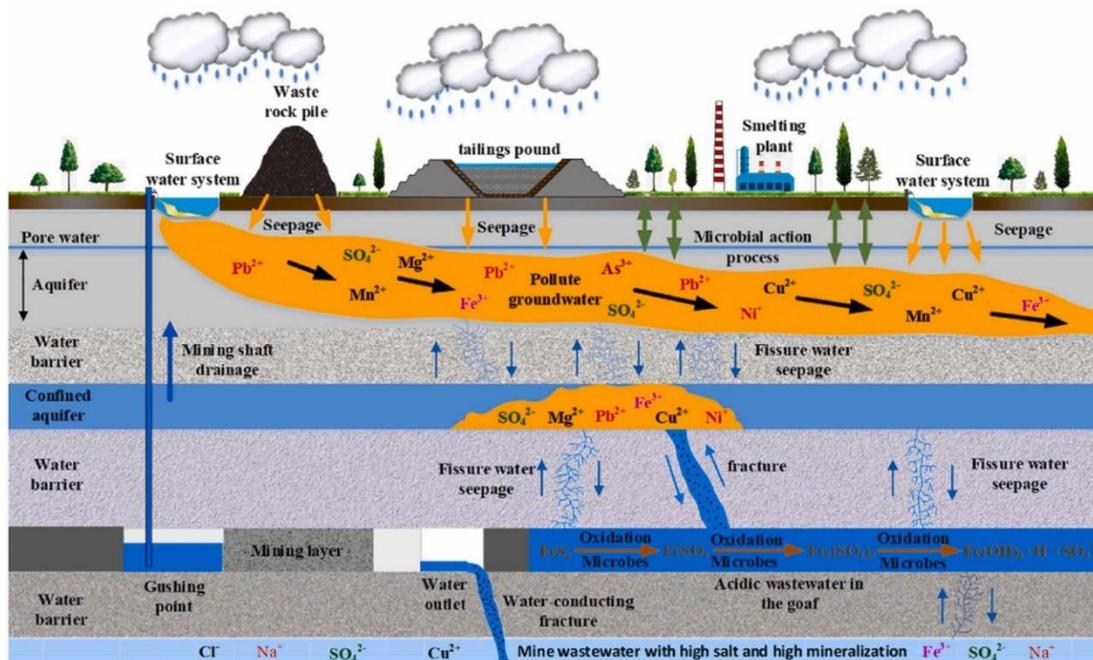


Figura 2. 1

Diagrama esquemático de la formación de AMD

Fuente: (Chen et al., 2021).

2.1.2. Impacto Ambiental del Drenaje Ácido de Mina

Los efectos en el entorno generado por el AMD se pueden categorizar en cuatro grupos: efectos químicos (como el aumento de la acidez y los metales en el entorno), efectos físicos (como la reducción de la penetración de la luz en el agua circundante), efectos biológicos (incluyendo cambios en el comportamiento, problemas de reproducción y mortalidad de organismos), y efectos ecológicos (tales como modificaciones en las cadenas tróficas y en los hábitats, así como la pérdida de fuentes de alimento o presas) (Gray, 1997). Los efectos medioambientales del drenaje ácido de mina (AMD) se presentan de manera detallada en la Figura 2.2 (Ighalo et al., 2022).

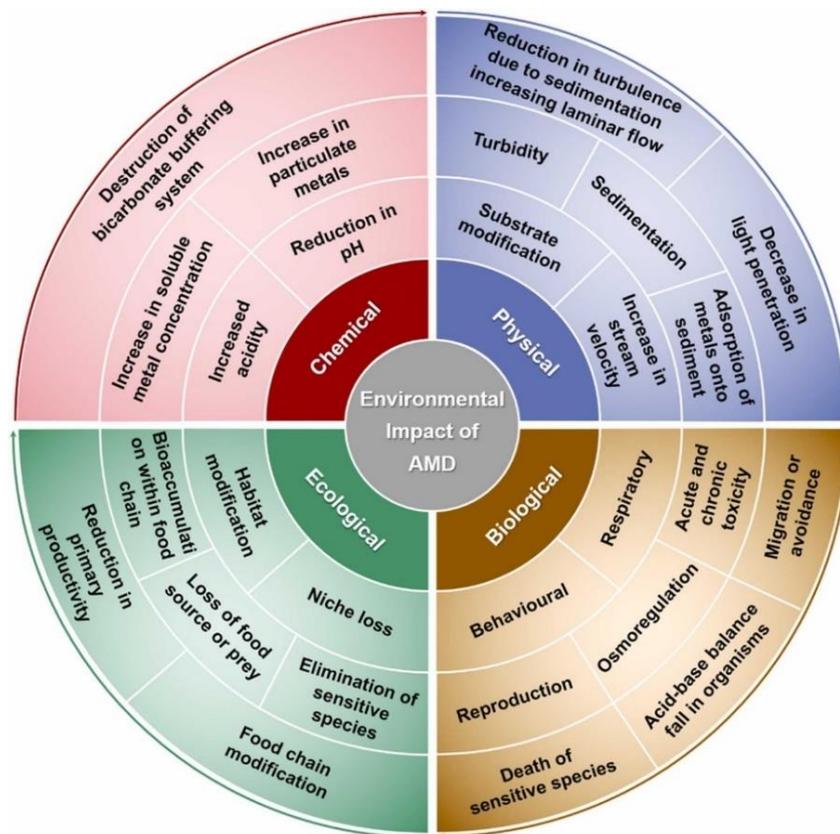


Figura 2. 2

Impacto ambiental de AMD

Fuente: (Ighalo et al., 2022).

2.2. Métodos de Tratamiento del Drenaje Ácido de Mina

2.2.1. Tratamiento Activo para Drenajes Ácidos de Mina

Se refieren a aquellos escenarios en los que es esencial mantener una vigilancia continua del sistema, además de necesitar energía eléctrica, productos químicos y otros elementos. El proceso de tratamiento en sistemas activos implica inicialmente una etapa de oxidación lograda mediante la introducción de aire, ya sea natural o mecánico. Posteriormente, se añade un agente neutralizante para alcanzar un pH estable y dentro de los límites permitidos para la descarga. Es importante destacar que este tipo de

tratamiento conlleva a costos significativos en su implementación (Jaramillo & Contreras, 2019). Los enfoques de tratamiento activo emplean agentes neutralizantes con el propósito de ajustar el pH a los niveles de calidad requeridos para las aguas residuales.

2.2.2. Tratamientos Pasivos para Drenajes Ácidos de Mina

En los últimos diez años, se han explorado distintas estrategias de tratamiento pasivo que han demostrado ser eficaces en estabilizar el pH y eliminar metales pesados. Estos métodos, además de necesitar un mantenimiento mínimo, se caracterizan por ser económicamente viables en períodos prolongados (de 20 a 40 años) después del cierre de la operación minera. Los enfoques de tratamiento pasivo se basan en los mismos procesos físicos, químicos y biológicos que ocurren en los humedales naturales (wetlands), donde se logra una modificación beneficiosa de ciertas características de las aguas contaminadas para lograr la eliminación de metales y la neutralización del pH.

2.2.2.1.1. Humedales Aerobios

Los humedales artificiales aerobios buscan emular los fenómenos y mecanismos presentes en humedales naturales, como pantanos, marismas y turberas. Este enfoque implica crear un entorno favorable para el crecimiento de plantas específicas como *Tipha*, *Equisetum*, carrizo y juncos, así como para el establecimiento de poblaciones de bacterias, además de algas, protozoos, junto con la presencia de musgos como el *Sphagnum*. Estos elementos trabajan de manera colaborativa en la purificación del líquido elemento (Kadlec & Wallace, 1996). Estos humedales

artificiales abarcan una extensa área y presentan una cubierta superficial de agua que cubre el sustrato donde existe vegetación. El flujo pausado del agua en el humedal se logra un tiempo necesario, el cual facilita los procesos de depuración gradual del agua. En los sistemas aeróbicos, se lleva al cabo el contacto entre el agua contaminada y el aire atmosférico mediante la presencia de organismos vegetales acuáticos, las cuales liberan oxígeno a través de sus raíces y rizomas (Skousen et al., 2017).

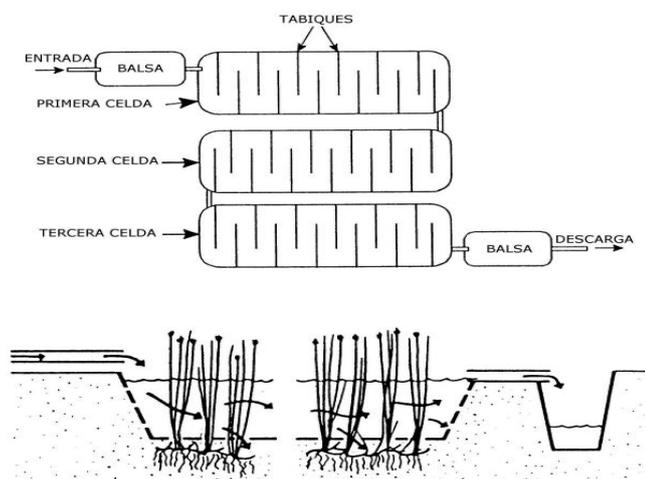


Figura 2. 3

Organización de las unidades celulares en un humedal de tipo aeróbico y el movimiento del agua dentro de cada una de ellas

Fuente: (Brix, 1993).

2.2.2.1.2. Humedales Anaerobios o Balsas Orgánicas

En estos tipos de humedales, se requiere que la altura del agua sea mayor a 30 cm para crear las condiciones anóxicas necesarias para su funcionamiento efectivo. Esta capa de agua genera una cubierta permeable de 30-60 cm de espesor, compuesto

principalmente por materia orgánica (70-90% de elementos como estiércol, compost, etc.), que se coloca sobre una caliza. El propósito de este lecho orgánico es que se lleve a cabo la reacción de reducción de Fe^{3+} a Fe^{2+} , eliminar el oxígeno disuelto, y generar el aumento de la alcalinidad del medio mediante procesos químicos y biológicos. La vegetación en estos tipos de áreas crece sobre el lecho, contribuyendo a la estabilidad del sustrato y proporcionando más material orgánico. Estos sistemas operan en un estado constante de inundación, con parte del agua fluyendo horizontalmente a través del lecho orgánico.

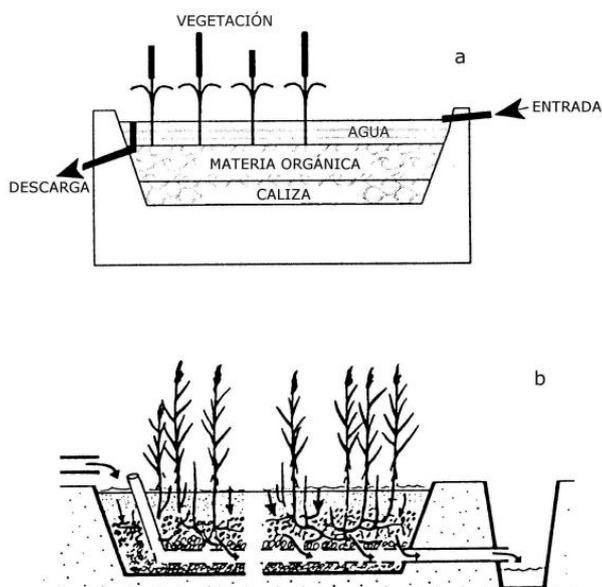


Figura 2. 4

Humedal anaerobio de flujo horizontal (a) y vertical (b)

Fuente: (Brix, 1993).

2.2.2.1.3. *Drenaje Anóxico Calizo (ALD)*

Este método se compone de una zanja que se rellena con gravas de caliza o un material calcáreo equivalente, y se sella en la parte superior con arcilla y un plástico impermeable (geomembrana). La zanja se instala de 1 a 2 metros, con el propósito de mantener las condiciones anóxicas del medio. El AMD fluye dentro de la zanja, lo que conduce a la disolución gradual de la caliza. Este proceso resulta en la generación de alcalinidad ($\text{HCO}_3^- + \text{OH}^-$) y en un aumento del pH del agua. Cabe señalar que la solubilidad de la caliza en un cuerpo de agua se ve influenciada por dos factores principales: el nivel de acidez o alcalinidad del medio y la presión parcial de CO_2 . Estos dos factores se relacionan entre sí, ya que un incremento en la pCO_2 conlleva una disminución en el pH. Es importante destacar que la disolución de la calcita es más pronunciada en condiciones ácidas y en presencia de altas concentraciones de pCO_2 (Evangelou, 1998).

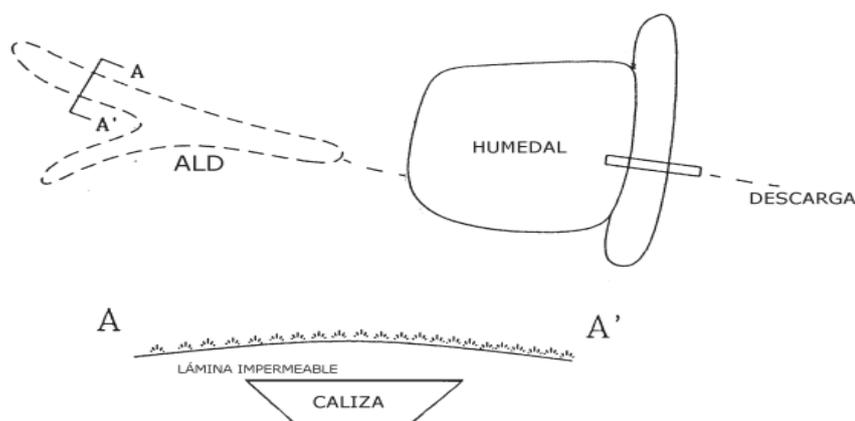


Figura 2. 5

Sistema ALD y humedal

Fuente: (Brodie et al., 1993).

2.2.2.1.4. Sistema de Producción Sucesiva de Alcalinidad (SAPS)

Este método de purificación de aguas ácidas provenientes de minas fue concebido por (Kepler & McCleary, 1994) Para abordar el desafío de la extensa área requerida por los sistemas de humedales anaerobios y la formación de los compuestos químicos tipo hidróxidos, de hierro y aluminio, presentes en los sistemas de ALD, se ha ideado un enfoque innovador denominado SAPS (Sistema Anaerobio de Purificación de Sulfato). En este sistema de tratamiento se puede identificar la aplicación de los conceptos de una balsa orgánica y un sistema de ALD en un único sistema de tratamiento. Un SAPS se configura como un reservorio que aloja dos estratos sumergidos en el influente, ubicados a una distancia de 1 a 3 metros, drenado mediante una red de tuberías en su base (Fig. 2.4). El estrato inferior consiste en caliza (con un espesor de 0,5 a 1 metro) y cumple la función de neutralizar el pH del influente. Por su parte, el estrato superior está compuesto de material orgánico (con un espesor de 0,1 a 0,5 metros) y desempeña roles clave como la eliminación de oxígeno disuelto del agua, la reducción del sulfato y la conversión del Fe^{3+} a Fe^{2+} . Esto último previene la formación de hidróxido de Fe^{3+} en la capa de caliza, permitiendo así un eficiente proceso de tratamiento (Skousen et al., 2017). Los sistemas SAPS han sido diseñados específicamente para tratar aguas altamente ácidas con concentraciones de Fe^{3+} y Al superiores a 1 mg/l.

2.2.2.1.5. Barreras Reactivas Permeables (PRB)

Cuando las aguas ácidas de mina impactan o se presentan como un flujo subterráneo, el sistema de tratamiento pasivo adopta la forma de una barrera permeable y reactiva dispuesta en ángulo recto con respecto a la dirección del flujo.

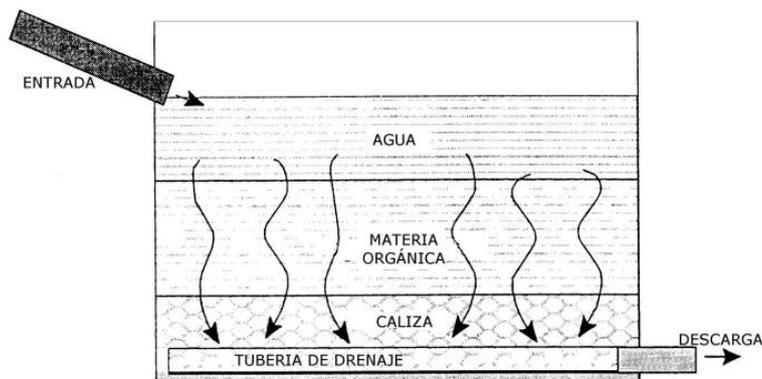


Figura 2. 6

Disposición de sustratos y dirección del flujo en un SAPS

Fuente: (United States Environmental Protection Agency, 2001).

Tal y como se observa en la figura 2.6, la estructura se compone de una zanja transversal al flujo, la cual se llena con materiales reactivos como caliza, materia orgánica, limaduras de hierro, entre otros. Se le puede considerar como una disposición subterránea y vertical. De esta manera, los procesos de purificación dentro de la barrera abarcan las reacciones químicas de reducción de sulfatos mediante bacterias, la retención de metales mediante la precipitación de sulfuros y el aumento del pH debido a la solubilidad del material calcáreo.

2.2.3. Selección del Tipo de Tratamiento

Se ha desarrollado un esquema gráfico (representado en la Figura 2.7) de las propuestas de (Skousen et al., 2017), la cual que permite accionar un adecuado tratamiento de pasivos, la cual mantiene una estrecha relación con las propiedades químicas específicas del AMD.

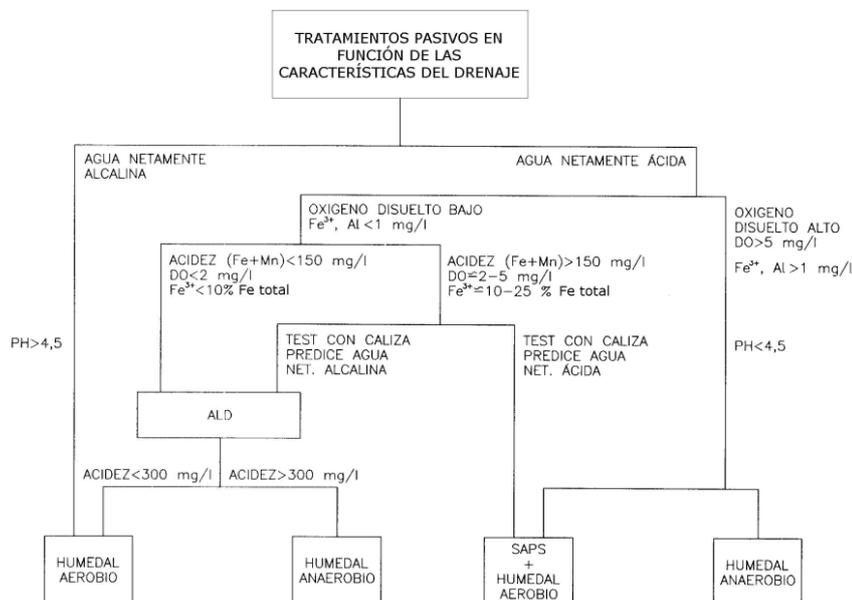


Figura 2. 7

Flujo gráfico destinado a elegir el sistema o la mezcla de sistemas para la depuración pasiva de drenajes ácidos provenientes de explotaciones mineras

Fuente: (Hedin & Nairn, 1993).

2.2.4. Métodos más Utilizados para el Tratamiento de Drenaje Ácido de Mina

El drenaje de ácido de mina (AMD) representa uno de los desafíos medioambientales más serios a nivel global. Los expertos han investigado y examinado en profundidad soluciones para abordar la AMD. Los enfoques de tratamiento más empleados engloban la neutralización, métodos de naturaleza microbiológica, sistemas de humedales artificiales, adsorción y técnicas de membrana para separación.

2.2.4.1. Neutralización

La neutralización se destaca como el método más frecuente para abordar la AMD. Su fundamentación es elemental: se emplea una reacción ácido-base para elevar el pH de las aguas contaminadas, disminuyendo su acidez. Además, se aprovecha el ion OH^- proveniente del agente neutralizante para reaccionar con los iones de metales pesados en el agua, formando precipitados insolubles que propician la eliminación de dichos iones (Tong et al., 2021). Los enfoques de neutralización típicamente abarcan el método de neutralización con piedra caliza (desglosado en método de tambor y método de filtro de flujo ascendente de piedra caliza), el método de neutralización con cal, y el método combinado de neutralización con piedra caliza y cal. La tabla 01 presenta una comparación entre estas técnicas tradicionales de neutralización.

2.2.4.2. Microorganismos

La estrategia microbiológica implica aprovechar ciertas cualidades de los microorganismos para abordar la AMD. El proceso central radica en la oxidación del Fe^{2+} en la AMD a Fe^{3+} mediante bacterias sulfurosas en ambientes ácidos y ricos en oxígeno, lo que posibilita la eliminación de iones de metales pesados, como el Fe^{2+} , de las aguas ácidas. Simultáneamente, la precipitación puede transformarse en sulfato férrico polimérico y óxido férrico (Gao et al., 2021). Luego de la adición de agentes alcalinos, como la lechada de cal, con el fin de llevar a cabo la neutralización, se procede a emplear técnicas como la filtración, precipitación y otros procedimientos para alcanzar la meta deseada de purificación del agua. El esquema de este proceso se presenta visualmente en la Figura 2.8.

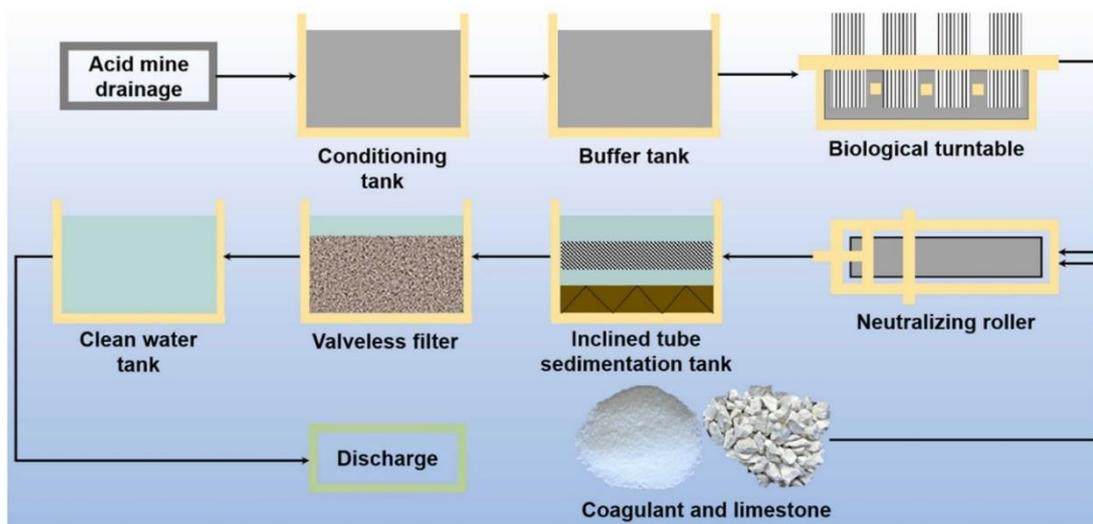


Figura 2. 8

Flujo de proceso del tratamiento de AMD por el método microbiano

Fuente: (Abdullah et al., 2019).

2.2.4.3. Humedal Construido

Los humedales artificiales consisten en áreas deprimidas con dimensiones específicas en términos de relación de longitud a ancho y pendiente del fondo. Estas depresiones se llenan con material de relleno necesario para formar una superficie de sustrato. En la parte superior de este sustrato se cultivan selectivamente algunas especies de plantas acuáticas que demuestran una notable tolerancia a la acidez, una alta capacidad de supervivencia en ambientes acuáticos, resistencia al agua, un ciclo de crecimiento prolongado, y que además poseen atributos estéticos y valor económico. Este enfoque se emplea para crear un entorno ecológico específico y deseado. El procedimiento implica la interconexión secuencial de diversos humedales artificiales y representa una combinación sinérgica de enfoques físicos, químicos y biológicos. Los procesos involucrados en la descontaminación abarcan (1) la hidrólisis

y oxidación de iones metálicos; (2) la reducción de sulfato mediante bacterias anaerobias; y (3) la adsorción y metasomatismo de metales por algas, plantas y materia orgánica (Gao et al., 2021).

2.2.4.4. Adsorción

La adsorción es uno de los métodos más rentables y eficientes para tratar la AMD. La molécula adsorbente contiene diversos grupos funcionales que participan en la interacción con los contaminantes, llevando a su eliminación. En tiempos recientes, la atención de la investigación se ha desplazado desde los adsorbentes convencionales hacia la creación de adsorbentes que sean ecológicos, efectivos y económicamente viables para abordar la AMD (Mokgehle & Tavengwa, 2021).

2.2.4.5. Separación de Membranas

La tecnología de membrana es una opción prometedora para la separación de mezclas de sustancias. La técnica de separación mediante membranas posee una huella reducida, una alta efectividad en la separación y produce efluentes de buena calidad, lo que ha incrementado su demanda en el ámbito del tratamiento de aguas (Lee et al., 2017). En los últimos años, ha aumentado la popularidad de las tecnologías de separación por membrana en los procedimientos de tratamiento de AMD, impulsada por el continuo avance en los materiales de membrana. Estos avances abarcan una variedad de procesos, como la nanofiltración (NF), la destilación por membrana (MD), la ósmosis inversa (RO), la ósmosis directa (FO) y la electrodiálisis (ED). La Figura 2.9 ilustra el mecanismo que subyace en el proceso de remoción de impurezas mediante la separación con membrana.

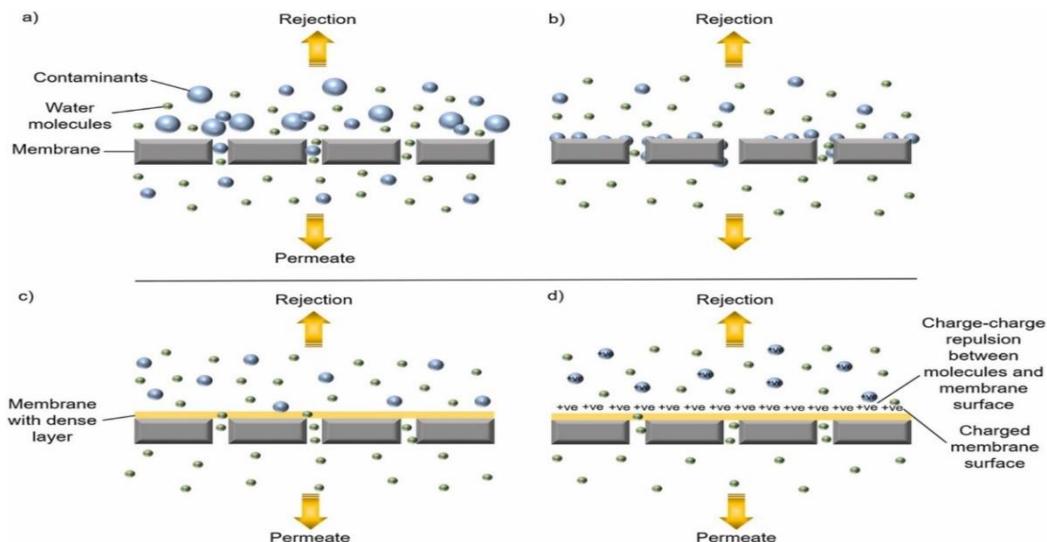


Figura 2. 9

Mecanismos de remoción en las membranas: a) Exclusión por tamaño o mecanismo de barrera selectiva; b) Mecanismo de adsorción; c) Exclusión por tamaño o mecanismo de barrera selectiva; d) Rechazo de Donnan (exclusión de carga)

Fuente: (Abdullah et al., 2019).

2.2.4.6. Procesos Combinados

En el contexto del tratamiento de AMD, una única técnica de tratamiento presenta limitaciones en términos de eficacia. Cuando se exigen altos estándares de calidad para los efluentes tratados, es posible que una sola técnica no logre satisfacer dichos requisitos. Además, dado que cada método de tratamiento presenta desventajas inherentes, a menudo resulta necesario combinar dos o más enfoques para lograr los niveles de calidad deseados en los efluentes y para abordar las limitaciones propias de cada método (Abdullah et al., 2019).

2.3. Coagulación

Es un procedimiento de desestabilización química de las partículas coloidales que se generan al neutralizar las fuerzas que las mantienen dispersas, mediante la adición de reactivos y agitación del sistema. El objetivo de la coagulación es favorecer la aglomeración para eliminar especies en suspensión. Además de eliminar la turbidez del sistema, es responsable de reducir la concentración de materia orgánica y organismos microscópicos. La Figura 2.10 siguiente ilustra los productos químicos que neutralizan las cargas eléctricas en la superficie del coloide, lo que permite que las partículas coloidales se agrupen formando flóculos (Abdullah et al., 2019). La coagulación se considera el enfoque más eficaz, aunque también implica costos significativos si no se realiza de manera adecuada. Es además el método de alcance universal, ya que elimina diversas sustancias de diferente naturaleza y peso de materia a un menor costo (Bolzicco et al., 2001).

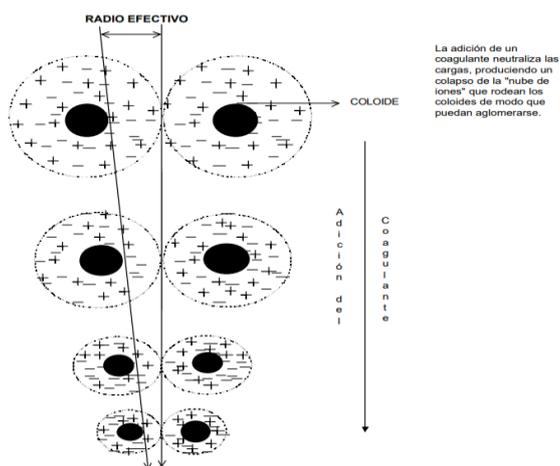


Figura 2. 10

Coagulación

Fuente: (Ettner, 1999).

2.3.1. Tipos de Coagulación

- a. **Coagulación por adsorción:** Ocurre cuando el agua exhibe una elevada cantidad de átomos y/o partículas en forma coloidal. Al introducir el reactivo químico tipo coagulante en el agua con turbidez, los componentes solubles de son capturados por los coloides y se aglomeran en flóculos de manera prácticamente inmediata (Feng et al., 2010).

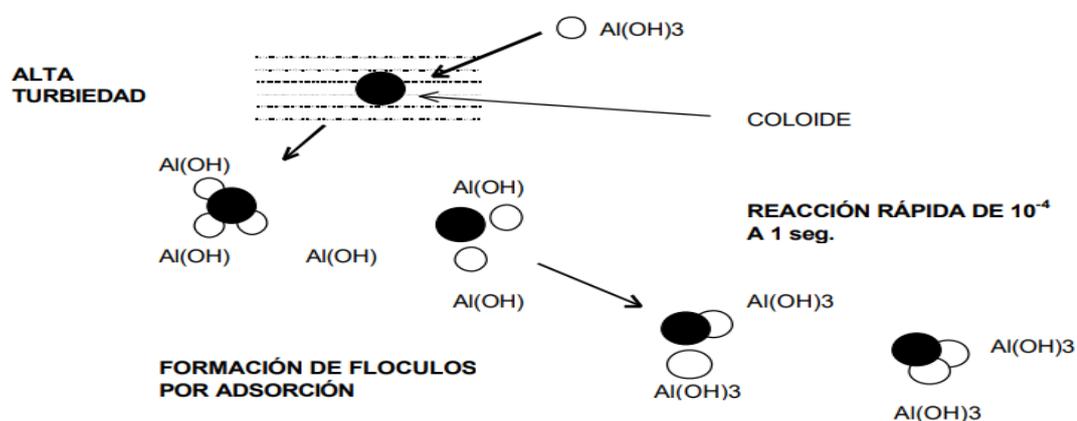


Figura 2. 11

Coagulación por adsorción

Fuente: (Crites et al., 1997).

- b. **Coagulación por barrido:** Este tipo de coagulación ocurre en situaciones donde el agua está limpia (posee baja turbidez) y la cantidad de partículas coloidales es reducida; en estas circunstancias, las partículas quedan atrapadas debido a la sobresaturación del precipitado de sulfato de aluminio o cloruro férrico (Feng et al., 2010).

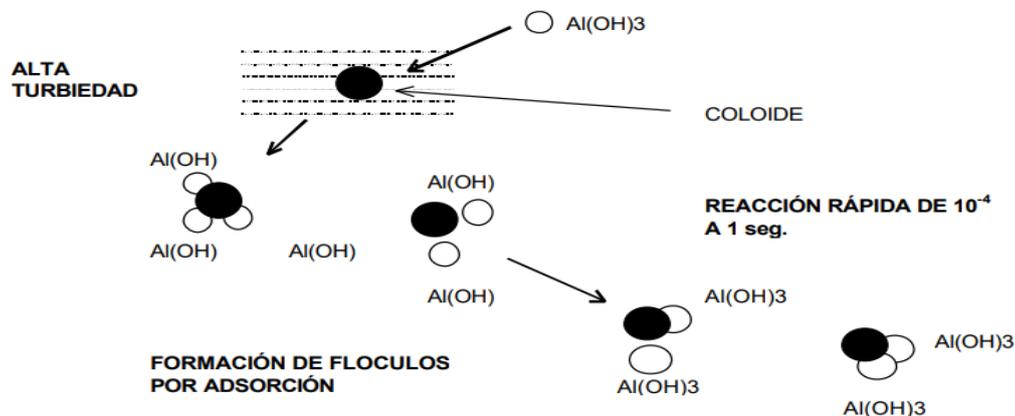


Figura 2. 12

Coagulación por barrido

Fuente: (Andía, 2000).

2.3.2. *Coagulantes Utilizados*

Los ingredientes son sustancias químicas que al introducirse en el agua tienen la capacidad de llevar a cabo una reacción química con los elementos químicos presentes en el agua, especialmente con la alcalinidad del agua, formando un precipitado de gran volumen y altamente absorbente. Este precipitado suele estar compuesto principalmente por el hidróxido metálico proveniente del reactivo químico tipo coagulante (Hamilton et al., 2007).

Los principales agentes coagulantes empleados con el propósito de desestabilizar las partículas y generar la formación de flóculos son:

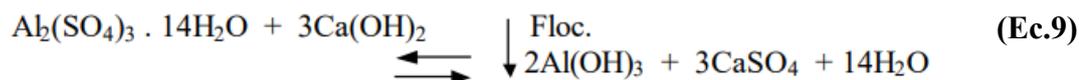
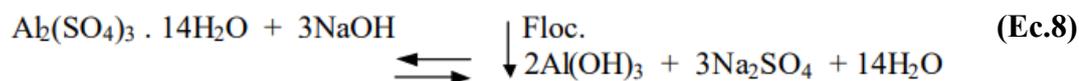
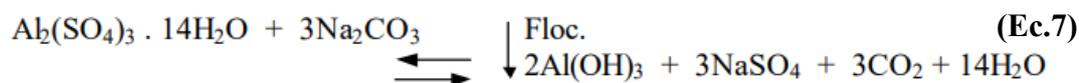
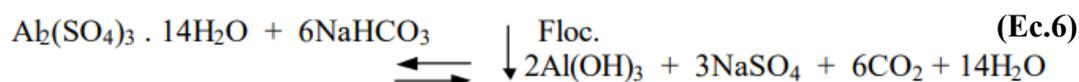
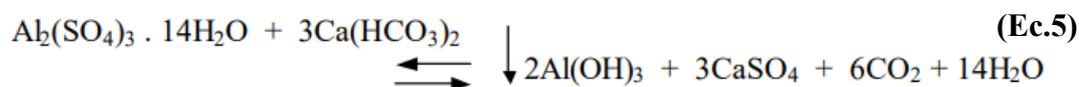
- Sulfato de Aluminio
- Aluminato de Sodio
- Cloruro de Aluminio
- Cloruro Férrico

- Sulfato Férrico
- Sulfato Ferroso
- Polielectrolitos (Como ayudantes de floculación)

2.3.3. Alcalinidad

Es una técnica de examen que permite evaluar la cantidad de bicarbonatos (HCO_3^-), carbonatos (CO_3^{2-}) e hidróxidos presentes en una muestra de agua, ya sea de origen natural o sometida a algún proceso de tratamiento. La alcalinidad se encuentra vinculada al pH del agua (Abdullah et al., 2019).

Las reacciones primordiales del sulfato de aluminio con el agua alcalina son las siguientes:



2.3.4. Sistema de Aplicación del Coagulante

Se considera que una reacción adecuada entre el coagulante y el agua se logra bajo las siguientes condiciones:

- La dosificación del coagulante en el agua se realiza de manera constante y homogénea, asegurando que el reactivo se disperse y mezcle completamente con el agua (Opitz et al., 2023)
- El sistema de dosificación debe proporcionar un flujo constante y fácilmente ajustable. Las condiciones de mezcla entre el coagulante y el agua se ilustran en la Figura 2.13, también se puede observar que la mezcla óptima ocurre cuando el coagulante añadido se incorpora por completo en la masa de agua. Este estado se logra mediante equipos de dosificación tanto para coagulantes en forma sólida como líquida, los cuales deben estar calibrados y validados en las operaciones a nivel industrial (Jiang et al., 2023).

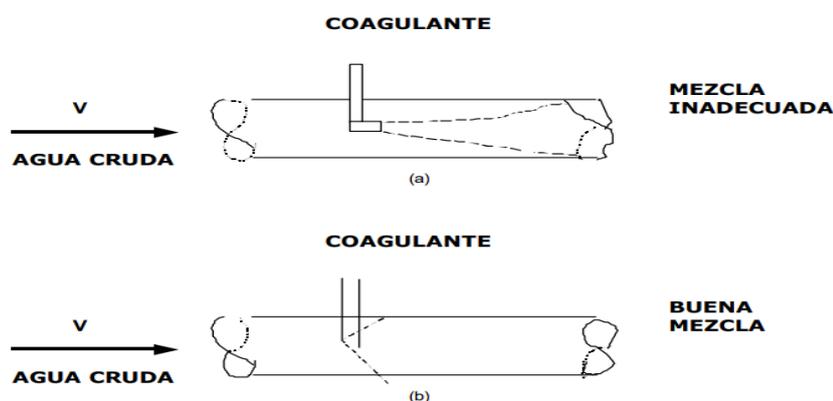


Figura 2. 13

Condiciones de mezcla

Fuente: (Andía, 2000).

2.4. Floculación

La floculación es el proceso sucesivo a la coagulación, donde la masa coagulada es sometida a agitación con el propósito de facilitar el desarrollo y la congregación de los flóculos recién generados, con el fin de incrementar su tamaño y peso para que sedimenten de manera eficaz (Iribar et al., 1999). Estos flóculos, originalmente pequeños, se combinan al unirse, formando conglomerados más grandes que tienen la capacidad de sedimentar. En la segunda fase del proceso de mezcla, que involucra una agitación más lenta, el objetivo es propiciar la interacción entre los flóculos, la reducción de la turbidez y el color del agua. La mezcla debe ser lo suficientemente intensa para generar variaciones de velocidad del agua en el sistema, aunque no excesivamente vigorosa, dado que existe el riesgo de que los flóculos se rompan. Esto es válido incluso si el tiempo de floculación no excede el óptimo (Bolzicco et al., 2001).

En ocasiones, los flóculos generados mediante la combinación de varios coloides pueden resultar insuficientemente grandes para separar las fases con la rapidez deseada (Andía, 2000). Es por ello, la necesidad de utilizar un agente floculante para unirlos en una estructura en forma de red, estableciendo puentes que conecten las partículas individuales y formen conglomerados. El proceso de floculación se ve beneficiado por una agitación lenta que permite que los flóculos se unan gradualmente; una agitación demasiado vigorosa los desintegra. La floculación no solo aumenta el tamaño de las partículas del flóculo, sino que también incrementa su peso.

2.4.1. Tipos de Floculación

2.4.1.1. Floculación Pericinetica

Se lleva a cabo por un movimiento natural entre moléculas de agua conocida como movimiento browniano, además de ser inducida por energía térmica (Andía, 2000).

2.4.1.2. Floculación Ortocinetica

Este proceso se fundamenta en las interacciones entre partículas ocasionadas por la corriente del agua, generada mediante una energía exterior a la masa acuosa, que puede ser de naturaleza mecánica o hidráulica (Abdullah et al., 2019).

Una vez que el agua ha sido coagulada, es imperativo que los microflóculos se agrupen; este proceso se inicia con la floculación pericinetica, seguida de la floculación ortocinetica (Borja, 2019).

2.4.2. Parámetros de la Floculación

Los atributos que caracterizan el proceso de floculación abarcan los siguientes aspectos:

- Floculación Ortocinetica (determinada por la intensidad de agitación, ya sea mecánica o hidráulica).
- Gradiente de Velocidad (energía requerida para inducir la mezcla).
- Frecuencia de Colisiones (impacto entre microflóculos).
- Tiempo de Retención (duración del agua en la unidad de floculación).
- Densidad y Dimensión de los Floculos.

- Volumen de Lodos (evitando la sedimentación de flóculos en las unidades de floculación).

2.4.3. *Floculantes*

Los agentes de floculación son polímeros o polielectrolitos con pesos moleculares notoriamente altos. Estas moléculas orgánicas solubles en agua están conformadas por unidades básicas conocidas como monómeros, que se repiten en largas cadenas. Estos agentes de floculación pueden categorizarse en tres tipos: mineral, orgánico natural y orgánico sintético (Gray, 1997).

- a) Floculantes minerales: Se identifica la sílice activada como el primer agente de floculación utilizado, el cual requiere una preparación previa debido a su delicadeza y a la posibilidad de gelatinización. Su proceso de preparación implica la neutralización parcial de la alcalinidad del silicato de sodio presente en solución. Un ejemplo de su aplicación se encuentra en el caso de Atarjea durante las décadas de los 70 y 80, donde se utilizó en el tratamiento de agua (He et al., 2022).
- b) Floculantes orgánicos naturales: Se trata de polímeros de origen natural obtenidos de fuentes animales o vegetales (Abdullah et al., 2019).
Un ejemplo son los alginatos, cuya estructura polimérica incluye:
 - Los ácidos manuránicos
 - Los ácidos glucónicos
- c) Floculantes orgánicos de síntesis: Son los más ampliamente empleados y se refieren a macromoléculas que forman una cadena extensa, originadas mediante la unión de monómeros sintéticos de elevado peso

molecular, que oscila entre 106 y 107 gramos por molécula. Estos polímeros se agrupan según la carga iónica de sus componentes:

- Polímeros aniónicos (comúnmente copolímeros de acrilamida y ácido acrílico).
- Polímeros neutros o no iónicos (poliacrilamidas).
- Polímeros catiónicos (copolímero de acrilamidas junto con un monómero catiónico).

2.5. Agitación

La agitación se refiere al movimiento circular de un fluido dentro de un recipiente, que mayormente adopta una forma circular y produce corrientes tipo Foucault. El propósito de la agitación puede ser incrementar la transferencia de calor en el fluido o fomentar la transferencia de materia, es decir, la mezcla (Abdullah et al., 2019). En contraste con la mezcla, la agitación busca lograr una distribución uniforme en el espacio de dos o más fases que originalmente estaban separadas. En este contexto, una de las fases debe ser líquida, mientras que la otra puede ser variable. La mezcla desempeña un rol crucial en numerosos procesos industriales. Implica el movimiento inducido de un material con propiedades físicas conocidas, en su mayoría en un patrón circular dentro de un recipiente (Evangelou, 1998). Por lo general, los recipientes para la mezcla son cilíndricos y pueden tener una parte superior cerrada o abierta. Para evitar zonas de baja velocidad, se utiliza un fondo de forma casi redonda para eliminar las esquinas. Para mejorar la eficiencia de la mezcla, se colocan deflectores en las paredes del recipiente para prevenir que el fluido gire como un objeto rígido y reducir la formación de vórtices o turbulencias. El impulsor o paleta suele estar conectado a

un eje vertical convencional. La posición y la inclinación de este eje pueden ajustarse para lograr una mayor eficacia. El esquema de un agitador típico se ilustra en la Figura 2.14 (Mataix, 1999).

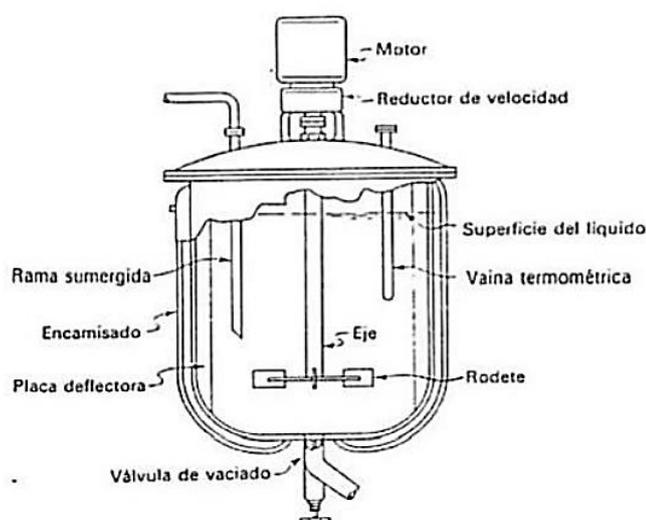


Figura 2. 14

Esquema general de un agitador

Fuente: (Avila, 2022).

2.5.1. Diseño de un Sistema de Agitación

El diseño del agitador y la elección de la mezcladora están estrechamente vinculados con los objetivos de agitación. Diferentes procesos de agitación requieren el uso de distintos equipos de mezcla. Al diseñar y seleccionar la máquina para agitar la mezcla, es esencial primero determinar el tipo de paleta para mezclar, la potencia del motor y la velocidad de agitación según los propósitos y requisitos de mezclado. Luego, se procede a seleccionar el reductor de velocidad, el marco, el eje de mezclado y el eje de sellado (Mataix, 1999).

2.6. Sedimentación

La sedimentación se refiere a la eliminación de partículas en suspensión en un líquido mediante la fuerza de gravedad, siempre que estas partículas tengan una densidad mayor que la del líquido. No todas las partículas en suspensión se sedimentan en un intervalo de tiempo dado, y aquellas que lo hacen se denominan "sólidos sedimentables" (Abdullah et al., 2019).

La sedimentación es un fenómeno físico, relacionado únicamente con las propiedades de caída de las partículas en el agua. Se considera sedimentación simple cuando partículas individuales o grupos de partículas en suspensión en un líquido se depositan mientras mantienen su forma. Este proceso se observa en unidades de sedimentación como desarenadores, donde se busca reducir la cantidad de partículas de cierto tamaño (0.015 a 0.020 mm de diámetro) presentes en el agua (Borja, 2019).

En el tratamiento de aguas, la sedimentación se emplea después de llevar a cabo los procesos de coagulación y floculación (Abdullah et al., 2019).

2.6.1. Formas de Sedimentación

Existen dos tipos distintos de sedimentación en función de las partículas que se desean eliminar del agua: la sedimentación de partículas individuales, también conocida como sedimentación simple, y la sedimentación de partículas aglomeradas o sedimentación inducida (Abdullah et al., 2019).

a) Sedimentación Simple

Este proceso implica que las partículas individuales o grupos de partículas suspendidas en un líquido se depositen sin perder su forma original. Esta

situación se observa en unidades de sedimentación como los desarenadores (Kefeni et al., 2017).

- Desarenación: Se utiliza para eliminar partículas de mayor tamaño en suspensión, con diámetros en el rango de 0.20 micras.
- Presedimentación: Se emplea para reducir la cantidad de sólidos en suspensión, actuando como preparación previa a la coagulación.
- Sedimentación Simple: Se utiliza para reducir la cantidad de material en suspensión como etapa previa a la filtración lenta.

b) Sedimentación Inducida

Este tipo de sedimentación tiene lugar en unidades denominadas decantadores, ubicadas en una planta de tratamiento. En estos decantadores, el agua previamente tratada mediante coagulación y floculación permite que las partículas coloidales y suspendidas se unan formando partículas de mayor tamaño capaces de sedimentar en el líquido. Este proceso es conocido como sedimentación floculenta, sedimentación inducida o decantación (Young, 1997).

- Decantación: Ocurre después de la coagulación y floculación, y se utiliza para remover material coloidal o en suspensión, preparando el agua para la filtración rápida.

2.6.2. Clasificación de los Sedimentadores

Las unidades de sedimentación pueden ser categorizadas según el método de proceso que emplean.

Tabla 2. 1 *Clasificación de sedimentadores*

Tipo de partículas		Tipos de sedimentadores
Partículas discretas (sedimentación)		Desarenadores Sedimentadores simples Flujo horizontal (rectangulares, cuadrados, circulares)
Partículas floculentas (decantación)	Estáticos	Flujo helicoidal Dinámicos (manto de lodos) Laminares (Flóculos pesados)

Fuente: (Borja, 2019).

2.6.3. *Variables que Afectan el Proceso de Sedimentación*

Entre las principales que afectan al proceso de sedimentación tenemos:

- Naturaleza del Agua Cruda
- Condiciones Hidráulicas
- Factores Externos
- Condiciones

2.7. Marco Legal

Esta sección describe el marco normativo legal e institucional aplicable a los Límites Máximos Permisibles para la descarga de efluentes líquidos de actividades minero-metalúrgicas. A continuación, se presenta la lista de la normativa ambiental aplicable.

2.7.1. *Decreto Supremo N° 010-2010-MINAM*

Aprueban Límites Máximos Permisibles para la descarga de efluentes líquidos de Actividades Minero – Metalúrgicas.

a. Artículo 2º: Ámbito de aplicación

El presente Decreto Supremo es aplicable a todas las actividades minero-metalúrgicas que se desarrollen dentro del territorio nacional.

b. Artículo 4º: Cumplimiento de los LMP y plazo de adecuación

4.1 El cumplimiento de los LMP que se aprueban por el presente dispositivo es de exigencia inmediata para las actividades minero-metalúrgicas en el territorio nacional cuyos estudios ambientales sean presentados con posterioridad a la fecha de la vigencia del presente Decreto Supremo.

c. Artículo 7º: Fiscalización y Sanción

La Fiscalización y sanción por el incumplimiento de los LMP aprobados en el presente Decreto Supremo, así como de la ejecución del Plan de Implementación para el cumplimiento de los LMP está a cargo del Ente Fiscalizador, quien en el desarrollo de sus funciones recurrirá, entre otros, a la base de datos de monitoreo ambiental administrativa por la Dirección General de Asuntos Ambientales Mineros del Ministerio de Energía y Minas.

Tabla 2.2 *Límites Máximos Permisibles para la Descarga de Efluentes Líquidos de Actividad Minera – Metalúrgicos*

Parámetro	Unidad	Límite en cualquier momento	Límite para el promedio anual
pH		6-9	6-9
Sólidos totales en suspensión	mg/L	50,0	25,0
Aceites y grasas	mg/L	20,0	16,0
Cianuro total	mg/L	1,0	0,8
Arsénico total	mg/L	0,1	0,08
Cadmio total	mg/L	0,05	0,04
Cromo hexavalente (*)	mg/L	0,1	0,08
Cobre total	mg/L	0,5	0,4
Hierro (disuelto)	mg/L	2,0	1,6
Plomo total	mg/L	0,2	0,16
Zinc total	mg/L	1,5	1,2

Fuente: Recuperado del Decreto Supremo N°10 010-2010-MINAM, (*) en nuestra no filtrada.

2.7.2. *Decreto Supremo N° 004-2017-MINAM*

Aprueban Estándares de Calidad Ambiental (ECA) para agua y establecen Disposiciones Complementarias.

a. **Artículo 5°: Los Estándares de Calidad Ambiental para agua como referente obligatorio**

5.1 Los parámetros de los ECA para agua que se aplican como referente obligatorio en el diseño y aplicación de los instrumentos de gestión ambiental, se determinan considerando las siguientes variables, según corresponda:

- Los parámetros asociados a los contaminantes que caracterizan al efluente del proyecto o la actividad productiva, extractiva o de servicios.

- El efecto de otras descargas en la zona, tomando en consideración los impactos ambientales acumulativos y sinérgicos que se presenten aguas arriba y aguas abajo de la descarga del efluente, y que influyan en el estado actual de la calidad ambiental de los cuerpos naturales de agua donde se realiza la actividad.

b. Artículo 7º: Verificación de los Estándares de Calidad Ambiental para Agua fuera de la zona de mezcla

7.1 En cuerpos naturales de agua donde se vierten aguas tratadas, la Autoridad Nacional del Agua verifica el cumplimiento de los ECA para Agua fuera de la zona de mezcla, entendida esta zona como aquella que contiene el volumen de agua en el cuerpo receptor donde se logra la dilución del vertimiento por procesos hidrodinámicos y dispersión, sin considerar otros factores como el decaimiento bacteriano, sedimentación, asimilación en materia orgánica y precipitación química.

CAPÍTULO III

METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN

3.1. Tipo y Diseño de Investigación

La investigación es de tipo aplicada, ya que busca resolver problemas específicos en el contexto de la industria minera, particularmente en el tratamiento de agua de mina con alto contenido metálico. Este tipo de investigación permite obtener resultados que contribuyan directamente a la optimización de una planta de tratamiento de agua de mina, cuantificando parámetros clave para cumplir con los límites máximos permisibles del Decreto Supremo DS-010-2010-MINAM.

El diseño de la investigación es experimental. En este contexto, se realizarán pruebas de laboratorio (Test de Jarras) en procesos específicos de neutralización, oxidación y sedimentación de muestras de agua de mina. Estas pruebas permitirán determinar la dosificación óptima de reactivos y el diseño adecuado de los componentes de la planta de tratamiento, ajustado a un caudal máximo de 30 l/s y con un pH de entre 3 y 4. En épocas secas, el caudal oscila entre 9 y 15 l/s, y en épocas húmedas, entre 25 l/s.

3.1.1. Unidad de Análisis

La unidad de análisis son las muestras de agua de mina provenientes de tres bocaminas polimetálicas: Hércules (E 219600 N 8919730), Coturcan (E 220920 N 8920620), y Caridad (E 222070 N 8920783), ubicadas en la provincia de Aija, Ancash. La caracterización inicial de cada muestra incluye un análisis de contenido metálico para determinar la dosificación óptima de reactivos, el pH adecuado, y las configuraciones específicas que asegurarán el cumplimiento de los límites máximos permisibles en el cuerpo receptor (quebrada Hércules, E 219079 N 8919196).

3.1.2. Área de estudio

El área de estudio está en la provincia de Aija, departamento de Ancash, y abarca tanto las bocaminas mencionadas como los laboratorios de la planta de tratamiento de agua de mina. Los análisis y pruebas se realizarán en el laboratorio químico (para caracterización de muestras) y en el laboratorio de planta de tratamiento (para pruebas de jarra).

3.1.3. Tamaño de Muestra

Se recolectaron aproximadamente 90 litros de agua, divididos en 30 litros por cada bocamina (Hércules, Coturcan y Caridad). Este volumen permite ejecutar los experimentos necesarios para cada fase del tratamiento sin comprometer la representatividad de las muestras.

3.1.4. Selección de Muestra

Las muestras se recolectaron antes del inicio del tratamiento, asegurando así la representación de la composición inicial del agua. Posteriormente, se elaboró una muestra compuesta de 90 litros uniendo las tres muestras individuales para realizar las pruebas de tratamiento en laboratorio.

3.1.5. Técnicas e Instrumentos para Recoger Información

La recopilación de datos incluye las siguientes técnicas y procedimientos:

- Medición de los parámetros de campo de la muestra compuesta de las tres bocaminas, como el potencial de hidrógeno (pH), la conductividad y la turbidez.
- Caracterización química del agua de mina compuesta, antes de iniciar el tratamiento, enfocándose en el contenido metálico.
- Dosificación de reactivos en el tratamiento de neutralización, oxidación y sedimentación.
- Dimensiones de los componentes de la planta de tratamiento (tanque de neutralización y oxidación, poza de sedimentación).
- Flow Sheet preliminar de la planta de tratamiento de agua de mina.

3.1.6. Técnicas de Procedimientos de Datos

La investigación incluyó estudios de prefactibilidad para tratar aguas ácidas de efluentes mineros con un flujo de hasta 30 l/s y pH entre 3 y 4, con altos niveles de sólidos suspendidos y metales (Cd y As). El proceso de optimización de la planta

incluye las fases de oxidación, neutralización, floculación y sedimentación, cada una ajustada a las características fisicoquímicas del agua.

La investigación se desarrolló en tres fases:

- Fase 1: Pruebas de laboratorio en tres etapas: obtención de la pureza adecuada de hidróxido de calcio, selección del floculante óptimo, y determinación de la concentración y dosis óptimas de reactivos. Estas pruebas incluyeron el uso del método de Test de Jarras.
- Fase 2: Cálculo y diseño preliminar de los componentes de la planta de tratamiento en base a los resultados de la Fase 1.
- Fase 3: Elaboración de la memoria descriptiva de los procesos y la operación de la planta, incluyendo un Flow Sheet preliminar y el diseño de los componentes optimizados para la remoción de arsénico y cadmio, asegurando el cumplimiento de la categoría 3 para el cuerpo receptor (quebrada Hércules).

3.2. Desarrollo del Trabajo de la Investigación

El desarrollo de la presente tesis se realiza de la siguiente manera: Fase 01. Pruebas a nivel laboratorio dividido en 03 etapas, Fase 02. Cálculo y diseño a nivel preliminar y Fase 03. Elaboración de la memoria descriptiva de los procesos.

3.2.1. Pruebas a Nivel Laboratorio (Fase 01)

Se tomaron 90 L de agua ácida de un efluente minero, proveniente de las 03 bocaminas Hércules, Coturcan y Caridad, ubicadas en la provincia de Aija, departamento de Ancash.

La muestra fue llevada al Laboratorio Químico Tecnomin Data ubicada en la Unidad Minera de la provincia de Aija, donde se analizaron sus parámetros físicos y químicos (ver tabla 3.1).

Tabla 3. 1 *Caracterización fisicoquímica del agua ácida proveniente de un efluente minero*

Parámetros	Unidad	Agua proveniente de un efluente minero	D.S. N° 010-2010-MINAM
pH	-	3.2	6-9
Turbidez	NTU	475	-
Arsénico Total	mg/L	13,621	0,1
Cadmio Total	mg/L	1,357	0,05
Cobre Total	mg/L	3,695	0,5
Hierro Disuelto	mg/L	9,1083	2
Hierro Total	mg/L	249,238	----
Plomo Total	mg/L	4,239	0,2
Zinc Total	mg/L	495,025	1,5

Fuente: Laboratorio químico Tecnomin Data.

Tal como se puede apreciar en la tabla 05, existe en la muestra de agua ácida una alta concentración de Fe, Zn, As, Cd; estos exceden los LMP establecidos en la normatividad vigente (D.S. N° 010-2010-MINAM), por lo cual se debe realizar el tratamiento antes de verter al medio ambiente (cuerpo receptor Quebrada Hércules). Para este propósito, se ha llevado a cabo una serie de pruebas para disminuir la concentración metálica contenida en el afluente minero, mediante el adecuado reactivo y dosis optima, objetivo del presente trabajo de tesis.

En una primera y segunda etapa, se realizaron las pruebas de laboratorio en vasos precipitados y/o probetas de 1000 y/o 500 ml con la finalidad de obtener la

cantidad necesaria de cal y floculante; en los ensayos se simulaban los procesos de neutralización, oxidación, floculación y sedimentación, hasta verificar los resultados óptimos.

A su vez, en la tercera etapa, con el tipo de floculante e hidróxido de calcio obtenido en la primera y segunda etapa, mediante el método de pruebas de jarras, se determinó la concentración y dosis óptima de la cal y floculante, así como también los parámetros de floculación (tiempo y velocidad de agitación) y sedimentación (velocidad).

3.2.1.1. Determinación del Hidróxido de Calcio Adecuado (Primera Etapa)

El objetivo de estas pruebas es encontrar la pureza adecuada del hidróxido de calcio (cal), la pureza actual es 50%, esto mejorará la eficiencia de la planta de tratamiento y asimismo disminuye el volumen de lodo generado.

a. Procedimiento

Las pruebas se realizaron en el laboratorio de la planta de tratamiento de aguas de mina en vasos de precipitados de 500 ml. Asimismo, se eligió 5 purezas de hidróxido de calcio 50%, 55% 60%, 65% y 70%

Para la obtención de la pureza adecuada se procedió a efectuar las operaciones que se detallan en la figura 3.1. Estas operaciones se realizaron con cada una de las purezas mencionados anteriormente siguiendo el mismo procedimiento.

Condiciones de operación: Concentración de la lechada de cal (CaOH_2) al 5% y floculante al 0.024% (2.5 ml por 500 ml de agua de mina), estos datos se tomaron de referencia de la actual planta de tratamiento de aguas.

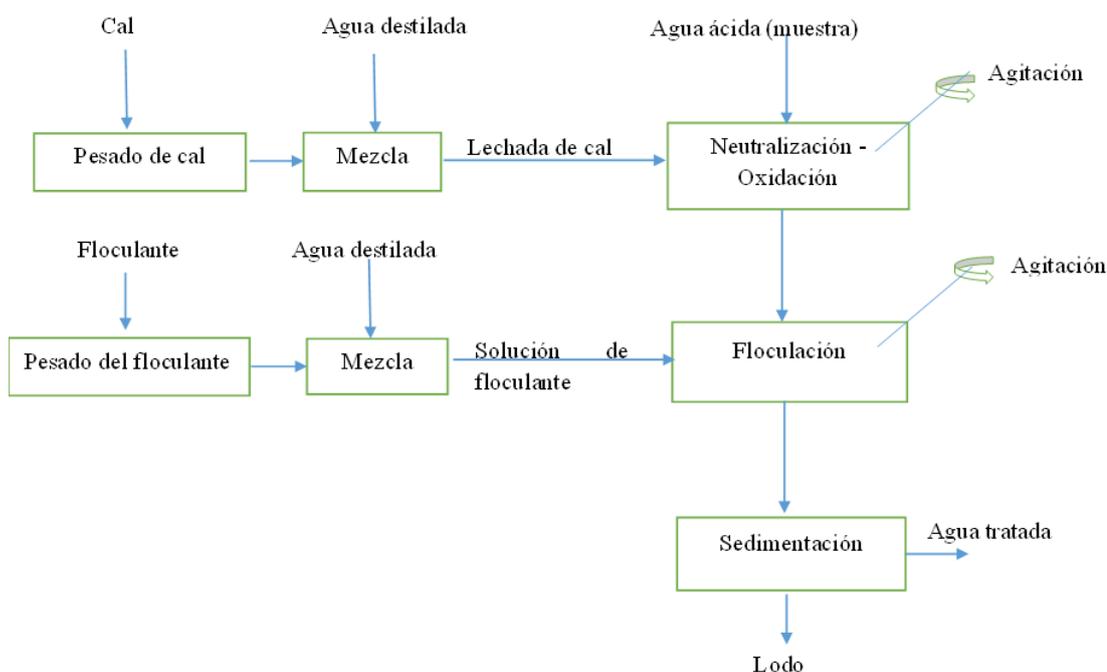


Figura 3. 1

Esquema general del proceso

Fuente: Diagrama elaborado en base al procedimiento planteado.

i) Preparación de la mezcla

- Floculante. Se prepara una solución de floculante al 0,024%. Para este propósito, se pesa 0.12 mg y se diluye en 500 ml de agua destilada con agitación manual, hasta disolver completamente el floculante y obtener una solución transparente

- Cal. Se prepara una solución de lechada de cal al 5%. Para este caso, se pesa 5 g (CaOH_2 al $50\% \pm 5\%$) y se diluye en 100 ml de agua destilada con agitación manual, hasta disolver completamente la cal. De la misma manera se realiza el procedimiento para las demás purezas de cal.

ii) Neutralización y oxidación

- Se coloca 500 ml de muestra de agua ácida en un vaso precipitado del mismo volumen, luego se determina el pH y la turbidez
- Luego se inicia la homogenización de la muestra y se vierte lechada de cal al 5% mediante agitación manual. Esta operación se repitió hasta alcanzar un valor de pH igual a 9, debido que se necesita oxidar los metales por ejemplo Fe^{2+} a Fe^{3+} generando la formación de hidróxido de hierro III (precipitado), la velocidad de oxidación del ion férrico en el rango de pH mayor igual 8 es rápido; pero se observa que en pH igual a 9 el hidróxido de hierro es más insoluble.

iii) Floculación y sedimentación

- Floculación: se agrega 2.5 ml de floculante al 0,025% a la muestra neutralizada de pH igual a 9, a una agitación rápida durante un minuto; luego se disminuye la velocidad de agitación durante 5 min, con la finalidad que se aglutinen los sólidos en suspensión presentes en el agua neutralizada, facilitando de esta forma su sedimentación

- Sedimentación: se deja reposar 20 min la mezcla formada en la operación anterior para que sedimenten los flocs formados y obtener una muestra tratada con baja turbidez y lodo compacto.

b. Resultados

En la tabla 3.2 y 3.3 se indican los resultados de los análisis químicos de la muestra tratada y el % en peso de metales en el lodo generado, resultados de las pruebas de laboratorio en los procesos de neutralización, oxidación y sedimentación.

Tabla 3. 2 Resultados obtenidos de análisis químico de las muestras tratadas a diferentes purezas de hidróxido de calcio

DS-010-2010-MINAM		Dosis lechada de cal (ml)	Turbiedad (NTU)	Parámetro Físico (pH)	Metales totales				
					Cu (ppm)	Pb (ppm)	Zn (ppm)	As (ppm)	Fe(ppm)
				6-9	0.5	0.2	1.5	0.1	2
Afluyente			475	3.2	3.695	4.239	495.025	13.621	249.238
Efluente	Prueba N°01	65	6.54	9.0	0.024	0.111	0.319	0.187	0.138
	Prueba N°02	27.5	5.12	9.0	0.023	0.142	0.301	0.117	0.144
	Prueba N°03	19	7.07	8.67	0.012	0.162	0.450	0.184	0.145
	Prueba N°04	18	4.25	8.30	0.009	0.167	0.300	0.037	0.143
	Prueba N°05	15.5	4.55	8.43	0.020	0.166	0.310	0.059	0.146

Fuente: Laboratorio químico Tecnomin Data.

Tabla 3. 3 Resultados obtenidos de % en peso de metales en el lodo generado en las muestras a diferentes purezas de hidróxido de calcio

Hidróxido de calcio	Cu % Peso	Pb % Peso	Zn % Peso	As % Peso	Fe % Peso
Prueba 01 (50%)	0,479	0,539	64,65	1,755	32,55
Prueba 02 (55%)	0,515	0,535	64,66	1,765	32,55
Prueba 03 (60%)	0,481	0,533	64,66	1,756	32,56
Prueba 04 (65%)	0,481	0,539	64,66	1,775	32,55
Prueba 05 (70%)	0,480	0,532	64,65	1,772	32,55

Fuente: Laboratorio químico Tecnomin Data.

c. Interpretación de Resultados

- En la tabla 3.2 se presentan los análisis químicos de las muestras tratadas a diferentes purezas de hidróxido de calcio, observándose que el producto para la prueba 04 y 05, reportan una calidad de agua que cumple con los LMP establecidos en el D.S.-010-2010 –MINAM; a diferencia de las pruebas 01, 02 y 03 que exceden en el parámetro arsénico.
- Así mismo, el análisis químico de las muestras tratadas para determinar la pureza adecuada de hidróxido de calcio es la prueba 04 correspondiente al 65%, este contiene menor concentración metálica respecto a la prueba 05.
- Finalmente, en la tabla 3.3, se puede apreciar que el porcentaje en peso de Pb y As en el lodo generado en la muestra tratada utilizando la pureza de 65% de hidróxido de calcio, es mayor respecto a los generados utilizando las purezas de 50%, 55%, 60% y 70%.

3.2.1.2. Determinación del Floculante Adecuado (Segunda Etapa)

El objetivo de estas pruebas es encontrar el tipo de floculante adecuado que cumpla con asegurar la mayor remoción de metales y sólidos totales en suspensión.

a. Procedimiento

Las pruebas se realizaron en el Laboratorio de Minería y Medio Ambiente – FIGMM-UNI en vasos de precipitados de 500 ml y/o 100ml. Asimismo, se eligió 4 tipos de floculantes aniónicos, debido a que la carga residual del efluente es positiva y

se necesita juntar las partículas desestabilizadas y formar aglomeraciones de mayor peso y tamaño que sedimenten con mayor eficiencia. A continuación, se presenta los floculantes utilizados: AR-4905, Floculante actual, AR-5240 y AR-1032.

Para la obtención del adecuado floculante se procedió a efectuar las operaciones que se detallan en el diagrama 01. Estas operaciones se realizaron con cada uno de los floculantes mencionados anteriormente siguiendo el mismo procedimiento.

Condiciones de operación:

- Concentración de la lechada de cal (CaOH_2) al 5% y floculante al 0,024% con una dosis de 2.1ppm, luego se variará la dosis a 1ppm y 0.75 ppm siguiendo el mismo procedimiento (prueba de selección de floculante)
- Concentración de la lechada de cal (CaOH_2) al 5% y floculante al 0,024% con una dosis de 2.1ppm, (prueba comparativa de velocidad de floculante)
- Concentración de la lechada de cal (CaOH_2) al 5% y floculante al 0,024% ,0,04%, 0,08% y 0,20% con una dosis de 2.1ppm, (prueba comparativa de velocidad de floculante a diferentes concentraciones)

b. Preparación de la mezcla

Floculante: Se prepara una solución de floculante al 0,024%. con cada tipo de floculante.

Cal: Se prepara una solución de lechada de cal al 5%. Para este caso, se pesa 5 (CaOH₂ al 50% ± 5%) y se diluye en 100 ml de agua destilada con agitación manual, hasta disolver completamente la cal.

i) Neutralización y oxidación

- Se coloca 500 ml de muestra de agua ácida en un vaso precipitado del mismo volumen, luego se determina el pH y la turbidez
- Luego se inicia la homogenización de la muestra y se vierte lechada de cal al 5% mediante agitación manual. Esta operación se repitió hasta alcanzar un valor de pH igual a 8.5, debido que se necesita oxidar el Fe²⁺ a Fe³⁺ generando la formación de hidróxido de hierro III (precipitado).

ii) Floculación y Sedimentación

- Floculación: se agrega 2.1ppm de floculante al 0,024% a la muestra neutralizada de pH igual a 8.5, a una agitación rápida durante un minuto; luego se disminuye la velocidad de agitación durante 5 min, con la finalidad que se aglutinen los sólidos en suspensión presentes en el agua neutralizada, facilitando de esta forma su sedimentación. Este procedimiento se realiza con los 04 tipos de floculantes.
- Sedimentación: se deja reposar 20 min las muestras, mezcla formada en la operación anterior para que sedimenten los flocs formados y obtener así una muestra tratada transparente; es decir, con baja turbiedad y un lodo compacto a simple vista.

c. Resultados

En las tablas 3.4 y 3.5 se presentan las condiciones de operación obtenidas en los ensayos de laboratorio para la determinación del tipo de floculante.

Tabla 3. 4 Resultados de turbidez en las pruebas de selección de floculante (3min)

Parámetro	Condiciones		AR-4905	Floculante actual	AR-5240	AR-1032
	Dosis floculante (ppm)	pH				
Prueba 1	2.1	8.5	1.43	0.83	0.75	0.8
Prueba 2	1	8.5	1.15	1.17	0.85	0.83
Prueba 3	0.75	9	1.11	1.26	1.05	1.1

Fuente: Laboratorio químico Tecnomin Data.

Tabla 3. 5 Resultados de turbidez en las pruebas de comparación de velocidad de floculante (5min)

Parámetro	Condiciones			AR-4905	Floculante actual	AR-5240	AR-1032
	Concentración dilución floculante (%)	Dosis floculante (ppm)	pH				
Valor	0.024	2.1	8.5	1.43	0.83	0.75	0.8

Fuente: Laboratorio químico Tecnomin Data.

Tabla 3. 6 Resultados de nivel de solidos sedimentados en la comparación de velocidad de floculante

Tiempo (s)	Nivel de Sólidos sedimentados (mm)			
	AR-4905	Floculante Actual	AR-5240	AR-1032
Dosis de floculante	2.1 ppm	2.1 ppm	2.1 ppm	2.1 ppm
0	348	348	348	348
60	323	321	317	309
120	282	286	273	267
180	242	250	236	228
240	213	220	207	200
300	196	203	191	184
360	181	189	177	173
420	171	178	165	163
480	160	168	154	152
540	153	160	147	145
600	146	153	140	139

Fuente: Laboratorio químico Tecnomin Data.

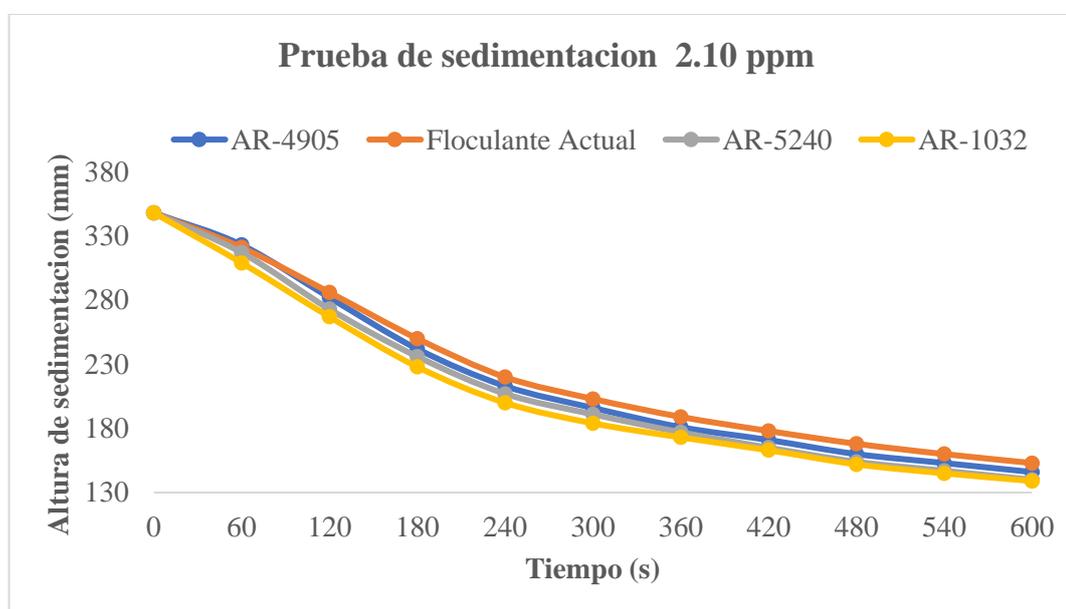


Figura 3. 2

Gráfico de rendimiento de los tipos de floculante en el tiempo

Fuente: Compara los floculantes AR-4905, floculante actual, AR-5240 y AR-1032.

Tabla 3. 7 Resultados de turbidez a los 5min en las pruebas de comparación de velocidad de floculante a diferentes concentraciones de dilución del floculante AR-1032

Parámetro	Concentración de dilución de floculante			0.02%	0.04%	0.08%	0.20%
	Tipo de floculante	Dosis floculante (ppm)	pH	Turbidez (NTU)			
Valor	AR-1032	2.1	9	2.79	2.56	2.31	1.60

Fuente: Laboratorio químico Tecnomin Data.

Tabla 3. 8 Resultados de nivel de solidos sedimentados en la comparación de velocidad de floculante AR-1032 a diferentes concentraciones de preparación

Tiempo (s)	Nivel de Sólidos sedimentados (mm)			
	AR-1032	AR-1032	AR-1032	AR-1032
Concentración de dilución floculante	0.02%	0.04%	0.08%	0.20%
0	348	348	348	348
60	323	321	317	309
120	282	286	273	267
180	242	250	236	228
240	213	220	207	200
300	196	203	191	184
360	181	189	177	173
420	171	178	165	163
480	160	168	154	152
540	153	160	147	145
600	146	153	140	139

Fuente: Laboratorio químico Tecnomin Data.

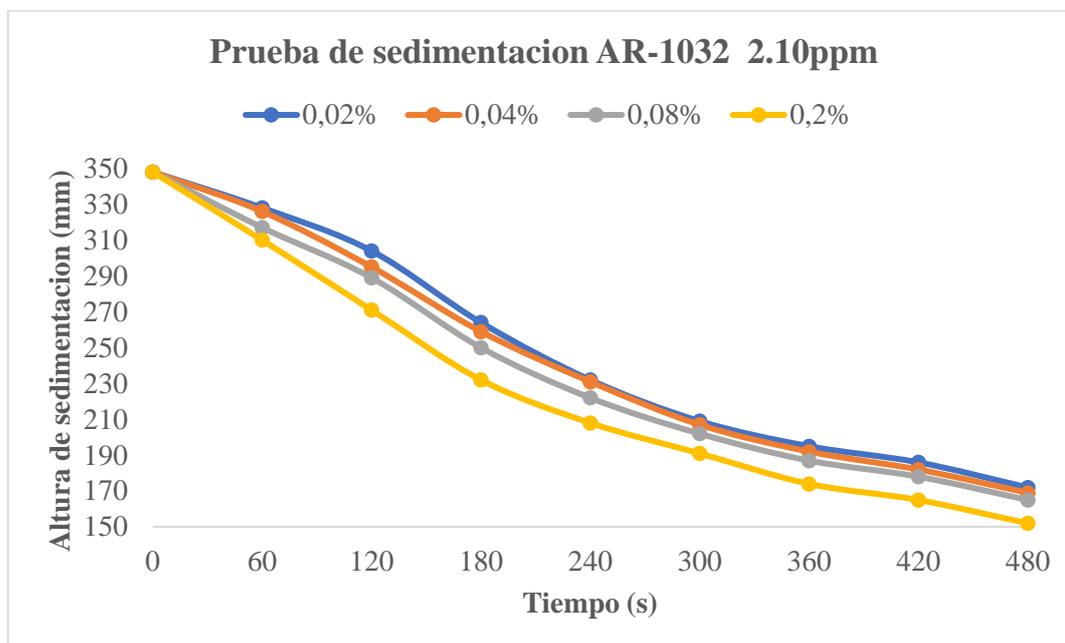


Figura 3. 3

Gráfico de rendimiento del floculante AR-1032 a diferentes concentraciones de preparación

Fuente: Compara los floculantes AR-4905, floculante actual, AR-5240 y AR-1032.

d. Interpretación de Resultados

En la tabla 3.6 se presentan los resultados de turbidez de las muestras tratadas a diferentes floculantes, observándose que el producto del tratamiento en las diversas pruebas utilizando los 4 tipos de floculantes, reportan que con los floculantes AR-5240 y AR-1032 se presentan valores bajos de turbidez respecto a los demás floculantes, lo que indica una buena calidad de agua tratada.

Luego en la tabla 3.6 y figura 3.2 se evidencia el nivel de sólidos sedimentados de cada floculante a una dosis de 2.1ppm y 0,024% de concentración de preparación del floculante en el rango de tiempo de sedimentación desde 0 hasta 600 segundos,

determinando que a 600 segundos el menor nivel de sólidos es 139mm correspondiente al floculante AR-1032, quien cuenta con la mejor velocidad de sedimentación y en cuanto a mejor claridad en el producto del tratamiento los floculantes AR-5240 y AR-1032, obteniéndose valores de 2.08 y 2.18 NTU respectivamente.

Finalmente, en la tabla 3.8 y figura 3.3, se puede apreciar que mientras más concentrado se realice la preparación del floculante se presentara mejor velocidad de sedimentación y buena calidad de agua tratada, cumpliendo para el floculante AR-1032 al 0,2% el nivel de sedimentación es 152mm, menor valor, respecto a las demás concentraciones.

3.2.1.3. Determinación de los Parámetros Óptimos (Tercera Etapa)

En esta tercera etapa se tiene como objetivo determinar los parámetros óptimos para el diseño preliminar de los componentes de la planta de tratamiento de aguas de mina. Para este propósito se va a utilizar el método de Test de jarras, y que consiste en un montaje de seis envases y/o probetas de 1 L cada uno con sus respectivos sistemas de agitación de velocidad regulable. Este aparato contiene seis agitadores para homogenizar lo más posible el contenido de los seis envases en los que se varían las condiciones de operación; luego se analizan los resultados en cada caso.

Parámetros para determinar en las pruebas de jarras:

- pH óptimo
- Concentración óptima de lechada de cal
- Concentración óptima de la solución del floculante
- Dosis óptima de floculante

- Parámetros de diseño en la floculación
- Parámetros de diseño en la sedimentación.

3.2.1.3.1. *Determinación del pH Óptimo*

El objetivo de determinar el pH óptimo es hallar a qué valor se consigue la mayor remoción de metales (Fe^{2+} , Zn^{2+} , Cd^{2+} y As^{3+}) y una baja turbiedad en la muestra tratada; estos resultados se logran cuando el metal se oxida y convierte en hidróxido el cual es solución insoluble.

a. Procedimiento

La determinación del pH óptimo se llevó a cabo en el laboratorio de la planta de tratamiento de aguas y las condiciones de las pruebas de jarras para obtener el pH óptimo son las mostradas en la tabla 3.9.

Tabla 3. 9 Resultados de nivel de solidos sedimentados en la comparación de velocidad de floculante AR-1032 a diferentes concentraciones de preparación

Condición		Cantidad
	Turbiedad	475 NTU
	pH	3,2
	Volumen	1,00 L
(*) Calidad de la muestra	Temperatura	25,00 °C
	As Total	13,621 ppm
	Cd Total	1,357 ppm
	Fe Total	249,238 ppm
(***)	Concentración de la lechada de cal (CaOH ₂)	5,00%
(***)	Concentración del floculante	0,024%
(***)	Dosis del floculante AR-1032	5 ml
(**) Mezcla rápida	Velocidad de agitación	100,00 RPM
	Tiempo de agitación	5,00 min
(**) Floculación (mezcla lenta)	Velocidad de agitación	40,00 RPM
	Tiempo de agitación	15,00 min
(**) Tiempo de sedimentación		10,00 min

Fuente: (*) Laboratorio de la planta de tratamiento de aguas (**) Manual de manejo del equipo Prueba de Jarras del Laboratorio de Minería y Medio Ambiente de la FIGMM –UNI. (***) Parámetros de Operación de la actual Planta de tratamiento de aguas.

Descripción del procedimiento:

- Se realizó con el equipo de pruebas de jarras mediante un ensayo conformado por seis envases de 1 L cada uno.
- Se colocó un litro de muestra en cada uno de los envases y a la vez se midió su pH inicial.
- Se programó el equipo a una velocidad de 100 r.p.m. y un tiempo de agitación de 10 min.

- Una vez programada el equipo, se inició la homogenización de la muestra vertiendo la lechada de cal al 5% en cada envase hasta llegar a los diferentes pH deseados de 7,5 a 9.
- Luego manteniendo la agitación a 100 r.p.m. durante cinco minutos (mezcla rápida) se le agregó a cada envase 5,0 ml de solución de floculante AR-1032 al 0,024 % mediante una pipeta (Ver tabla 3.9).
- Una vez realizada la mezcla rápida se disminuyó la velocidad de agitación a 40 r.p.m. durante 15 min, porque la floculación es favorecida por la mezcla lenta que permite juntar poco a poco los flocs.
- Transcurridos los minutos de agitación en el equipo, se procedió a dejar sedimentar las partículas floculadas (flocs) durante un tiempo de 10 min, en los cuales se pudo observar la apariencia y consistencia del floc y su velocidad de sedimentación.
- Luego de los 10 min tiempo de sedimentación, se tomaron los primeros 10 ml de muestra de cada envase, con la finalidad de desechar las partículas en suspensión en la muestra.
- Luego se tomaron 100 ml de muestra de cada envase simultáneamente y se midió la turbiedad inmediatamente, porque el efecto de la luz es un factor que influye negativamente en el valor de su medición.
- Por último, se mandó analizar químicamente las muestras tratadas a los diferentes pH trabajados al laboratorio químico Tecnomin Data.

b. Resultados

En la tabla 3.10 se presentan los resultados de turbiedad residual a los diferentes pH trabajados en las pruebas de jarras, según las condiciones de operación establecidas en la tabla 3.9. Por su parte, en la tabla 3.11 se muestran los resultados de los análisis químicos de las muestras tratadas a los diferentes pH trabajados.

Tabla 3. 10 Resultados de turbiedad residual a los diferentes pH trabajados

pH	Dosis de lechada cal utilizado (ml)	Turbiedad residual (NTU)
7,5	8,1	4,2
8,0	10,3	3,24
8,20	11,4	2,64
8,45	12,9	2,31
8,75	14,8	2,07
9,0	16.5	2,97

Fuente: Ensayos realizados en el laboratorio de la planta de tratamiento de aguas.

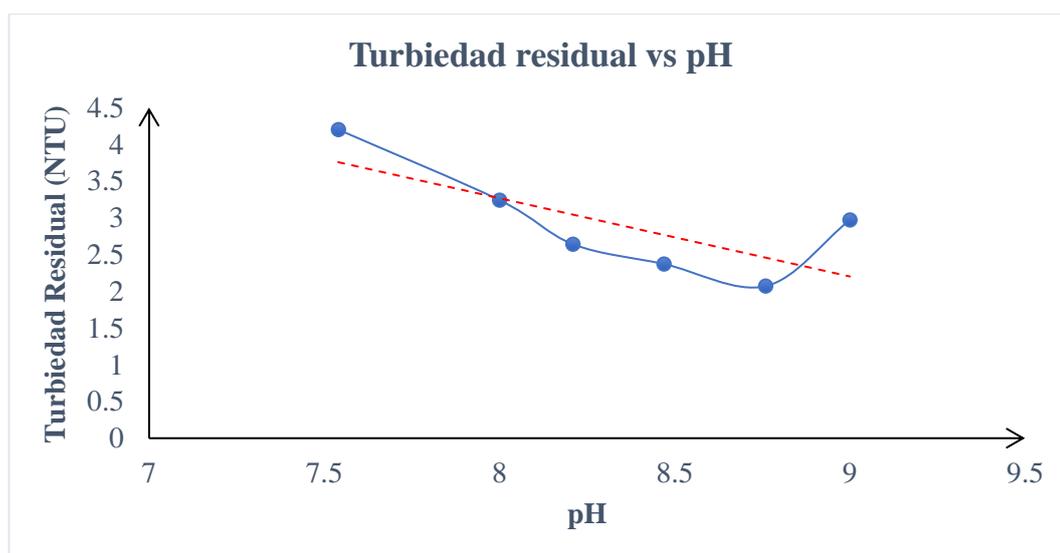


Figura 3. 4

Gráfica de turbiedad residual vs. pH

Fuente: Gráfica y tendencia de la turbiedad residual vs. pH.

Tabla 3. 11 Resultado del análisis químico en las muestras tratadas a los diferentes pH trabajados

DS-010-2010 MINAM						
pH	Cu (mg/L)	Pb (mg/L)	Cd (mg/L)	Zn (mg/L)	Fe disuelto (mg/L)	As (mg/L)
6,0 – 9,0	0,5000	0,200	0,0500	1,5000	2,000	0,10
7,5	0,0234	0,1050	0,3820	0,1418	0,0943	0,0545
8,0	0,01965	0,0980	0,2001	0,0463	0,0333	0,0396
8,2	0,01672	0,0060	0,1032	0,0238	0,0195	0,0375
8,45	0,0145	0,0049	0,0603	0,0214	0,0183	0,0364
8,75	0,0101	0,0029	0,0423	0,2167	0,0173	0,0328
9,0	0,0125	0,0079	0,0276	0,0205	0,0083	0,0314

Fuente: Laboratorio químico Tecnomin Data.

c. Procedimiento

- Los resultados de las pruebas mostrados en la tabla 3.11 y figura 3.4, permiten determinar que se obtiene una menor turbidez (NTU) en la prueba realizada a un pH igual a 8,75, respecto a las demás pruebas a otros pH. Asimismo, de los resultados mostrados en la tabla 3.12, se observa que la muestra tratada a un pH igual a 8,75 tiene bajos niveles de concentración de cadmio y arsénico, cumpliendo con los LMP establecidos en la norma sectorial D.S. N° 010-2010-MINAM
- De los resultados en la medición de turbiedad a las muestras tratadas, el menor valor es igual a 2,07 NTU; este resulta a un pH 8,75 utilizando 14,8 ml de lechada de cal por cada litro de muestra, a una concentración de 5% considerando que el pH inicial de agua de mina sin tratamiento es 3,2.

- Por lo expuesto, se concluye que el pH óptimo sería igual a 8,75, con el cual se asegura la mayor remoción de metales y sólidos totales en suspensión, cumpliendo los estándares de calidad de agua.

3.2.1.3.2. *Determinación de la Concentración Óptima de Lechada de Cal*

El objetivo de determinar la concentración de lechada de cal es hallar a qué valor se consigue remover la mayor cantidad de metales y menor turbiedad en la muestra tratada.

a. Procedimiento

Las pruebas de determinación de la concentración de cal se llevaron a cabo en el laboratorio de la planta de tratamiento de aguas. En la tabla 3.12 se presentan las condiciones para los ensayos.

Tabla 3. 12 *Condiciones de operación para determinar la concentración óptima de lechada de cal*

	Condición	Cantidad
	Turbiedad	475 NTU
	pH	3,2
	Volumen	1,00 L
(*) Calidad de la muestra	Temperatura	25,00 °C
	As Total	13,621 ppm
	Cd Total	1,357 ppm
	Fe Total	249,238 ppm
(****) pH Óptimo		8,75
(***) Concentración del floculante		0,024%
(***) Dosis del floculante AR-1032		5 ml
(**) Mezcla rápida	Velocidad de agitación	100,00 RPM
	Tiempo de agitación	5,00 min
(**) Floculación	Velocidad de agitación	40,00 RPM
(mezcla lenta)	Tiempo de agitación	15,00 min
(**) Tiempo de sedimentación		10,00 min

Fuente: (*) Laboratorio de la planta de tratamiento de aguas (**) Manual de manejo del equipo Prueba de Jarras del Laboratorio de Minería y Medio Ambiente de la FIGMM –UNI. (***) Parámetros de Operación de la actual Planta de tratamiento de aguas.

Descripción del procedimiento:

- Las pruebas se realizan utilizando el equipo de pruebas de jarras, mediante un ensayo conformado por cuatro envases de 1 L cada uno.
- Se colocó un litro de muestra en cada uno de los envases y a la vez se midió su pH inicial. Luego se programó el equipo a una velocidad de 100 r.p.m. y un tiempo de agitación de 10 min.
- Se preparó las soluciones de lechada de cal a diferentes concentraciones desde 2 hasta 8%. Para la concentración de 2% se procedió de la

siguiente manera: se pesó 2 gramos de cal y se diluyó en 100 ml de agua destilada a una agitación manual, hasta disolver completamente la cal; de igual manera se realizó para las demás concentraciones.

- Una vez programada el equipo se inició a la homogenización de la muestra y vertiendo la lechada de cal de 2 a 8% en cada envase hasta llegar a un pH igual a 8,75, valor óptimo previamente determinado (Ver tabla 3.12).
- Manteniendo la agitación a 100 r.p.m. durante cinco min (mezcla rápida) se le agregó a cada envase 5,00 ml de solución de floculante AR-1032 al 0,024% mediante una pipeta. Una vez realizada la mezcla rápida se disminuyó la velocidad de agitación a 40 r.p.m. durante 15 min, porque la floculación es favorecida por la mezcla lenta que permite juntar poco a poco los flocs.
- Transcurridos los minutos de agitación en el equipo, se procedió a dejar sedimentar las partículas floculadas (flocs) durante un tiempo de 10 min, en los cuales se pudo observar la apariencia y consistencia del floc y su velocidad de sedimentación.
- Luego de 10 min, tiempo de sedimentación, se tomaron los primeros 10 ml de muestra de cada envase, con la finalidad de desechar las partículas en suspensión en la muestra. Luego se tomaron 100 ml de muestra de cada envase simultáneamente, y se midió la turbiedad inmediatamente, porque el efecto de la luz es un factor que influye negativamente en el valor de su medición

- Finalmente, se analizaron químicamente las muestras tratadas a las diferentes concentraciones de cal en el Laboratorio químico Tecnomin Data.

b. Resultados

En la tabla 3.13 se indican los resultados de turbiedad residual a las diferentes concentraciones de lechada de cal, según las condiciones de operación establecidas en la tabla 3.12. Asimismo, en la tabla 3.14 se presentan los resultados de los análisis químicos de las muestras tratadas a las diferentes concentraciones de lechada de cal.

Tabla 3. 13 *Resultados de turbiedad residual a las diferentes concentraciones de cal en la lechada*

Concentración de cal (%)	Dosis de lechada de cal (ml)	Turbiedad residual (NTU)
2	28,1	4,23
4	15,8	3,58
6	10,2	1,11
8	6,30	4,84

Fuente: Ensayos realizados en el Laboratorio químico Tecnomin Data.

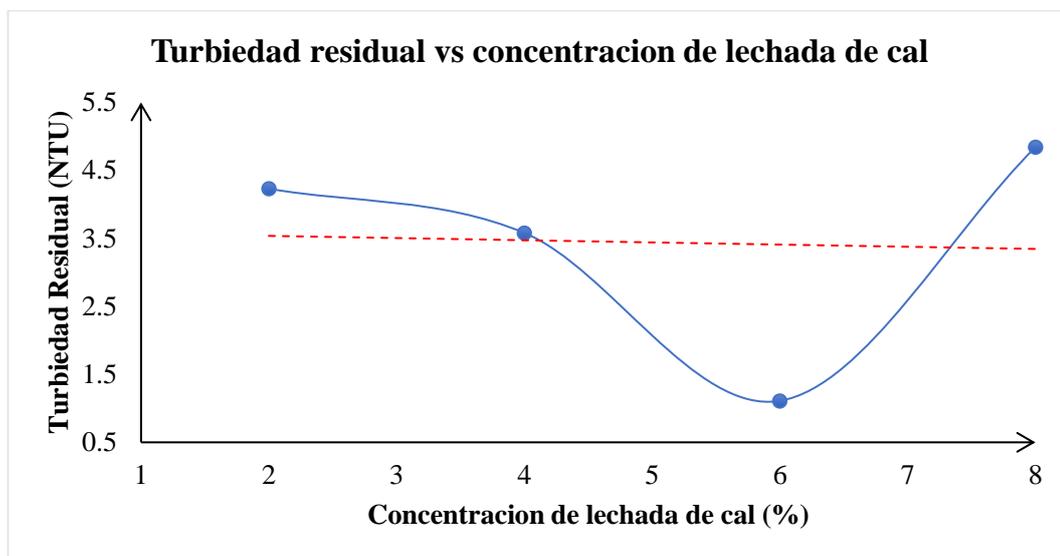


Figura 3. 5

Gráfica de turbiedad residual vs. concentración de lechada de cal

Fuente: Curva y tendencia de turbiedad residual vs. concentración de lechada de cal.

Tabla 3. 14 *Resultado del análisis químico en las muestras tratadas a las diferentes concentraciones de lechada de cal*

Concentración de lechada de cal (%)	Cu (mg/L)	Pb (mg/L)	Zn (mg/L)	Fe (mg/L)	As (mg/L)
2	0.024	0.116	0.764	0.987	1.001
4	0.021	0.127	0.947	0.727	0.059
6	0.02	0.124	0.525	0.576	0.037
8	0.033	0.092	0.974	0.645	0.184

Fuente: Ensayos realizados en el Laboratorio químico Tecnomin Data.

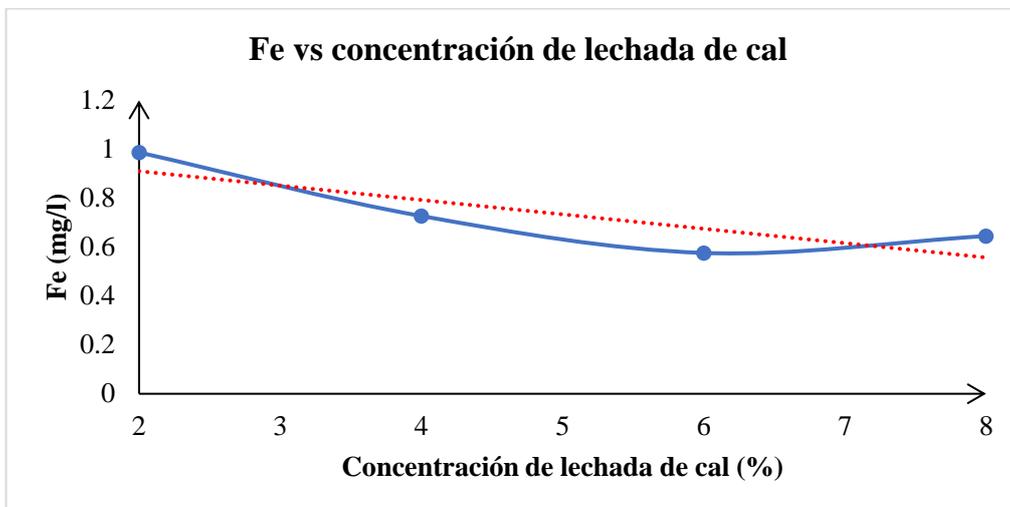


Figura 3. 6

Gráfica de Fe disuelto (mg/l) vs. concentración de cal (%)

Fuente: Curva y tendencia de Fe disuelto vs. concentración de cal.

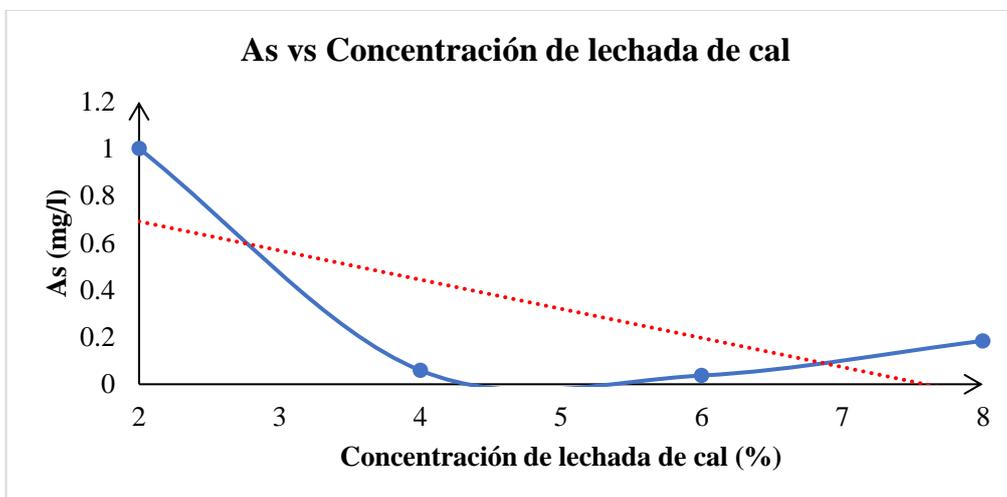


Figura 3. 7

Gráfica de As total (mg/l) vs. concentración de cal (%)

Fuente: Curva y tendencia de As total vs. concentración de cal.

c. Interpretación de los Resultados

Los resultados mostrados en la tabla 3.13, indican que la prueba con una concentración de cal igual de 6% genera la menor turbiedad respecto a las demás muestras analizadas, para mayor apreciación (ver la figura 3.5). Asimismo, los resultados mostrados en las tablas 3.13 y 3.14, para una concentración de cal de 6%, indica valor menor de turbiedad (1,11 NTU) y niveles de concentración bajo en hierro y arsénico respecto a las demás muestras.

Por otro lado, los resultados de los análisis químicos (ver tabla 3.14 y figura 3.6 y 3.7) en todas las muestras reportan niveles de concentraciones de metales dentro de los LMP (D.S.-010-2010 –MINAM), a excepción las muestras de preparación de lechada de cal al 2%. y 8% ya que exceden en el parámetro As.

Por lo expuesto, se concluye que la concentración de cal óptima es igual a 6%, debido a que cumple con el objetivo de asegurar la mayor remoción de metales y una turbiedad igual a 1,11 NTU; estos parámetros cumplen con el estándar de calidad del agua según la normativa ambiental.

3.2.1.3.3. *Determinación de la Concentración Óptima de la Solución de Floculante*

El objetivo de determinar la concentración óptima del floculante es hallar a qué valor se consigue remover la mayor cantidad de metales.

a. Procedimiento

Las pruebas para determinar la concentración óptima del floculante se llevaron a cabo en el Laboratorio de la planta de tratamiento de aguas, utilizando el Test de jarras. Las condiciones de operación para los ensayos realizados son las siguientes:

Tabla 3. 15 *Condiciones de operación para determinar la concentración óptima del floculante*

	Condición	Cantidad
	Turbiedad	475 NTU
	pH	3,2
	Volumen	1,00 L
(*) Calidad de la muestra	Temperatura	25,00 °C
	As Total	13,621 ppm
	Cd Total	1,357 ppm
	Fe Total	249,238 ppm
(****) pH Óptimo		8,75
(***) Concentración óptima de lechada de cal		6%
(***) Dosis del floculante AR-1032		5 ml
(**) Mezcla rápida	Velocidad de agitación	100,00 RPM
	Tiempo de agitación	5,00 min
(**) Floculación	Velocidad de agitación	40,00 RPM
(mezcla lenta)	Tiempo de agitación	15,00 min
(**) Tiempo de sedimentación		10,00 min

Fuente: (*) Laboratorio de la planta de tratamiento de aguas (**) Manual de manejo del equipo Prueba de Jarras del Laboratorio de Minería y Medio Ambiente de la FIGMM–UNI. (***) Parámetros de Operación de la Actual planta de Tratamiento. (****) Parámetro óptimo obtenido en las pruebas de laboratorio.

Descripción del procedimiento

- Para determinar la concentración del floculante se utilizó el método de Test de Jarras, similar a las pruebas para determinar la concentración de cal en la lechada, conformado por seis envases de 1 L cada uno.
- Para esta prueba se realizó dos ensayos en el equipo de pruebas de jarras, conformado por seis envases de 1 L cada uno. Se colocó un litro de muestra en cada uno de los envases y a la vez se midió el pH inicial y se programó el equipo a una velocidad de 100 r.p.m. y un tiempo de agitación de 10 min.
- Se preparó las soluciones de floculante de concentraciones desde 0,005% hasta 0,2%. Para la concentración de 0,005 se pesó 5 miligramos de floculante AR-1032 y se diluyó en 100 ml de agua destilada a una agitación manual, hasta disolver completamente el floculante; de igual manera se procedió para las demás concentraciones. Asimismo, se preparó la lechada de cal al 6%, valor óptimo previamente determinado (Ver tabla 3.15).
- Una vez programada el equipo se inició la homogenización de la muestra y vertiendo la lechada de cal al 6% hasta llegar a un pH igual a 8,75; es decir, a una dosis de 10,2 ml en cada envase considerando pH inicial de agua de mina sin tratamiento 3,2., estos valores óptimos fueron previamente determinados.
- Luego manteniendo la agitación de 100 r.p.m. durante cinco minutos (mezcla rápida) se le agregó a cada envase 5,0 ml de solución de

floculante AR-1032 con una concentración desde 0,005 hasta 0,05% (primer ensayo de jarras). Una vez realizada la mezcla rápida se disminuyó la velocidad de agitación a 40 r.p.m. durante 15 min, porque la floculación a baja velocidad permite juntar poco a poco los flocs; caso contrario, un mezclado intenso rompe los flocs y raramente se vuelven a formar en su tamaño y fuerza óptima.

- Transcurridos los minutos de agitación en el equipo, se procedió a dejar sedimentar las partículas floculadas (flocs) durante un tiempo de 10 min, en los cuales se pudo observar la apariencia y consistencia del floc y su velocidad de sedimentación.
- Pasados los 10 min de sedimentación, se tomaron los primeros 10 ml de muestra de cada envase, y con la finalidad de desechar las partículas en suspensión en la muestra. Seguidamente, se tomaron 100 ml de muestra de cada envase en simultáneo y se midió la turbiedad inmediatamente, ya que el efecto de la luz es un factor que influye negativamente en el valor de la medición de turbiedad.
- Finalmente, se analizó químicamente las muestras tratadas a las diferentes concentraciones de cal en el Laboratorio de la planta de tratamiento de aguas. Este procedimiento se efectuó para las concentraciones de floculante desde 0,06 hasta 0,2 %. (segundo ensayo de jarras).

b. Resultados

En la tabla 3.16 se presentan los resultados de turbiedad residual a las diferentes concentraciones del floculante, según las condiciones de operación establecidas en la tabla 3.15. Asimismo, en la tabla 3.17 se indican los resultados de los análisis químicos de las muestras tratadas a las diferentes concentraciones del floculante trabajadas.

Tabla 3. 16 *Resultados de turbiedad residual a diferentes concentraciones del floculante*

	Concentración del floculante (%)	Turbiedad residual (UNT)
Primer ensayo	0,005	2.56
	0,01	2,41
	0,02	2,50
	0,03	2,1
	0,04	1,82
	0,05	1,03
Segundo ensayo	0,06	1,12
	0,08	1,31
	0,1	1,4
	0,2	1,76

Fuente: Ensayos realizados en el Laboratorio de planta de tratamiento de aguas.

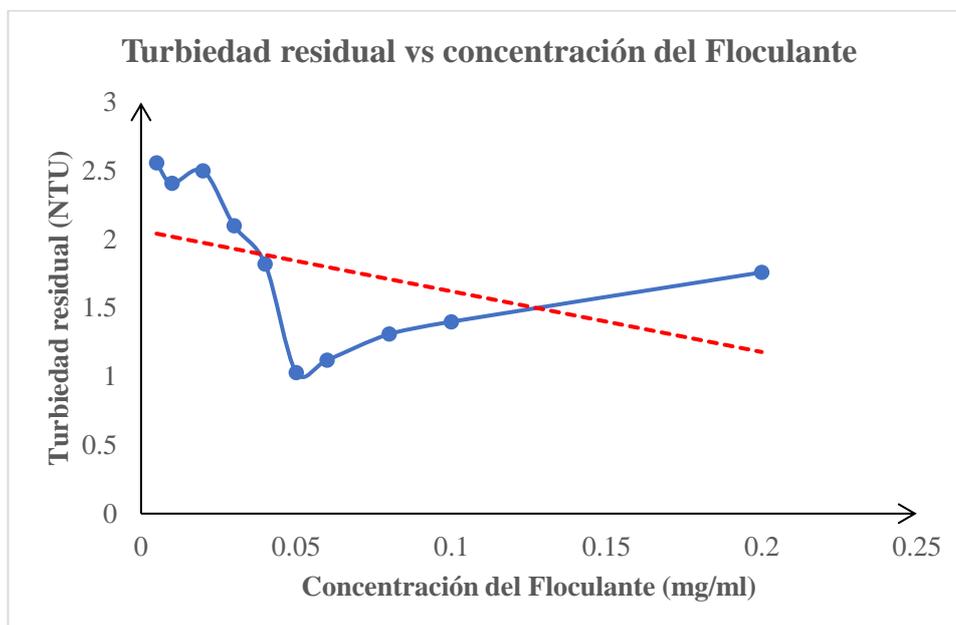


Figura 3. 8

Gráfica de turbiedad residual vs. concentración del floculante

Fuente: Curva y tendencia de turbiedad residual vs. concentración de floculante.

Tabla 3. 17 Resultado del análisis químico en las muestras tratadas a las diferentes concentraciones de floculante

Concentración del Floculante (%)	DS-010-2010 MINAM					
	Cu (mg/l)	Pb (mg/l)	Cd (mg/l)	Zn (mg/l)	Fe (mg/l)	As (mg/l)
	0,50000	0,2000	0,05000	1,500	2,00	0,1000
0.005	0,04160	0,18040	0,06710	1,751	0,90054	0,26000
0.01	0,03150	0,11180	0,05860	1,643	0,80125	0,10670
0.02	0,02470	0,11650	0,04020	1,514	0,80088	0,11400
0.03	0,02180	0,01720	0,04530	1,529	0,60046	0,10520
0.04	0,01190	0,00820	0,05860	1,504	0,50033	0,10300
0.05	0,01030	0,00150	0,01780	1,321	0,30010	0,07240
0.06	0,00990	0,00110	0,02900	1,236	0,30018	0,08100
0.08	0,00810	0,01380	0,02060	1,372	0,30113	0,08450
0.1	0,00120	0,01050	0,02820	1,402	0,35014	0,07550
0.2	0,00130	0,01200	0,02370	1,387	0,32011	0,07360

Fuente: Laboratorio químico Tecnomin Data.

c. Interpretación de Resultados

- El análisis de los resultados mostrados en la tabla 3.16 y figura 3.8, indican que a la concentración de floculante igual a 0,05% se genera la menor turbiedad, respecto a las demás muestras tratadas, mostrando una buena transparencia (claridad) de la muestra.
- De los resultados de análisis químicos en las muestras tratadas presentes en la tabla 3.17, se indica que a la concentración de floculante igual a 0,05% se genera el menor nivel de concentración metálica, respecto a las demás muestras, el cual cumple con los Límites Máximos Permisibles, D.S.-010-2010-MINAM
- Por lo expuesto, se concluye que la concentración de floculante óptima según las pruebas de laboratorio, tomando en cuenta la performance respecto a la remoción de metales, sería de 0,05%, cumpliendo con el objetivo de tener una buena remoción metales y solidos totales en suspensión.

3.2.1.3.4. Determinación de la Dosis Óptima de la Solución de Floculante

El objetivo de determinar la dosis de la solución de floculante es hallar a qué valor se consigue remover los metales contenidos en el agua de mina.

a. Procedimiento

Los ensayos para la determinación de la dosis óptima de la solución de floculante se realizaron en el laboratorio de la planta de tratamiento de aguas. Las condiciones de operación para estos ensayos son los siguientes:

Tabla 3. 18 *Condiciones de operación para determinar la dosis óptima de la solución de floculante*

	Condición	Cantidad
	Turbiedad	475 NTU
	pH	3,2
	Volumen	1,00 L
(*) Calidad de la muestra	Temperatura	25,00 °C
	As Total	13,621 ppm
	Cd Total	1,357 ppm
	Fe Total	249,238 ppm
(****) pH Óptimo		8,75
(****) Concentración óptima de lechada de cal		6%
(****) Concentración óptima de floculante AR-1032		0,05%
(**) Mezcla rápida	Velocidad de agitación	100,00 RPM
	Tiempo de agitación	5,00 min
(**) Floculación (mezcla lenta)	Velocidad de agitación	40,00 RPM
	Tiempo de agitación	15,00 min
(**) Tiempo de sedimentación		10,00 min

Fuente: (*) Laboratorio de la planta de tratamiento de aguas (**) Manual de manejo del equipo Prueba de Jarras del Laboratorio de Minería y Medio Ambiente de la FIGMM–UNI. (****) Parámetro óptimo obtenido en las pruebas de laboratorio.

Descripción del procedimiento

- Las pruebas se realizaron con el equipo de pruebas de jarras, mediante un ensayo conformado por seis envases de 1 L cada uno. Para este propósito, se colocó un litro de muestra en cada uno de los envases y a

la vez se midió el pH inicial. Seguidamente, se programó el equipo a una velocidad de 100 r.p.m. y un tiempo de agitación de 10 min

- Se preparó una solución de floculante de concentración de 0,050%, y para ello se pesó 50 miligramos de floculante AR-1032 y se diluyó en 100 ml de agua destilada a una agitación manual, hasta disolver completamente el floculante; también se preparó la solución de lechada de cal al 6%, valores óptimos previamente determinados (Ver tabla 3.18).
- Una vez programado el equipo se inició la homogenización de la muestra en cada envase y vertiendo lechada de cal al 6% hasta llegar a un pH igual a 8,75; es decir, una dosis de 10,2 ml considerando el pH inicial de agua de mina 3,2.
- Luego manteniendo la agitación a 100 r.p.m. durante cinco minutos (mezcla rápida) se le agregó a cada envase una dosis de floculante desde 1.5 hasta 10 ml de solución de floculante AR-1032 al 0,05% mediante una pipeta según corresponda. Una vez realizada la mezcla rápida se disminuyó la velocidad de agitación a 40 r.p.m. durante 15 minutos.
- Transcurridos los minutos de agitación en el equipo, se procedió a dejar sedimentar las partículas floculadas (flocs) durante un tiempo de 10 minutos, en los cuales se pudo observar la apariencia y consistencia del floc y su velocidad de sedimentación.
- Luego los 10 minutos de sedimentación, se tomaron los primeros 10 ml de muestra de cada envase, con la finalidad de desechar las partículas

en suspensión en la muestra. Luego se tomaron otros 100 ml de muestra de cada envase en forma simultánea y se midió la turbiedad inmediatamente, porque el efecto de la luz es un factor que influye negativamente en el valor de su medición.

- Finalmente, se analizó químicamente las muestras tratadas a las diferentes dosis de solución de floculante en el Laboratorio químico Tecnomin Data.

b. Resultados

En la tabla 3.19 y la figura 3.20 se presentan los resultados de turbiedad residual a las diferentes dosis de floculante, según las condiciones de operación establecidas en la tabla 3.18. Por otro lado, en la tabla 3.20 se presentan los resultados de los análisis químicos de la muestra tratada a las diferentes dosis de solución de floculante.

Tabla 3. 19 *Resultados obtenidos de la turbiedad residual a diferentes dosis de solución de floculante*

Dosis de solución de floculante (ml)	Turbiedad residual (UNT)
1.5	1.6
2	1.35
3.5	1.09
5	1.53
7	1.64
10	2.56

Fuente: Ensayos realizados en el Laboratorio de la planta de tratamiento de aguas.

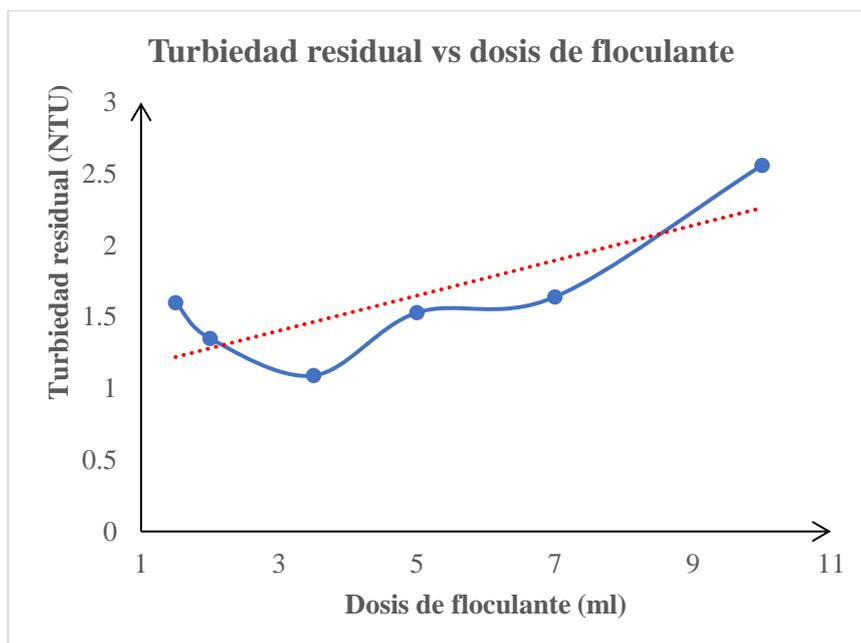


Figura 3. 9

Gráfica de turbiedad residual vs. dosis de solución de floculante

Fuente: Curva y tendencia de turbiedad residual vs. dosis de solución de floculante.

Tabla 3. 20 *Resultado de los análisis químicos de las muestras tratadas (efluentes) a las diferentes dosis de solución de floculante*

Dosis de dilución de floculante (ml)	DS-010-2010 MINAM					
	Cu (mg/l)	Pb (mg/l)	Cd (mg/l)	Zn (mg/l)	Fe (mg/l)	As (mg/l)
	0,50000	0,2000	0,05000	1,500	2,00	0,1000
1.5	0,04060	0,17040	0.0498	1,492	0,80054	0,09206
2	0,03022	0,10180	0.0426	1,403	0,70257	0,08702
3.5	0,01003	0,01250	0.01634	1,232	0,48001	0,05401
5	0,01180	0,01523	0.03532	1,342	0,50046	0,08520
7	0,01267	0,01602	0.03834	1,404	0,60033	0,09300
10	0,01356	0,01850	0.02026	1,484	0,60088	0,09784

Fuente: Laboratorio químico Tecnomin Data.

c. Interpretación de Resultados

- Los resultados mostrados en la tabla 3.19 y figura 3.9 indican que con una dosis de floculante igual a 3,5 ml a una concentración de 0,05%, se genera la menor turbiedad respecto a las demás muestras tratadas. Asimismo, los resultados de los ensayos químicos (tabla 3.20) realizados a diferentes dosis de floculante reportan concentraciones de metales dentro de los LMP establecidos en la normatividad vigente
- Por lo expuesto, se concluye que la dosis óptima de floculante igual a 3,5 ml cumple en remover los metales

3.2.1.3.5. *Determinación de Parámetros de Diseño para la Floculación*

Determinar mediante pruebas de jarras la velocidad y tiempo de floculación.

a. Procedimiento

Los ensayos para determinar la velocidad y tiempo de floculación se realizaron en el Laboratorio de la planta de tratamiento de aguas. Las condiciones de operación para las pruebas de jarras se muestran a continuación.

Tabla 3. 21 *Condiciones de operación para determinar los parámetros de diseño para la floculación*

	Condición	Cantidad
	Turbiedad	475 NTU
	pH	3,2
	Volumen	1,00 L
(*) Calidad de la muestra	Temperatura	25,00 °C
	As Total	13,621 ppm
	Cd Total	1,357 ppm
	Fe Total	249,238 ppm
(****)	pH Óptimo	8,75
(****)	Concentración óptima de lechada de cal	6%
(****)	Concentración óptima de floculante AR-1032	0,05%
(****)	Dosis óptima del floculante AR-1032	3,50 ml
(**) Mezcla rápida	Velocidad de agitación	100,00 RPM
	Tiempo de agitación	5,00 min
(**) Floculación (mezcla lenta)	Velocidad de agitación	40,00 RPM
	Tiempo de agitación	15,00 min
(**) Tiempo de sedimentación		10,00 min

Fuente: (*) Laboratorio de la planta de tratamiento de aguas. (**) Manual de manejo del equipo Prueba de Jarras del Laboratorio de Minería y Medio Ambiente de la FIGMM–UNI.

Descripción del procedimiento

- Estas pruebas se realizaron con el equipo de pruebas de jarras, mediante cuatro ensayos conformado por tres envases de 1 L cada uno. En cada envase se colocó un litro de muestra y se midió el pH inicial; asimismo, se programó el equipo a una velocidad de 100 r.p.m. y un tiempo de agitación de 10 min.
- Se preparó soluciones de lechada de cal a una concentración de 6% y de floculante al 0,05%

- Una vez programado el equipo se inicia a la homogenización de la muestra en cada envase vertiendo lechada de cal al 6% hasta llegar a un pH igual a 8.75; es decir, una dosis de 10,2 ml, valores óptimos previamente determinados (Ver tabla 3.21).
- Luego manteniendo la agitación a 100 r.p.m. durante cinco minutos (mezcla rápida) se le agregó a cada envase una dosis 3,5 ml de solución de floculante AR-1032 al 0,05% mediante una pipeta, valor previamente determinado. Una vez realizada la mezcla rápida se disminuyó la velocidad de agitación desde 20 hasta 60 r.p.m. con un tiempo de agitación de 5, 10 y 15 min por cada envase, siendo el primer ensayo realizado con velocidad de agitación de 20 r.p.m.
- Transcurridos los minutos de agitación en cada envase del equipo según correspondió, se procedió a dejar sedimentar las partículas floculadas (flocs) durante un tiempo de 10 minutos, y en los cuales se pudo observar la apariencia y consistencia del floc y su velocidad de sedimentación. Pasados los 10 minutos de sedimentación, de cada envase del equipo de jarras (según culmine su tiempo de sedimentación) se tomaron los primeros 10 ml de muestra con la finalidad de desechar las partículas en suspensión en la muestra, y luego se tomaron otros 100 ml de muestra de cada envase para medir la turbiedad y analizar químicamente el contenido de metales en el laboratorio químico Tecnomin Data.
- Este mismo procedimiento se siguió para los tres ensayos restantes, variando las velocidades de floculación (mezcla lenta) en 30, 40 y 60

r.p.m., con un tiempo de agitación de 5, 10 y 15 min para cada velocidad mencionada.

b. Resultados

En la tabla 3.22 y la figura 10 se presentan los resultados de turbiedad residual a diferentes velocidades y tiempos de floculación (mezcla lenta), según las condiciones de operación establecidas en la tabla 3.21. Por otra parte, en la tabla 3.23 se indican los resultados de los análisis químicos de la muestra tratada a las diferentes velocidades y tiempos de floculación.

Tabla 3. 22 *Resultados de la turbiedad residual a un tiempo y velocidad de agitación determinado para la etapa de floculación*

RPM	Tiempo (min)	Turbiedad residual (UNT)
20	5	1.38
	10	2.16
	15	4.15
30	5	1.59
	10	9.12
	15	2.68
40	5	5.45
	10	4.83
	15	2.36
60	5	3.56
	10	9.15
	15	8.57

Fuente: Ensayos realizados en el laboratorio de la planta de tratamiento de aguas.

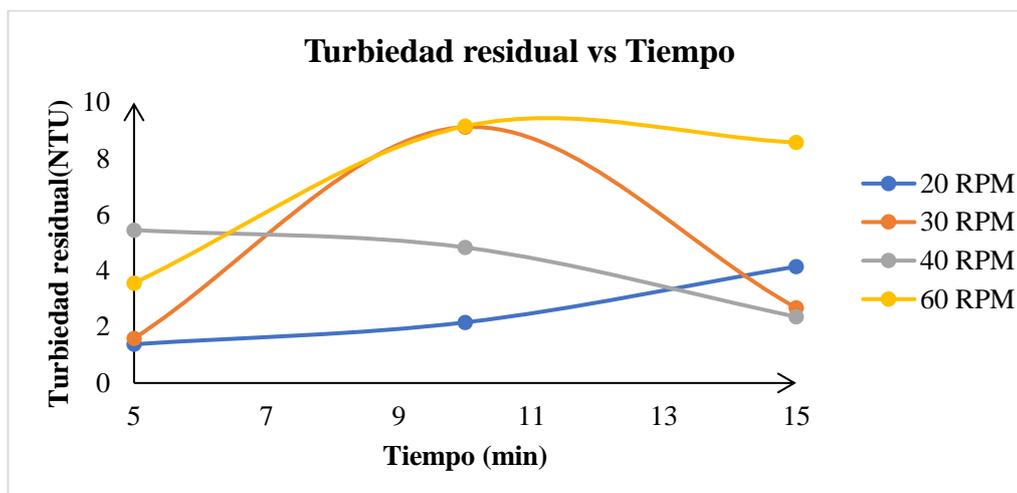


Figura 3. 10

Gráfica de turbiedad residual vs. tiempo

Fuente: Curvas comparativas de los RPM en función de la turbiedad residual y el tiempo.

Tabla 3. 23 *Resultados de análisis químico a las muestras tratadas a determinada velocidad de agitación y tiempo de floculación*

DS-010-2010 MINAM							
Velocidad (RPM)	Tiempo (min)	Cu (mg/L)	Pb (mg/L)	Cd (mg/L)	Zn (mg/L)	Fe disuelto (mg/L)	As (mg/L)
		0.5	0.2	0.05	1.5	2	0.1
20	5	0.0042	0.0511	0.0053	0.0245	0.0198	0.0001
	10	0.0059	0.0361	0.0026	0.0108	0.0134	0.0008
	15	0.0103	0.0392	0.001	0.0764	0.0046	0.0004
30	5	0.0066	0.0095	0.0024	0.0503	0.0124	0.0002
	10	0.0059	0.0631	0.0062	0.0181	0.1201	0.0001
	15	0.0092	0.0245	0.0074	0.0765	0.0165	0.0002
40	5	0.0035	0.00083	0.0106	0.0267	0.0254	0.0005
	10	0.0061	0.0207	0.011	0.0634	0.0102	0.0003
	15	0.0083	0.0293	0.0107	0.0345	0.0123	0.0002
60	5	0.0084	0.0462	0.0087	0.0383	0.0101	0.0007
	10	0.0111	0.0003	0.0119	0.0005	0.0217	0.0001
	15	0.0127	0.0023	0.0107	0.0272	0.0306	0.0001

Fuente: Laboratorio de químico Tecnomin Data.

c. Interpretación de Resultados

- Los resultados mostrados en la tabla 3.22 y figura 3.10, indican que a una velocidad de 20 r.p.m. se obtiene la menor turbiedad en la muestra tratada. Asimismo, los resultados mostrados en la tabla 3.23, reportan que los ensayos químicos realizados a las muestras tratadas a diferentes velocidades y tiempos de agitación, en la etapa de floculación, cumplen con los LMP establecidos en el D.S.-010-2010 –MINAM.
- Los resultados que se presenta en la tabla 3.23, indican que a la velocidad de 20 y 40 r.p.m. se obtiene la mayor remoción de metales, respecto a las demás muestras tratadas y a ambas velocidades se cumplen los LMP, determinando que la velocidad optima es 20 r.p.m. ya que la floculación es mejor cuando la mezcla es más lenta, este permite juntar poco a poco los flocs.
- Finalmente, en la figura 3.10, se observa que para el tiempo de agitación 5 minutos y velocidad de agitación 20 r.p.m., se genera la menor turbiedad 1.38 NTU , siendo estos los parámetros óptimos de floculación.

3.2.1.3.6. Determinación de Parámetro de Diseño para la Sedimentación

Determinar mediante pruebas de jarras la velocidad de sedimentación óptima para el diseño del componente de la planta de tratamiento de aguas.

a. Procedimiento

Las condiciones para los ensayos realizados en el laboratorio de la planta de tratamiento de aguas.

Tabla 3. 24 *Condiciones de operación para determinar los parámetros de diseño para la floculación*

	Condición	Cantidad
	Turbiedad	475 NTU
	pH	3,2
	Volumen	1,00 L
(*) Calidad de la muestra	Temperatura	25,00 °C
	As Total	13,621 ppm
	Cd Total	1,357 ppm
	Fe Total	249,238 ppm
(****) pH Óptimo		8,75
(****) Concentración óptima de lechada de cal		6%
(****) Concentración óptima de floculante AR-1032		0,05%
(****) Dosis óptima del floculante AR-1032		3,50 ml
(**) Mezcla rápida	Velocidad de agitación	100,00 RPM
	Tiempo de agitación	5,00 min
(**) Floculación	Velocidad de agitación	20,00 RPM
(mezcla lenta)	Tiempo de agitación	5,00 min

Fuente: (*) Laboratorio de la planta de tratamiento de aguas (**) Manual de manejo del equipo Prueba de Jarras del Laboratorio de Minería y Medio Ambiente de la FIGMM–UNI.

Descripción del procedimiento:

- Estas pruebas se realizaron con el equipo de pruebas de jarras mediante tres ensayos conformado por cinco envases de 1 L cada uno. En cada envase se colocó un litro de muestra y se mide el pH inicial; luego se

programó el equipo a una velocidad de 100 r.p.m. y un tiempo de agitación de 10 minutos.

- Se preparó soluciones de lechada de cal a una concentración de 6% y de floculante al 0,05%.
- Una vez programado el equipo se inició la homogenización de la muestra en cada envase y vertiendo lechada de cal al 6% hasta llegar a pH igual a 8,75; es decir, una dosis de 10,2 ml, valores óptimos previamente determinados (Ver tabla 3.24).
- Manteniendo la agitación a 100 r.p.m. durante cinco minutos (mezcla rápida) se le agregó a cada envase una dosis de 3,5 ml de solución de floculante AR-1032 al 0,05% mediante una pipeta, valor óptimo previamente determinado. Una vez realizada la mezcla rápida se disminuyó la velocidad de agitación a 20 r.p.m. durante 5 min, valores óptimos obtenidos anteriormente (ver tabla 3.24).
- Transcurridos los minutos de agitación en el equipo, se procedió a sedimentar las partículas floculadas a diferentes tiempos como 0,5; 1,5; 8; 12 y 18 min, según corresponda a cada envase.
- Luego del tiempo de sedimentación, se tomó la muestra a 3,5 cm de profundidad de cada envase y se midió la turbiedad inmediatamente; estos datos ayudan a determinar la turbiedad residual (T_r).
- De la misma manera se realizó el mismo procedimiento para los dos ensayos restantes a diferentes tiempos de sedimentación de 0,5; 1,5; 8; 12 y 18.

- Usando los datos obtenidos se procedió a calcular las velocidades de sedimentación ($V_s = h/t$); luego se graficó los valores de $C_0 = T_f/T_0$ vs V_s obteniéndose la curva de sedimentación. Asimismo, se calculó el porcentaje total de remoción (R_t), la turbiedad removida (T_r) y la turbiedad remanente (T_{re}), de la siguiente manera:

$$R_t = [1 - (C_0 - C_f)] + \left(\frac{a+V_s}{2 \times V_s}\right) \times (C_0 - C_f) \quad \text{(Ec. 10)}$$

$$T_r = R_t \times T_0 \quad \text{(Ec.11)}$$

$$T_{re} = T_0 - T_r \quad \text{(Ec.12)}$$

b. Resultados

En la tabla 3.25 se presentan los resultados de turbiedad residual a diferentes tiempos de sedimentación en los tres ensayos realizados, según las condiciones de operación establecidas en la tabla 3.24. Por otra parte, en la tabla 3.26 y la figura 11 se indica la relación de turbiedad inicial y final ($C_0 = T_f/T_0$) y los valores de velocidad de sedimentación ($V_s = h/t$) para los ensayos realizados. Además, la tabla 3.27 muestra los valores de a y C_f que se obtienen de la curva de sedimentación.

Finalmente, en la tabla 3.28, se presentan valores de porcentaje total de remoción (R_t), la turbiedad removida (T_r) y la turbiedad remanente (T_{re}).

Tabla 3. 25 Resultados de turbiedad final en los ensayos

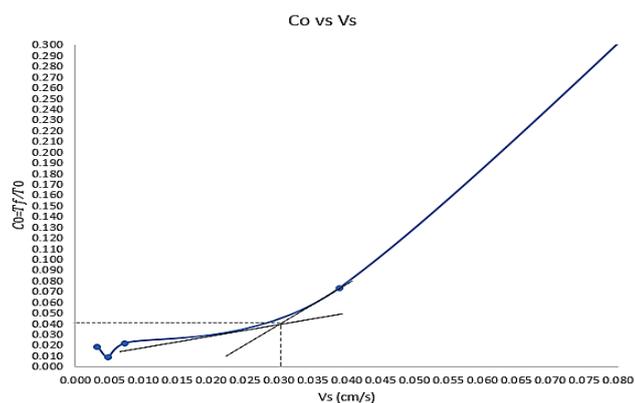
Tiempo (min)	Turbiedad residual (NTU)		
	Ensayo 1	Ensayo 2	Ensayo 3
0.5	69.80	81.10	17.10
1.5	2.62	4.82	16.30
8	0.97	4.80	1.31
12	0.74	1.16	0.95
18	0.79	3.64	1.52

Fuente: Ensayos realizados en el laboratorio de la planta de tratamiento de aguas.

Tabla 3. 26 Resultados de fracción remanente de turbiedad (C_0) y velocidad de sedimentación (V_s)

Tiempo (min)	V_s (cm/s)	T_0	Turbiedad residual (NTU)				C_0
			Ensayo 1	Ensayo 2	Ensayo 3	Promedio	
0.5	0.117	108	69.80	81.10	17.10	56.00	0.519
1.5	0.039	108	2.62	4.82	16.30	7.91	0.073
8	0.007	108	0.97	4.80	1.31	2.36	0.022
12	0.005	108	0.74	1.16	0.95	0.95	0.009
18	0.003	108	0.79	3.64	1.52	1.98	0.018

Fuente: Ensayos realizados en el laboratorio de planta de tratamiento de aguas.

**Figura 3. 11**

Gráfica de fracción remanente de turbiedad vs. Velocidad de sedimentación

Fuente: Curva y tendencia del remanente de turbiedad en función de la velocidad de sedimentación.

Tabla 3. 27 Valores de una constante y la fracción no removida de partículas para el caso en estudio

Variable	Valor
A	0,031
C _f	0,040

Fuente: Ensayos realizados en el laboratorio de planta de tratamiento de aguas.

Tabla 3. 28 Resultados de porcentaje total de remoción (R_t), la turbiedad removida (T_r) y la turbiedad remanente (T_{re})

V _s (cm/s)	C ₀	R _t	T _r	T _{re}
0.117	0.519	0.8243	89.0261	18.974
0.039	0.073	0.9966	107.6355	0.364
0.007	0.022	0.9705	104.8136	3.186
0.005	0.009	0.9161	98.9395	9.060
0.003	0.018	0.9073	97.9924	10.008

Fuente: Ensayos realizados en el laboratorio de planta de tratamiento de aguas.

c. Interpretación de resultados

- La figura 3.11 representa la curva de variación de concentración en función de la velocidad de sedimentación; se observa que la curva no pasa por el origen. Esto implica que siempre se tendrá una fracción de C_f de partículas que no serán removidas por el sedimentador aun cuando se apliquen velocidades muy bajas de sedimentación. y que es lo que representa el valor de a en la curva. Los valores obtenidos son: a igual a 0,031 y C_f igual a 0,04.
- La velocidad de sedimentación se determinará en función de la turbiedad remanente (T_{re}); se elige el menor valor obtenido para nuestro sistema, y por ello sería 0,039 cm/s.

d. Caracterización de las muestras tratadas en las pruebas realizadas

En las tablas 3.29 y 3.30, se indican los parámetros óptimos y la caracterización de la muestra tratada del último ensayo realizado con los valores óptimos.

Tabla 3. 29 Cuadro resumen de los parámetros óptimos y sus condiciones de operación

	Variable	Valor
Condiciones de operación	Volumen de muestra	1 l
	pH inicial	3,2
	Tipo de floculante	AR-1032
	pH	8,75
	Concentración de cal	6,00%
Parámetros óptimos	Concentración de floculante	0,05%
	Dosis de floculante	3,5 ml
	Velocidad de agitación en la floculación	20,00 r.p.m.
	Tiempo de floculación	5,00 min
	Tiempo de sedimentación	12,00 min
	Velocidad de sedimentación	0,039 cm/s

Fuente: Ensayos realizados en el laboratorio de planta de tratamiento de aguas.

Tabla 3. 30 Resultados del análisis químico de la muestra tratada con los parámetros óptimos

D.S.-010-2010 MINAM									
Muestra	pH	TSS (mg/l)	Cu (mg/l)	Pb (mg/l)	Cd (mg/l)	Zn (mg/l)	Fe disuelto (mg/l)	Fe (mg/l)	As (mg/l)
	6 - 9	50	0,5	0,2	0,05	1,5	2	...	0,1
Muestra sin tratar	3,2	398	3,695	4,239	1,357	495,025	9.108	249,238	13,621
Muestra tratada	8.69	4	0,0039	0,00022	0,00217	0,0228	0,000109	0,3204	0,00017

Fuente: Ensayos realizados en el Laboratorio químico Tecnomin Data.

3.2.2. Pruebas a Nivel Preliminar (Fase 02)

En el desarrollo de la fase 02 se da a conocer los criterios de diseño y las dimensiones preliminares de los componentes de la planta de tratamiento de aguas, basados en los resultados de laboratorio (Fase 01), parte experimental y parámetros óptimos. Asimismo, está conformado de la siguiente manera: primer lugar, cálculos previos para la dosificación de la lechada de cal y floculante; asimismo el balance de masa para determinar el lodo generado, segundo lugar, se efectúa los cálculos para el diseño de los componentes tales como sedimentador, tanque reactor, tanques de preparación de reactivos floculante e hidróxido de calcio y sistema de filtrado artificial.

3.2.2.1. Cálculos Previos

Los cálculos previos se realizaron con la finalidad de tener los datos necesarios para el diseño de los componentes de la planta de tratamiento de aguas. Asimismo, se considera el caudal de diseño 30 l/s ya que se tiene una variación del caudal de agua de mina, época seca 9 a 15 l/s y en época húmeda asciende a 25 l/s.

En el Anexo 4 se detallada cada cálculo que se realizó en este capítulo.

3.2.2.1.1. Cálculo de los Parámetros de Cal ($Ca(OH)_2$ al 65% \pm 5%)

Con los resultados obtenidos del laboratorio (ver tabla 3.29), se realizó los cálculos de dosificación, caudal y consumo de lechada de cal para un flujo de 30 l/s de agua de mina, estos mismos servirán para el diseño del tanque de lechada de cal, los resultados se presentan en la tabla 3.31.

Tabla 3. 31 Resultados de los parámetros de la lechada de cal

Parámetro	Valor
Dosis de Ca(OH) ₂	0,918 $\frac{\text{gCa(OH)}_2}{\text{L afluyente}}$
Consumo de Ca(OH) ₂	2379,5 $\frac{\text{kgCa(OH)}_2}{\text{día}}$
Flujo másico de lechada	39658 $\frac{\text{kg de lechada}}{\text{día}}$
Volumen de lechada	38,69 m ³ lechada/día
Caudal de agua utilizada en lechada	37,27 m ³ /día

Fuente: Datos hallados en base a la tabla 3.29.

3.2.2.1.2. Cálculo de los Parámetros para el Floculante

En la tabla 3.32 se presentan los resultados de los parámetros obtenidos para el floculante, el caudal de agua de mina para la solución de floculante es 30 l/s, datos que ayudaran para el diseño del tanque de la solución de floculante.

Tabla 3. 32 Resultados de los parámetros para el floculante AR-1032

Parámetro	Valor
Dosis de floculante	0,002625 $\frac{\text{gFloculante}}{\text{L afluyente}}$
Consumo de floculante	6,804 $\frac{\text{kg}}{\text{día}}$
Flujo másico de solución de floculante	13608,0 $\frac{\text{kg Sol. de floculante}}{\text{día}}$
Volumen de solución de floculante	17,11 $\frac{\text{m}^3 \text{ Sol. de floculante}}{\text{día}}$
Caudal de agua utilizada en la solución de floculante	13,60 $\frac{\text{m}^3}{\text{día}}$

Fuente: Datos hallados en base a la tabla 3.29.

3.2.2.1.3. *Balance de Masa de la Planta de Tratamiento de Aguas*

El desarrollo del balance de masa de la planta de tratamiento de aguas de mina determina el lodo generado, los flujos masicos de entradas y salidas se representa en la siguiente ecuación.

$$\text{Entrada} = \text{Salida} \quad (\text{Ec.13})$$

$$A \text{ (afluente)} + \text{Lechada de cal} + \text{Floculante} = B \text{ (efluente)} + \text{Lodo} + \text{Caliche} \quad (\text{Ec.14})$$

Los cálculos del balance de masas se realizaron para el agua y el sólido presentes en el tratamiento, y se detallan en el Anexo 4.

a. **Cálculo de lodos totales generados**

$$\text{Lodo}_{\text{Seco total}} = 13356.77 \frac{\text{kg lodo seco}}{\text{día}}$$

- Volumen de lodos generados

Para determinar el volumen de lodos generados se efectuó un análisis del porcentaje de sólidos en las muestras de sólidos sedimentados (pruebas de sedimentación), determinándose un porcentaje de 8,5% de sólidos y una densidad del lodo de 1100 kg/m³. Con los valores obtenidos de % de sólidos y densidad se ha determinado el volumen de lodo.

$$\text{Lodo}_{\text{Húmedo total}} = 157138.5 \frac{\text{kg lodo húmedo}}{\text{día}} \text{ al } 8,5\% \text{ Sólidos}$$

$$\text{Lodo}_{\text{Húmedo total}} = 142,85 \frac{\text{m}^3}{\text{día}} \diamond 1.65 \text{ l/s}$$

3.2.2.1.4. *Balance de aguas de la Planta de Tratamiento de Aguas*

El desarrollo del balance de aguas de la planta de tratamiento de aguas de mina, los flujos volumétricos de entradas y salidas se representa.

$$\text{Agua Total}_{\text{Ingreso}} = \text{Agua Total}_{\text{Salida}} \quad (\text{Ec.15})$$

$$\text{Agua Tot}_{\text{Ingr}} = \text{Agua acid}_{\text{día}} + \text{Agua neutr para cal}_{\text{día}} + \text{Agua neutr para flocc}_{\text{día}} \quad (\text{Ec.16})$$

$$\text{Agua Tot}_{\text{Ingr}} = 2688431 \text{ l/día}$$

$$\begin{aligned} \text{Agua Total}_{\text{Salida}} = & \text{Caudal de agua a tratada}_{\text{día}} + \text{Cant. de agua en el caliche}_{\text{día}} \quad (\text{Ec. 17}) \\ & + \text{Cant. de agua en el lodo}_{\text{día}} + \text{Cant. de agua por perdidas en operacion}_{\text{día}} \end{aligned}$$

$$\text{Agua Tot}_{\text{Ingr}} = \text{Caudal de agua a tratada}_{\text{día}} + 324000 \text{ l/día} \quad (\text{Ec. 18})$$

$$\text{Caudal de agua a tratada}_{\text{día}} = 2364431 \text{ l/día} \langle \rangle 27.366 \text{ l/s}$$

Los cálculos del balance de aguas del presente en el tratamiento, y se detallan en el Anexo 4.

3.2.2.2. *Diseño de Sedimentador*

Se muestran los resultados obtenidos para el diseño del sedimentador, para un caudal de diseño de 30 l/s de agua de mina.

i. *Criterio de diseño*

Los criterios desarrollados para el diseño del sedimentador se han tomado como referencia a Norma Técnica de Edificación OS.090 Planta de Tratamiento de Aguas Residuales:

- Los requisitos de área se determinan usando la carga superficial entre los valores de 24 y 60 m³/m²/día, lo cual equivale a una velocidad de sedimentación desde 1,0 hasta 2,5 m/h; la carga superficial con la que

se trabajara es de $33,69 \text{ m}^3/\text{m}^2/\text{día}$ con una velocidad de sedimentación $0,00039 \text{ m/s}$.

- El periodo de retención nominal (relación entre volumen y el caudal efluente) se encuentra en el rango de 1,5 hasta 4,00 h, basado en el caudal máximo diario de diseño 30 l/s. Asimismo se considera el factor de seguridad de 50% para el diseño del sedimentador.
- La profundidad es el producto de la carga superficial y el periodo de retención, y debe estar entre 2 y 5 m.
- La relación de las dimensiones de largo y ancho se encuentra entre los valores de 3 y 10.
- La relación de las dimensiones de largo y profundidad será entre los valores de 5 y 30.

ii. Dimensionamiento

En la tabla 3.33 se presentan los parámetros de diseño del sedimentador.

Tabla 3. 33 Resultados de los parámetros para el floculante AR-1032

Parámetro	Valor
Carga superficial	$33,69 \text{ m}^3/\text{m}^2/\text{día}$
Área superficial de la unidad (As)	$76,92 \text{ m}^2$
Ancho de la zona de sedimentación	4 m
Longitud de la zona de sedimentación	20,23 m
Profundidad	3.85 m
Volumen de la zona de sedimentación	$488,65 \text{ m}^3$
Periodo de retención	4,52 horas

Fuente: Datos hallados en base a la Norma Técnica de Edificación OS.090 Planta de Tratamiento de Aguas Residuales.

3.2.2.3. Diseño del Filtro Artificial

Los resultados obtenidos para el diseño del filtro se considera un caudal máximo de 27.35 l/s de agua clarificada (agua de mina tratada) según el balance de aguas.

i. Criterio de diseño

Los criterios desarrollados para el diseño del filtro artificial se han tomado como referencia de los sistemas pasivos para tratamiento de aguas, que tiene el principio de modificar las condiciones de pH del agua de mina, de forma que se favorezca la formación de especies insolubles y la retención de cationes metálicos, en caso pueda existir en el agua tratada de mina antes del vertimiento al cuerpo receptor Quebrada Hércules.

- Filtro artificial es rectangular está conformado de cinco capas de sustratos de caliza, grava 2", carbón vegetal, estiércol de cuy y arena de cuarzo. Asimismo, para el diseño se está considerando el tiempo de retención 16.72 min.
- La funcionalidad de cada sustrato: arena de cuarzo retiene las partículas suspendidas como los Sólidos totales suspendidos; material orgánico como estiércol (0,1 a 0,5 m de espesor) elimina el oxígeno disuelto del agua, reduce el sulfato y oxida los metales remanentes; carbón vegetal tiene afinidad con los metales As y Cd; grava retiene la grasa y los sólidos suspendidos; caliza (0,5 a 1 m de espesor) y sirve para neutralizar el pH del agua proveniente de la poza de sedimentación.

ii. Dimensionamiento

En la tabla 3.34 se presentan los parámetros de diseño del filtro artificial.

Tabla 3. 34 *Dimensionamiento del filtro artificial*

Parámetro	Valor
Ancho	2,8 m
Largo	3,5 m
Profundidad	2,8 m

Fuente: Datos hallados considerando que el caudal de agua clarificada 27.359 l/s.



Figura 3. 12

Diagrama de sustratos en el filtro artificial

Fuente: Niveles de los sustratos.

3.2.2.4. Tanque de Agitación de Lechada de Cal

i. Criterio de diseño

Para definir los criterios de diseño se consideró que es una mezcla de concentración al 6% y de poca viscosidad. Los criterios aplicados para el diseño fueron tomados de Mc Cabe.

- El tanque será de forma cilíndrica y provista de un eje vertical, con un fondo de tanque redondeado con el fin de eliminar las regiones en las que no penetrarían las corrientes del fluido.
- El diseño del tanque será uno estándar de proceso con agitación, tipo turbina. Para ello deben cumplir ciertas proporciones, según Mc Cabe.
- El diámetro del agitador suele medir del 30 al 50% del diámetro del tanque.
- Relación de la altura del líquido en el tanque (H) y diámetro del tanque (D_t) es de 1.
- Relación de la altura de la base al tanque (E) y diámetro del agitador (D_a) es de 1.
- Relación de la altura de agitador (W) y diámetro del agitador (D_a) es de 1 a 5.
- Relación del ancho del deflector (J) y diámetro del tanque (D_t) es de 1 a 12.
- Relación del largo de la paleta del agitador (L) y diámetro del agitador (D_a) es de 1 a 4.

- El tipo de agitador seleccionado será de turbina de 6 aspas planas, porque son eficaces en líquidos pocos viscosos y producen corrientes intensas que se extienden por todo el tanque y destruyen las masas de líquido estancado.
- Los agitadores tipo turbina generan corrientes radiales y tangenciales. El componente tangencial da lugar a vórtices y torbellinos; estos se evitarán por medio de placas deflectoras para que el agitador sea más eficaz. Por este propósito se instalará 4 deflectores.
- El factor importante en el diseño de un recipiente de agitación es la potencia para mover el impulsor, y para calcular ello, se necesita la gradiente de mezcla, viscosidad del fluido y volumen del tanque.

ii. Dimensionamiento

En la tabla 3.35 se presentan las dimensiones del tanque de agitación de lechada de cal, utilizando el volumen del tanque actual 25 m^3 , con la finalidad de reducir costos de operación.

Tabla 3. 35 Dimensionamiento del tanque de agitación de la lechada de cal

Parámetro	Valor
Altura del tanque (H)	$H = 3,16\text{m}$
Diámetro del tanque (D_t)	$D_t = 3,16\text{m}$
Diámetro de agitador (D_a)	$D_a = 1,056\text{m}$
Altura de la base al tanque (E)	$E = 1,056 \text{ m}$
Altura de agitador (W)	$W = 0,211 \text{ m}$
Ancho del deflector (J)	$J = 0,26 \text{ m}$
Largo de la paleta del agitador (L)	$L = 0,26 \text{ m}$
Potencia	$P = 15 \text{ HP}$

Fuente: Datos hallados en base al volumen del tanque lechada de cal 25 m^3 .

3.2.2.5. Tanque de Agitación para Dilución del Floculante AR-1032

i. Criterio de diseño

Para definir los criterios de diseño se tuvo presente que es una mezcla de concentración al 0,05% y de alta viscosidad. Los criterios aplicados para el diseño fueron tomados de Mc Cabe.

- El tanque será de forma cilíndrica y provista de un eje vertical, con un fondo de tanque redondeado con el fin de eliminar las regiones en las que no penetrarían las corrientes del fluido.
- El rodete va instalado sobre un eje suspendido, este mismo está accionado por un motor a través de una caja reductora de velocidad.
- El diseño del tanque será uno estándar de proceso con agitación tipo turbina. Para ello deben cumplir ciertas proporciones, según Mc Cabe.
- Relación de la altura del líquido en el tanque (H) y diámetro del tanque (D_t) es de 1.
- El diámetro del agitador suele medir del 30 al 50% del diámetro del tanque.
- Relación de la altura de la base al tanque (E) y diámetro del agitador (D_a) es de 1.
- Relación de la altura de agitador (W) y diámetro del agitador (D_a) es de 1 a 5.
- Relación del ancho del deflector (J) y diámetro del tanque (D_t) es de 1 a 12.

- Relación del largo de la paleta del agitador (L) y diámetro del agitador (D_a) es de 1 a 4.
- Asimismo, el tipo de agitador seleccionado será de turbina de 6 aspas planas, producen corrientes intensas que se extienden por todo el tanque
- Los agitadores tipo turbina generan corrientes radiales y tangenciales. El componente tangencial da lugar a vórtices y torbellinos, y estos se evitarán por medio de placas deflectoras con el fin que el agitador sea más eficaz. Por ello se instalará 4 deflectores
- El factor importante en el diseño de un recipiente de agitación es la potencia para mover el impulsor, y para calcular ello, se necesita la gradiente de la mezcla, viscosidad y el volumen del tanque.

ii. Dimensionamiento

En la tabla 3.36 se presentan las dimensiones del tanque de agitación para dilución de floculante, se usa el volumen actual del tanque 15 m^3 .

Tabla 3. 36

Dimensionamiento del tanque para dilución del floculante

Parámetro	Valor
Altura del tanque (H)	$H = 2,67 \text{ m}$
Diámetro del tanque (D_t)	$D_t = 2,67 \text{ m}$
Diámetro de agitador (D_a)	$D_a = 0,89 \text{ m}$
Altura de la base al tanque (E)	$E = 0,89 \text{ m}$
Altura de agitador (W)	$W = 0,17 \text{ m}$
Ancho del deflector (J)	$J = 0,22 \text{ m}$
Largo de la paleta del agitador (L)	$L = 0,22 \text{ m}$
Potencia	$P = 10,0 \text{ HP}$

Fuente: Datos hallados considerando que el volumen actual del tanque 15 m^3 .

3.2.2.6. Tanque Reactor

i. Criterio de diseño

Para definir los criterios de diseño se consideró que es una mezcla de agua de mina neutralizada con lechada de cal y de poca viscosidad. Los criterios aplicados para el diseño fueron tomados de Mc Cabe.

- El tanque será de forma cilíndrica y provista de un eje vertical, con un fondo de tanque redondeado con el fin de eliminar las regiones en las que no penetrarían las corrientes del fluido.
- El rodete va instalado sobre un eje suspendido, este mismo está accionado por un motor a través de una caja reductora de velocidad.
- El diseño del tanque será uno estándar de proceso con agitación, tipo turbina. Para ello deben cumplir ciertas proporciones indicadas, según Mc Cabe.
- Relación de la altura del líquido en el tanque (H) y diámetro del tanque (D_t) es de 1.
- El diámetro del agitador suele medir del 30 al 50% del diámetro del tanque.
- Relación de la altura de la base al tanque (E) y diámetro del agitador (D_a) es de 1.
- Relación de la altura de agitador (W) y diámetro del agitador (D_a) es de 1 a 5.
- Relación del ancho del deflector (J) y diámetro del tanque (D_t) es de 1 a 12.

- Relación del largo de la paleta del agitador (L) y diámetro del agitador (D_a) es de 1 a 4.
- Asimismo, el tipo de agitador seleccionado será de turbina de 6 aspas planas, porque son eficaces en líquidos pocos viscosos y producen corrientes intensas que se extienden por todo el tanque y destruyen las masas de líquido estancado.
- Los agitadores tipo turbina generan corrientes radiales y tangenciales. El componente tangencial da lugar a vórtices y torbellinos; estos se evitarán por medio de placas deflectoras para que el agitador sea más eficaz. Por este propósito se instalará 4 deflectores.
- El factor importante en el diseño de un recipiente de agitación es la potencia para mover el impulsor, y para calcular ello, se necesita las gradientes de la mezcla neutralizada y viscosidad.

ii. Dimensionamiento

En la tabla 3.37 se presentan las dimensiones del tanque reactor de neutralización y oxidación.

Tabla 3. 37*Dimensionamiento del tanque reactor*

Parámetro	Valor
Altura del tanque (H)	H = 3,511
Diámetro del tanque (D _t)	D _t = 3,511
Diámetro de agitador (D _a)	D _a = 1,17 m
Altura de la base al tanque (E)	E = 1,17 m
Altura de agitador (W)	W = 0,234 m
Ancho del deflector (J)	J = 0,29 m
Largo de la paleta del agitador (L)	L = 0,29m
Potencia	P = 20,0 HP

Fuente: Para los cálculos se tomó en cuenta una mezcla de agua de mina neutralizada volumen del tanque reactor 34 m³.

3.2.3. Memoria Descriptiva (Fase 03)

3.2.3.1. Etapa Captación de Aguas de Mina

3.2.3.1.1. Captación de Aguas Ácidas

En esta etapa la captación de las aguas de mina provenientes de las bocaminas Caridad, Coturcan y Hércules son conducidas con tuberías de 14” HDPE (Hércules) y 8” corrugada respectivamente, son reunidas en un canal de concreto ubicado al en Hércules.

3.2.3.1.2. Pre – sedimentación

Las aguas son conducidas por el canal de concreto (Hércules) a la poza de pre-sedimentación de 180 m³ con un tiempo de retención de 1.66 horas al caudal de diseño 30l/s con la finalidad de retener los sólidos sedimentables y partículas gruesas que se encuentran en el agua de mina.

3.2.3.2. Etapa de Tratamiento de las Aguas de Mina

3.2.3.2.1. *Reactivos Utilizados*

- **Hidróxido de calcio (Pureza 65%):** La lechada de cal se prepara a la concentración óptima de 6% con una dosificación de 0,918 g/l de agua de mina, el cual actúa como modificador de pH, depresor y clarificador. Asimismo, se cuenta para la preparación de la lechada de cal con dos tanques de polietileno de capacidad 25 m³ cada uno, con sus respectivos motores eléctricos y agitador mecánico, válvulas de control para regular el caudal y suministrar la lechada de cal a la concentración óptima 6% por gravedad mediante tubería de HDPE de 2 pulgadas de diámetro, ver tabla 3.35.
- **Floculante:** El floculante se prepara a una concentración de 0.05% y se adiciona en el tanque floculador (TK 07) de la planta de tratamiento con una dosis de 0.0026 g/l de agua tratada, el cual actúa como sedimentador de los sólidos en suspensión.

Por otro lado para la preparación y el suministro de floculante aniónico a la concentración óptima 0.05 % se cuenta con dos tanques de polietileno de capacidad 15 m³ cada uno, con sus respectivos motores eléctricos y agitador mecánico, válvulas de control para regular el flujo de floculante preparado a adicionar, el floculante aniónico AR-1032 tiene la función de formar flocs (coalición de varias partículas pequeñas o ultra finas), la finalidad del coagulante es formar flocs para que produzca la decantación por acción de la gravedad en la etapa de clarificación, ver tabla 3.36.

3.2.3.2.2. *Proceso de Neutralización*

El proceso de neutralización se realiza con agitación mecánica en tres tanques reactor en circuito en serie de capacidad de 34 m³ cada uno, con un tiempo de residencia de 57 min, al ingreso del primer tanque (Tk 01) se le agrega la lecha de cal al 6%, juntamente con el agua de mina proveniente del presedimentador, con la finalidad de regular el pH optimo y remover los metales pesados contenidos en el agua de mina en un rango de (pH <8.75 – 9.0>).

3.2.3.2.3. *Proceso de Oxidación*

En el proceso de oxidación se utiliza tres tanques reactor auto aireados colocados en serie de capacidad de 34 m³ de volumen cada uno. En donde se completa la etapa de oxidación de los iones metálicos existentes, luego descargando el agua de mina oxidada al tanque floculador (Tk N° 07) y se adiciona floculante para su posterior sedimentación.

3.2.3.2.4. *Proceso de Sedimentación*

El proceso de sedimentación se realiza en dos pozas de sedimentación con capacidad de 488,65 m³ cada uno, en estas pozas los lodos son sedimentados así clarificando el agua para su posterior ingreso al sistema de filtro artificial luego verter el agua clarificada al cuerpo receptor Quebrada Hércules cumpliendo con la normativa Ambiental vigente.

3.2.3.2.5. Sistema de Filtración

El agua de mina luego de pasar por el proceso de neutralización, oxidación y sedimentación, se obtiene el agua clarificada (agua tratada), mediante 05 tuberías de HDPE ingresa por el filtro artificial, con la finalidad de desionizar, filtrar los metales y solidos suspendidos respectivamente que no fueron precipitados en las pozas de sedimentación y con ello asegurar la calidad del vertimiento que descarga en el cuerpo receptor Quebrada Hércules.

3.2.3.2.6. Lodos generados

- Los lodos generados en las pozas de sedimentación por el proceso de decantación son bombeados con una bomba estacionaria de 100 HP, a través de una línea de conducción de tubería y acoples de 4” de diámetro de material HDPE hacia la galería de almacenamiento de lodos en interior mina.
- Los lodos generados son químicamente estables con pH básico que no afecta al ecosistema y al medio abiótico y biótico.

Se presenta el esquema de procesos de la propuesta de optimización de la planta de tratamiento de aguas y se detalla en el Anexo 3.

Esquema del proceso de la propuesta de la planta de tratamiento de agua de mina.

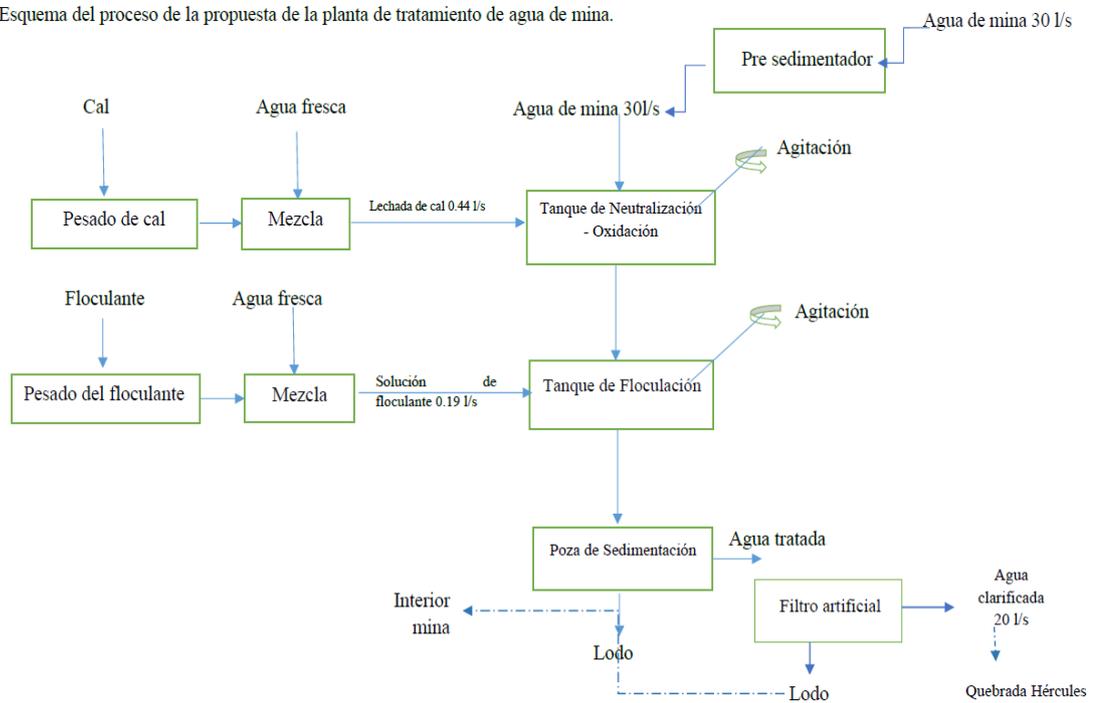


Figura 3. 13

Esquema de la propuesta óptima

Fuente: Considerando los datos calculados.

CAPÍTULO IV

RESULTADOS DE LA INVESTIGACIÓN

4.1. Análisis de los Resultados de Investigación

4.1.1. *Resultados Obtenidos en el Laboratorio y/o planta industrial*

- El floculante óptimo que se propone para la mejora de la planta de tratamiento de aguas es el floculante aniónico AR-1032, con un consumo diario de 6.8 kg al costo de 51.03 \$/día reduciendo el 53%.
- El pH óptimo hallado en el proceso de neutralización es de 8,75 asegurando la mayor remoción de los metales As, Cd, Zn, Fe y de sólidos totales en suspensión.
- En el proceso de neutralización los parámetros óptimos son: la concentración de hidróxido de calcio (pureza 65%) es de 6% y con una dosis de 10,2 ml de lechada de cal/l afluente, con un consumo diario 2379 kg al costo de 296 \$/día reduciendo el 38%, con pH inicial 3,2.
- Para obtener mayor remoción de metales y sólidos totales en suspensión, se debe considerar los siguientes parámetros: tiempo del proceso de floculación: 5 min; velocidad óptima de agitación en la floculación: 20 r.p.m

- En el proceso de sedimentación el tiempo es 12 min y la velocidad 0,039 cm/s
- La concentración de As y Cd en la última muestra tratada a las condiciones óptimas halladas en el laboratorio es igual a 0,00017 mg/l y 0,00217 mg/l.
- El consumo de energía luego de realizar las mejoras en la planta de tratamiento de agua de mina es 71.1 MW/mes con un costo mensual de 12093 \$ reduciendo el 60% respecto al tratamiento anterior.

4.2. Contratación de Hipótesis

4.2.1. Contratación de la Hipótesis General

Se demostró que la optimización de la planta de tratamiento pudo remover los metales As y Cd cumpliendo los límites máximos permisibles en el punto de vertimiento y el estándar de calidad de agua en la Categoría 3 en el cuerpo receptor Quebrada Hércules. En la tabla 4.1 se presenta la comparación de los resultados de análisis químico con los parámetros óptimos, logrando remover los metales

Tabla 4. 1 Comparación con la normativa ambiental de los resultados del tratamiento de aguas con los parámetros óptimos

Límite máximo Permissible	D.S.-010-2010-MINAM							
	pH	TSS (mg/l)	Cu (mg/l)	Pb (mg/l)	Cd (mg/l)	Zn (mg/l)	Fe (mg/l)	As (mg/l)
	6 – 9	50	0,5	0,2	0,05	1,5	...	0,1
Estándar de calidad de agua Riego de vegetales	DS- 004-2017-MINAM /Categoría 3							
Bebida de animales	6.5-8,5	...	0.2	0.05	0.01	2	5	0.1
Muestra sin tratar	6,5-8,4	...	0.5	0.05	0.05	24	...	0.2
Muestra tratada actual	3,2	398	3,695	4,239	1,357	495,025	249,238	13,621
Muestra tratada parámetros óptimos	8.1	67	0.31	0.21	0.23	1.76	1.45	0.13
	8.69	4	0,0039	0,00022	0,00217	0,0228	0,3204	0,00017

Fuente: Presentación de datos según la normativa.

De la misma manera se pudo demostrar con la gráfica de control los Límites de control Inferior (LCI), media y Limite de control superior (LCS) se encuentran por debajo los Límites Máximos permisibles de los metales As y Cd, demostrándose la remoción de los metales.

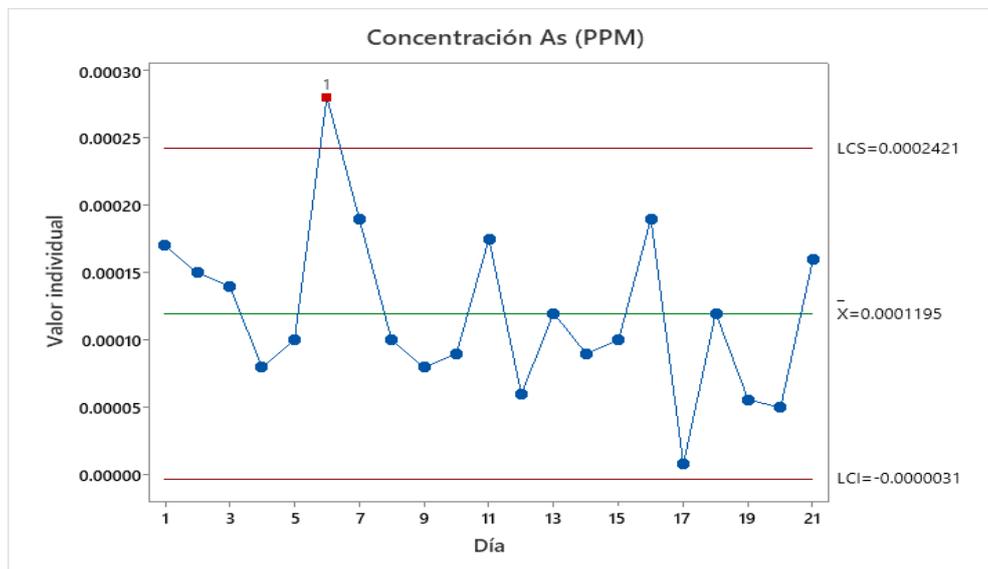


Figura 4. 1

Gráfica de control Concentración As después de las mejoras

Fuente: Considerando los datos calculados

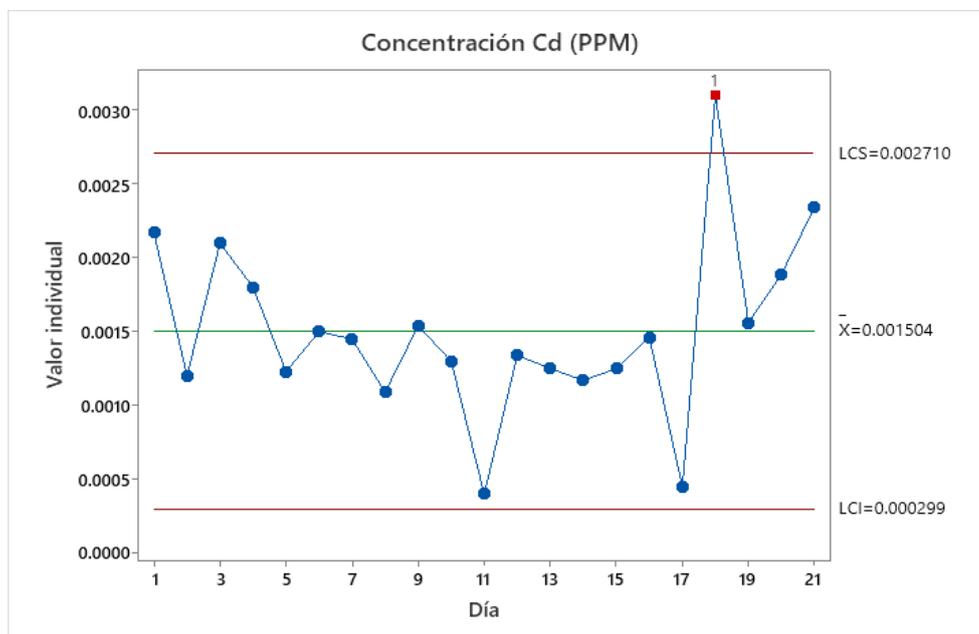


Figura 4. 2

Gráfica de control Concentración Cd después de las mejoras

Fuente: Considerando los datos calculados

4.2.1.1. Contrastación de la Hipótesis Específica 1

Se demostró que la óptima dosificación de reactivos del hidróxido de calcio al 65% de pureza y el floculante adecuado AR-1032 al 0,05% logran el cumplimiento de los límites máximos permisibles en el agua tratada de mina. y mediante el análisis de la gráfica de control pH e hidróxido de calcio. Figura 4.3 y Figura 4.4.

Tabla 4. 2 *Dosis y concentración optima de los reactivos para el tratamiento de agua de mina*

Variable		Valor
Condiciones de operación	Volumen de muestra	1 l
	pH inicial	3,2
	Tipo de floculante	AR-1032
Parámetros óptimos	pH	8,75
	Concentración de cal	6,00%
	Concentración de floculante	0,05%
	Dosis de floculante	3,5 ml

Fuente: Datos recolectados de la tabla 3.29

4.2.1.2. Contrastación de la Hipótesis Específica 2

Se demostró que, en base a los parámetros óptimos determinados en el laboratorio y la bibliografía, Mc Cabe y la Norma Técnica de Edificación OS.090 Planta de Tratamiento de Aguas Residuales, se diseñó los adecuados componentes de la planta de tratamiento de aguas como: tanques de preparación de lechada de cal y floculante, tanque reactor (proceso de neutralización y oxidación), sedimentador y filtro artificial logrando la remoción de los metales As y Cd en el vertimiento.

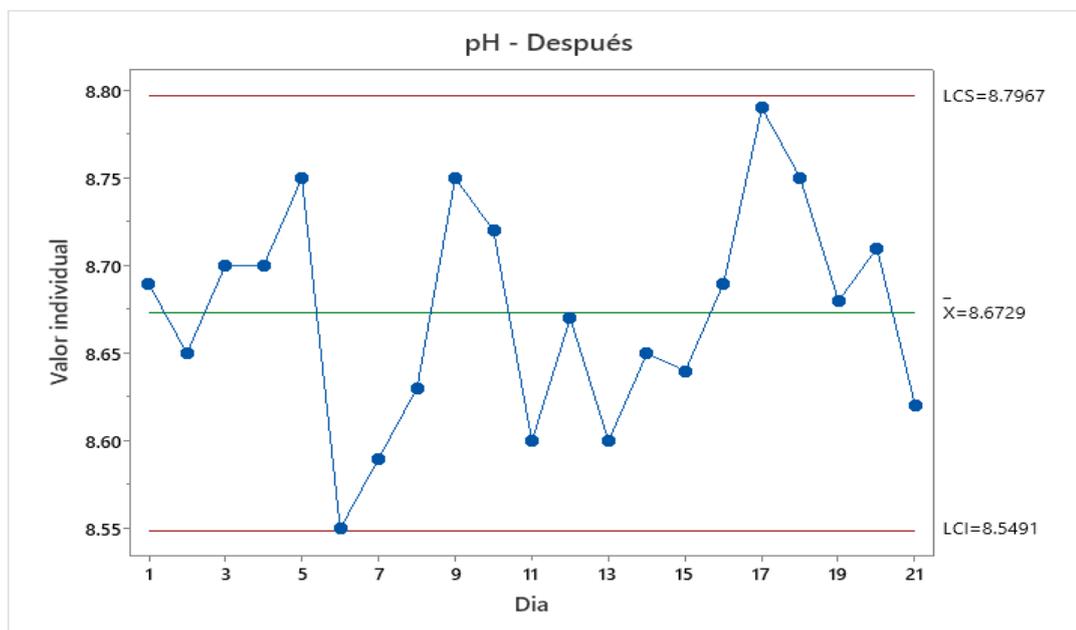


Figura 4.3

Gráfica de control pH después de la optimización

Fuente: Considerando los datos calculados

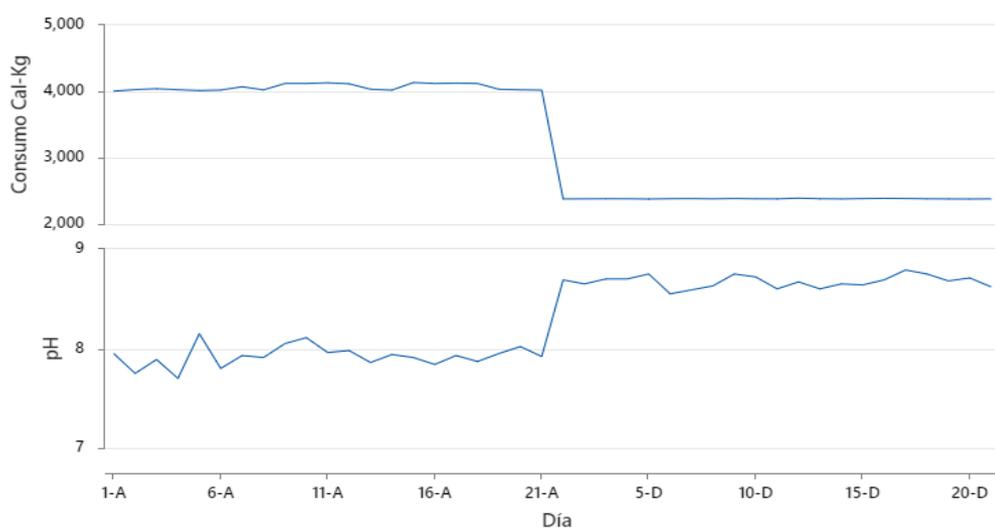


Figura 4.4

Gráfica pH e hidróxido de calcio antes y después

Fuente: Considerando los datos calculados

Validación de la hipótesis con pruebas estadísticas:

La metodología aplicada para demostrar la hipótesis es la prueba T de la muestra para los metales Cd y As.

T de una muestra Cd

Estadísticas descriptivas

N	Media	Desviación estándar	Error estándar de la media	Límite superior de 95% para μ
21	0.001504	0.000603	0.000132	0.001731

μ : media de población de Concentración Cd (ppm)

Prueba

Hipótesis nula $H_0: \mu = 0.05$

Hipótesis alterna $H_1: \mu < 0.05$

Valor T **Valor p**

-368.64 0.000

T de muestra As

Estadísticas descriptivas

N	Media	Desv.Est.	Error estándar de la media	Límite superior de 95% para μ
21	0.001504	0.000603	0.000132	0.001731

μ : media de población de Concentración Cd (ppm)

Prueba

Hipótesis nula $H_0: \mu = 0.1$

Hipótesis alterna $H_1: \mu < 0.1$

Valor T	Valor p
-748.72	0.000

En las pruebas T de una muestra en donde la media hipotética es 0.1 ppm As y 0.05 ppm Cd, el valor P es menor a 0.05 en la prueba Cd y As, por ello se rechaza la hipótesis nula para ambos y se acepta la hipótesis alterna; Por lo tanto, con un nivel de confianza del 95% la concentración de Cd y As en la optimización de la planta se demuestra la remoción de los metales y el cumplimiento de los límites máximos permisibles y el estándar de calidad de agua categoría 3 en la quebrada Hércules.

CONCLUSIONES

- La planta de tratamiento se logró optimizar en la dosificación de reactivos; lechada de cal 0.44 l/s y floculante de tipo AR-1032 a 0.19 l/s y el diseño de los componentes en los procesos de neutralización y oxidación 06 tanques de 25 m³ c/u (Diámetro 3.6 y Altura 3.6) , floculación 01 tanque de 15m³ (Diámetro 2.67 y Altura 2.67) y sedimentación 02 pozas rectangulares de 488 m³ cada uno , determinando la remoción de los metales Cd y As, asimismo el cumplimiento de los límites máximos permisibles y el estándar de calidad de agua en el cuerpo receptor, Quebrada Hércules.
- Se ha cumplido con el objetivo de la investigación respecto a la remoción de los metales As y Cd mediante el diseño de los componentes de la planta de tratamiento de agua, determinando como resultado el As 0,00017 ppm y Cd 0,00217 ppm; asimismo, la remoción de los metales determina una buena calidad de agua de mina tratada la cual es cuantificada con el cumplimiento de los Límites Máximos Permisibles establecidos en el D.S. 010-2010-MINAM y el cumplimiento del estándar de calidad de agua categoría 3 (riego de vegetales y bebida de animales) en el cuerpo receptor Quebrada Hércules establecido en el DS-004-2017-MINAM.
- El diseño preliminar de la propuesta de la optimización de la planta de tratamiento de agua en esta investigación abarca la implementación de la optimización de los insumos químicos (lechada de cal y floculante), tanques de agitación de estos, tanque reactor, sedimentador y un sistema de filtración artificial para asegurar la

remoción de los metales en el agua clarificada antes del vertimiento. El OPEX del tratamiento con la optimización es 0.61 \$/m³ respecto a la planta sin mejoras es 1.65 \$/m³ reduciendo en 63% al OPEX inicial.

- Las pruebas de laboratorio realizadas dentro de la investigación han permitido determinar los parámetros óptimos de dosis de cal en forma de lechada de 918 ppm, y de floculante (aniónico) de 2,625 ppm, con los cuales se ha determinado la velocidad óptima de sedimentación (0,039 cm/s), tiempo de residencia (4,52 h), y que sustentan el cumplimiento de los límites máximos permisibles del agua tratada de mina.

RECOMENDACIONES

- Implementar las mejoras de la planta de tratamiento de aguas de mina propuesto en la optimización de esta, con la finalidad de asegurar la remoción de los metales As y Cd, con ello el cumplimiento de los límites máximos permisibles, con la finalidad de evitar sanciones de la autoridad ambiental y como consecuencia un procedimiento administrativo sancionador y a la vez la generación de multas; sin embargo, previo debe realizarse un estudio de ingeniería a detalle.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Abdullah, N., Yusof, N., Lau, W., Jaafar, J., & Ismail, A. (2019). Recent trends of heavy metal removal from water/wastewater by membrane technologies. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, 76, 17-38.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jiec.2019.03.029>
- Aduvire, O. (2018). Dimensionado de sistemas de tratamiento de aguas acidas de mina. *Revista de Medio Ambiente y Minería*(5), 1-11.
http://www.scielo.org.bo/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2519-53522018000200001&lng=es&tlng=es
- Andía, Y. (2000). *Tratamiento de agua: Coagulación y floculación*. Evaluación de Platas y Desarrollo Tecnológico. Lima: SEDAPAL.
<https://vsip.info/coagulacion-floculacion-pdf-free.html>
- Avila, R. (2022). *Diseño y evaluación de un sistema de agitación para el proceso químico-metalúrgico de cianuración del oro*. Tesis de maestría, Universidad Nacional San Luis Gonzaga, Ica.
- Bailey, M., Gandy, C., Watson, I., Wyatt, L., & Jarvis, A. (2016). Heat recovery potential of mine water treatment systems in Great Britain. *International Journal of Coal Geology*, 164, 77-84.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.coal.2016.03.007>
- Baker, K., Fennessy, M., & Mitsch, W. (1991). Designing wetlands for controlling coal mine drainage: an ecologic-economic modelling approach. *Ecological*

- Economics*, 3(1), 1-24. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/0921-8009\(91\)90045-G](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/0921-8009(91)90045-G)
- Balmaceda Perez, N. (2015). Apuntes de ingeniería Sanitaria II. 5-9. <https://vsip.info/coagulacion-floculacion-y-sedimentacion-pdf-free.html>
- Blanca, R. (2013). *Impacto de la minería en el Perú y alternativas al desarrollo*. Córdoba: Universidad de Córdoba.
- Blgham, J., Schwertmann, U., Carlson, L., & Murad, E. (1990). A poorly crystallized oxyhydroxysulfate of iron formed by bacterial oxidation of Fe(II) in acid mine waters. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 54(10), 2743-2758. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/0016-7037\(90\)90009-A](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/0016-7037(90)90009-A)
- Bolzicco, J., Carrera, J., Ayora, C., Ceron, J., & Fernández, I. (2001). Comportamiento y evolución de una barrera geoquímica experimental en el río Agrio – Aznalcóllar – España. *Universidad Politécnica de Cataluña*, 35-46. https://aguas.igme.es/IGME/PUBLICA/BAK/CON_RECUCUIFEROS/004.PDF
- Borja, A. (2019). *Carbón activado de corteza de papa como filtro para la remoción de plomo y cadmio en aguas de mina, Casapalca – Lima, 2019*. Tesis de licenciatura, Universidad César Vallejo, Lima. <https://hdl.handle.net/20.500.12692/54807>
- Brix, H. (1993). Wastewater Treatment in Constructed Wetlands: System Design, Removal Processes, and Treatment Performance. En G. Moshiri, *Constructed Wetlands for Water Quality Improvement* (Primera ed., págs. 9-22). Boca Raton: CRC Press. <https://doi.org/https://doi.org/10.1201/9781003069997>
- Brodie, G., Britt, C., Tomaszewski, T., & Taylor, H. (1993). Anoxic limestone drains to enhance performance of aerobic acid drainage treatment wetlands:

- experiences of the Tennessee Valley Authority. In G. Moshiri, *Constructed Wetlands for Water Quality Improvement* (Primera ed., pp. 129-138). Boca Raton: CRC Press.
- Canty, M. (2000). Innovative in Situ Treatment of Acid Mine Drainage Using Sulfate-Reducing Bacteria. En M. a. Society for Mining, *Proceedings from the Fifth International Conference on Acid Rock Drainage*. Colorado: Society for Mining, Metallurgy, and Exploration (U.S.).
- Caso, G., & Laureano, L. (2018). *La goma de tara como agente floculante en la optimización del proceso de remoción de arsénico con FeCl₃ presente en agua de mina*. Tesis de licenciatura, Universidad Nacional del Callao, Callao. http://repositorio.unac.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12952/3337/Caso%20Rupay%20y%20Laureano%20Estrella_TESISPR_2018.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- Cen, L., Cheng, H., Liu, Q., Wang, S., & Wang, X. (2022). Arsenic release from arsenopyrite weathering in acid mine drainage: Kinetics, transformation, and effect of biochar. *Environment International*, 170(107558). <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.envint.2022.107558>
- Chen, C., Wang, G., Li, M., Chen, X., Chen, D., Feng, Z., Jiang, Y., Yu, H., Chao, Y., Tang, Y., Qiu, R., & Wang, S. (2023). Mechanism of arsenic immobilization and biotransformation in the biological aqua crust of mine drainage,. *Science of The Total Environment*, 892(164230). <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.164230>
- Chen, G., Ye, Y., Yao, N., Hu, N., Zhang, J., & Huang, Y. (2021). A critical review of prevention, treatment, reuse, and resource recovery from acid mine drainage.

Journal of Cleaner Production, 329(129666).
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.129666>

Crites, R., Dombeck, G., Watson, R., & Williams, C. (1997). Removal of metals and ammonia in constructed wetlands. *Water Environment Research*, 69(2), 132-135. <https://doi.org/https://www.jstor.org/stable/25044854>

De la Cruz, C., & Coronel, H. (2017). *Estudio de optimización del sistema de tratamiento de las aguas ácidas de un efluente minero*. Tesis de licenciatura, Universidad Nacional de Ingeniería, Lima.
https://d1wqtxts1xzle7.cloudfront.net/55842447/pdf_total_17.12.12-libre.pdf?1519057296=&response-content-disposition=inline%3B+filename%3DEstudio_de_optimizacion_del_sistema_de_t.pdf&Expires=1691788369&Signature=NwQQQFz8I7ArNAJLspUNSBtyMWI~WFUvBPdNVX8G95E

Dillon, E., Morgan, B., Oldfield, D., Burton, E., & Veliscek, J. (2023). Porous titania beads for remediation of arsenic contamination from acid mine drainage. *Journal of Environmental Management*, 332(117384).
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2023.117384>

Dong, Y., Di, J., Yang, Z., Zhang, Y., Wang, X., Guo, X., Li, Z., & Jiang, G. (2020). Study on the Effectiveness of Sulfate-Reducing Bacteria Combined with Coal Gangue in Repairing Acid Mine Drainage Containing Fe and Mn. *Energies*, 13(4). <https://doi.org/https://doi.org/10.3390/en13040995>

Dubuc, J., Coudert, L., Lefebvre, O., & Neculita, C. (2022). Electro-Fenton treatment of contaminated mine water to decrease thiosalts toxicity to *Daphnia magna*.

Science of The Total Environment, 835(155323).
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.155323>

Eger, P. (1994). Wetland Treatment for Trace Metal Removal from Mine Drainage: The Importance of Aerobic and Anaerobic Processes. *Water Science & Technology*, 29(4), 249-256.
<https://doi.org/https://doi.org/10.2166/wst.1994.0203>

Ettner, D. (1999). Pilot Scale constructed Wetland for the Removal of Nickel from Tailings Drainage, Southern Norway. *IMWA Congress*, 207-211.
https://doi.org/http://imwa.de/docs/imwa_1999/IMWA1999_Ettner_207.pdf

Evangelou, V. (1998). *Environmental Soil and Water Chemistry. Principles and Applications*. Toronto: John Wiley & Sons, Inc.

Feng, Z., Wu, H., & Su, J. (2010). Exploring potential vulnerabilities in data center network. *Conference proceedings*(12), 1-2.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1145/1921206.1921219>

Fernández, C. (2022). *Remoción electroquímica de arsénico en aguas residuales de procesos de plantas metalúrgicas en el cartón Camilo ponce Enríquez*. Tesis de maestría, Escuela superior politécnica del Chimborazo, Riobamba.
<http://dspace.esPOCH.edu.ec/bitstream/123456789/15687/1/20T01496.pdf>

Fosso, E., Mittal, H., Waanders, F., & Ray, S. (2017). Thermodynamic properties and adsorption behaviour of hydrogel nanocomposites for cadmium removal from mine effluents. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, 48, 151-161.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jiec.2016.12.033>

Gammons, C., Drury, W., & Li, Y. (2000). Seasonal influences on heavy metal attenuation in an anaerobic treatment wetland, Butte, Montana. In M. a. Society

for Mining, *Proceedings from the Fifth International Conference on Acid Rock Drainage* (pp. 1159-1168). Colorado: Society for Mining, Metallurgy, and Exploration (U.S.).

Gao, H., Wang, S., Xu, D., Wang, X., Zhong, Q., Zhong, Y., Li, J., & Cao, W. (2021). Study of DC Magnetron Sputtered Nb Films. *Crystals*, 12(1), 31. <https://doi.org/https://doi.org/10.3390/cryst12010031>

Gray, N. (1997). Environmental impact and remediation of acid mine drainage: a management problem. *Environmental Geology*, 30, 62-71. <https://doi.org/https://doi.org/10.1007/s002540050133>

Gyure, R., Konopka, A., Brooks, A., & Doemel, W. (1990). Microbial sulfate reduction in acidic (pH 3) strip-mine lakes. *FEMS Microbial Ecology*, 73(3), 193-201. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/0378-1097\(90\)90730-E](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/0378-1097(90)90730-E)

Hakkou, R., Benzaazoua, M., & Bussière, B. (2008). Acid Mine Drainage at the Abandoned Kettara Mine (Morocco): 1. Environmental Characterization. *Mine Water and the Environment*, 27, 145. <https://doi.org/https://doi.org/10.1007/s10230-008-0036-6>

Hamilton, Q., Lamb, H., Hellet, C., & Proctor, J. (2007). Passive Treatment Systems for the Remediation of Acid Mine Drainage at Wheal Jane, Cornwall. *Water and Environment Journal*, 13(2), 93-103. <https://doi.org/https://doi.org/10.1111/j.1747-6593.1999.tb01014.x>

Han, Z., Hong, N., Wu, Y., Huang, M., He, C., Lu, S., Dodbiba, G., Wei, Y., Otsuki, A., & Fujita, T. (2022). Arsenic (III) oxidation and removal from artificial mine wastewater by blowing O₂ nanobubbles. *Journal of Water Process Engineering*, 47(102780). <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2022.102780>

- He, W., Li, H., Xu, Y., Zhong, F., Dong, H., & Wang, M. (2022). Enhanced Microbial Oxidation–Neutralization Treatment of Acid Mine Drainage Rich in Ferrous Ions (Fe²⁺). *Int. J. Environ. Res. Public Health*, *19*(11), 6543. <https://doi.org/https://doi.org/10.3390/ijerph19116543>
- Hedin, R., & Nairn, R. (1993). Contaminant Removal Capabilities of Wetlands Constructed to Treat Coal Mine Drainage. En G. Moshiri, *Constructed Wetlands for Water Quality Improvement* (Primera ed., págs. 187-195). Boca Raton: CRC Press. <https://doi.org/http://dx.doi.org/10.1201/9781003069997-22>
- Hedin, R., & Watzlaf, G. (1993). The effects of anoxic limestone drains on mine water chemistry. *Proceedings America Society of Mining and Reclamation*, 185-194. <https://doi.org/https://doi.org/10.21000/JASMR94010185>
- Hegab, H., ElMekawy, A., Saint, C., Banat, F., Hasan, S., & Pant, D. (2020). Technoproduktive evaluation of the energyless microbial-integrated diffusion dialysis technique for acid mine drainage valorization. *Environmental Science: Water Research & Technology*, *5*. <https://doi.org/https://doi.org/10.1039/C9EW01020C>
- Hernández, P., Recio, G., Schwarz, A., Villa, D., Southam, G., Saavedra, F., Canales, C., & Nancucheo, I. (2023). Arsenic (III) and arsenic (V) removal from acidic mine waters using an acidophilic sulfate-reducing bioreactor. *Hydrometallurgy*, *221*(106137). <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2023.106137>
- Hu, J., Takako, A., & Yasumoto, M. (1997). Evaluation of adsorbability of pesticides in water on powdered activated carbon using octanol-water partition

coefficient . *Water Science & Technology*, 35(7), 219-226.
<https://doi.org/https://doi.org/10.2166/wst.1997.0280>

Ighalo, J., Kurniawan, S., Iwuozor, K., Aniagor, C., Ajala, O., Oba, S., Iwuchukwu, F., Ahmadi, S., & Igwegbe, C. (2022). A review of treatment technologies for the mitigation of the toxic environmental effects of acid mine drainage (AMD). *Process Safety and Environmental Protection*, 157, 37-58.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.psep.2021.11.008>

Ighalo, J., Kurniawan, S., Iwuozor, K., Aniagor, C., Ajala, O., Oba, S., Iwuchukwu, F., Ahmadi, S., & Igwegbe, C. (2022). A review of treatment technologies for the mitigation of the toxic environmental effects of acid mine drainage (AMD). *Process Safety and Environmental Protection*, 157, 37-58.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.psep.2021.11.008>

Iribar, V., Izco, F., Tames, P., Da Silva, A., & Antigüedad, I. (1999). Use a tailings pond as an aerobic wetland at the closed Troya mine (Gipuzkoa, Northern Spain). *IMWA Congress*, 563-568.
https://doi.org/http://www.imwa.de/docs/imwa_1999/IMWA1999_Iribar_563.pdf

Jamieson, H., Walker, S., & Parsons, M. (2015). Mineralogical characterization of mine waste. *Applied Geochemistry*, 57, 85-105.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.apgeochem.2014.12.014>

Jaramillo, A., & Contreras, M. (2019). *Tratamiento del drenaje ácido de minas de carbón mediante humedales artificiales – caso de estudio quebrada El Chocho en el corregimiento de Montebello, Cali*. Trabajo de investigación, Universidad Autónoma del Occidente, Santiago de Cali.

<https://red.uao.edu.co/bitstream/handle/10614/11980/T08976.pdf?sequence=5&isAllowed=y>

Jiang, F., Zhang, C., Zhang, K., Luo, H., Luo, J., & Liu, F. (2023). Effect of ascorbic acid and combination with fulvic acid on the electrokinetic remediation of paddy soil contaminated by arsenic-containing acid mine drainage. *Applied Geochemistry*, 152(105632).

<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.apgeochem.2023.105632>

Jiao, Y., Zhang, C., Su, P., Tang, Y., Huang, Z., & Ma, T. (2023). A review of acid mine drainage: Formation mechanism, treatment technology, typical engineering cases and resource utilization. *Process Safety and Environmental Protection*, 170, 1240-1260.

<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.psep.2022.12.083>

Jönsson, J., Persson, P., Sjöberg, S., & Lövgren, L. (2005). Schwertmannite precipitated from acid mine drainage: phase transformation, sulphate release and surface properties. *Applied Geochemistry*, 20(1), 179-191.

<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.apgeochem.2004.04.008>

Kadlec, R., & Wallace, S. (1996). *Treatment Wetlands* (Segunda ed.). Boca Raton: Taylor & Francis Group.

https://sswm.info/sites/default/files/reference_attachments/KADLEC%20WALLACE%202009%20Treatment%20Wetlands%202nd%20Edition_0.pdf

Kefeni, K., Msagati, T., & Mamba, B. (2017). Acid mine drainage: Prevention, treatment options, and resource recovery: A review. *Journal of Cleaner Production*, 151, 475-493.

<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.03.082>

- Kepler, D., & McCleary, E. (1994). Successive alkalinity producing systems (SAPS) for the treatment of acidic mine drainage. *Proceedings America Society of Mining and Reclamation*, 195-204.
<https://doi.org/https://doi.org/10.21000/JASMR94010195>
- Lee, S., Ihara, M., Yamashita, N., & Tanaka, H. (2017). Improvement of virus removal by pilot-scale coagulation-ultrafiltration process for wastewater reclamation: Effect of optimization of pH in secondary effluent. *Water Research*, 114, 23-30. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.watres.2017.02.017>
- Lee, Y., Ren, Y., Cui, M., Zhou, Y., Kwon, O., Ko, J., & Khim, J. (2022). Arsenic adsorption study in acid mine drainage using fixed bed column by novel beaded adsorbent. *Chemosphere*, 291(132894), 3.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2021.132894>
- López, J., Reig, M., Vecino, X., & Cortina, J. (2021). Arsenic impact on the valorisation schemes of acidic mine waters of the Iberian Pyrite Belt: Integration of selective precipitation and spiral-wound nanofiltration processes. *Journal of Hazardous Materials*, 403(123886).
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2020.123886>
- Manrique, I., & Gomez, J. (2016). *Diseño y construcción de una torre de sedimentación para la evaluación de los procesos de remoción y eficiencia en el tratamiento de agua potable*. Tesis de licenciatura, Universidad Católica de Colombia, Bogotá.
- Marín, J. (2005). *Remoción de materia orgánica por coagulación - floculación*. Tesis de licenciatura, Universidad Nacional de Colombia, Manizales.
<https://vsip.info/coagulacion-floculacion-y-sedimentacion-pdf-free.html>

- Mataix, C. (1999). A successive alkalinity producing system (SAPS) as operational unit in a hybrid passive treatment system for acid mine drainage. *IMWA Congress, Mine, Water & Environment, Sevilla, 2*, 569-574.
http://mwen.info/docs/imwa_1999/IMWA1999_Ordonez_575.pdf
- Mayes, W., Perks, M., Large, A., Davis, J., Gandy, C., Orme, P., & Jarvis, A. (2021). Effect of an extreme flood event on solute transport and resilience of a mine water treatment system in a mineralised catchment. *Science of The Total Environment*, *750*(141693).
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.141693>
- McCann, J., & Nairn, R. (2022). Characterization of residual solids from mine water passive treatment oxidation ponds at the tar creek superfund site, Oklahoma, USA: Potential for reuse or disposal. *Cleaner Waste Systems*, *3*(100031).
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.clwas.2022.100031>
- Ministerio del Ambiente. (2010). *Decreto Supremo N° 010-2010-MINAM*. Lima: El Peruano.
- Ministerio del Ambiente. (2017). *Decreto Supremo N° 004-2017-MINAM*. Lima: El Peruano.
- Mokgehle, T., & Tavengwa, N. (2021). Recent developments in materials used for the removal of metal ions from acid mine drainage. *Applied Water Science*, *11*, 42.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1007/s13201-020-01350-9>
- Nguegang, B., Masindi, V., Msagati, T. A., & Tekere, M. (2022). Effective treatment of acid mine drainage using a combination of MgO-nanoparticles and a series of constructed wetlands planted with *Vetiveria zizanioides*: A hybrid and stepwise approach. *Journal of Environmental Management*, *310*(114751).
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2022.114751>

- Nleya, Y., Simate, G., & Ndlovu, S. (2016). Sustainability assessment of the recovery and utilisation of acid from acid mine drainage. *Journal of Cleaner Production*, *113*, 17-27. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.11.005>
- Noller, B., Woods, P., & Ross, B. (1994). Case studies of wetland filtration of mine waste water in constructed and naturally occurring systems in northern Australia. *Water Science and Technology*, *29*(4), 257-265. <https://doi.org/https://doi.org/10.2166/wst.1994.0205>
- Okibe, N., Nonaka, K., Kondo, T., Shimada, K., & Liu, P. (2023). Microbiological passive treatment of Mn/Zn-containing mine water. *Hydrometallurgy*, *219*(106084). <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2023.106084>
- Opitz, J., Bauer, M., Alte, M., & Peiffer, S. (2023). Development of a novel sizing approach for passive mine water treatment systems based on ferric iron sedimentation kinetics. *Water Research*, *233*(119770). <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.watres.2023.119770>
- Ordóñez , A., Loredó, J., & Pendás, F. (1999). A successive alkalinity producing system (SAPS) as operational unit in a hybrid passive treatment system for acid mine drainage. *IMWA Congress*, 575-581. https://doi.org/http://mwen.info/docs/imwa_1999/IMWA1999_Ordenez_575.pdf
- Palomino, A., & Tipismana, P. (2019). *Estudio para la remoción de arsenico en el tratamiento de distintos tipos de aguas con el empleo de Zeolitas naturales*. Tesis de licenciatura, Univeridad Nacional San Luis Gonzaga, Ica. <https://doi.org/http://repositorio.unica.edu.pe/bitstream/handle/20.500.13028/4293/Estudio%20para%20la%20remoci%c3%b3n%20de%20ars%c3%a9nico%20en>

%20el%20tratamiento%20de%20distintos%20tipos%20de%20aguas%20con%20el%20empleo%20de%20zeolitas%20naturales.pdf?sequence=1&isAllo

Puente, A., & Calderón, J. (2018). Optimización del sistema de tratamiento y gestión sanitaria de aguas residuales industriales para vertimiento clase III, provenientes de la bocamina del nivel 250 (EF 03) al río San José - Perú. *Industrial Data*, 21(2), 7-15. <https://doi.org/https://doi.org/10.15381/idata.v21i2.14916>

Qin, J., Cui, X., Yan, H., Lu, W., & Lin, C. (2019). Active treatment of acidic mine water to minimize environmental impacts in a densely populated downstream area. *Journal of Cleaner Production*, 210, 309-316. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.11.029>

Qin, J., Wang, X., Deng, M., Li, H., & Lin, C. (2022). Red mud-biochar composites (co-pyrolyzed red mud-plant materials): Characteristics and improved efficacy on the treatment of acidic mine water and trace element-contaminated soils. *Science of The Total Environment*, 844(157062). <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.157062>

Qin, J., Wang, X., Deng, M., Li, H., & Lin, C. (2022). Red mud-biochar composites (co-pyrolyzed red mud-plant materials): Characteristics and improved efficacy on the treatment of acidic mine water and trace element-contaminated soils. *Science of The Total Environment*, 844(157062). <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.157062>

Ramos, L. (2022). *Optimización de la remoción de cadmio del drenaje ácido de la mina "La Esperanza" empleando humedales anaeróbicos artificiales a escala de laboratorio*. Tesis de licenciatura, Universidad Nacional Mayor de San

Marcos, Lima.

http://38.43.142.130/bitstream/handle/20.500.12672/17677/Ramos_nl.pdf?sequence=1&isAllowed=y

- Rey, V., Ríos, C., Vargas, L., & Valente, T. (2021). Use of natural zeolite-rich tuff and siliceous sand for mine water treatment from abandoned gold mine tailings. *Journal of Geochemical Exploration*, 220(106660). <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.gexplo.2020.106660>
- Rimarachin, P., & Huaranga, F. (2015). Tratamiento de aguas de efluentes minero – metalúrgicos utilizando, métodos pasivos y activos en sistemas experimentales. *SCIENDO*, 18(2). <https://doi.org/https://revistas.unitru.edu.pe/index.php/SCIENDO/article/view/1352>
- Ryu, S., Naidu, G., Hasan, A., Choi, Y., Jeong, S., & Vigneswaran, S. (2019). Acid mine drainage treatment by integrated submerged membrane distillation– sorption system. *Chemosphere*, 218, 955-965. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2018.11.153>
- Silva, D., Weber, C., & Oliveira, C. (2021). Neutralization and uptake of pollutant cations from acid mine drainage (amd) using limestones and zeolites in a pilot-scale passive treatment system. *Minerals Engineering*, 170. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.mineng.2021.107000>
- Skousen, J., Zipper, C., Rose, A., Ziemkiewicz, P., Nairn, R., McDonald, L., & Kleinmann, R. (2017). Review of Passive Systems for Acid Mine Drainage Treatment. *Mine Water and the Environment*, 36, 133-153. <https://doi.org/https://doi.org/10.1007/s10230-016-0417-1>

- Sobolewski, A. (1996). Metal species indicate the potential of constructed wetlands for long-term treatment of metal mine drainage. *Ecological Engineering*, 6(4), 259-271. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/0925-8574\(95\)00062-3](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/0925-8574(95)00062-3)
- Song, Y., Guo, Z., Wang, R., Yang, L., Cao, Y., & Wang, H. (2022). A novel approach for treating acid mine drainage by forming schwertmannite driven by a combination of biooxidation and electroreduction before lime neutralization. *Water Research*, 221(118748). <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.watres.2022.118748>
- Stark, L., & Williams, F. (1995). Assessing the performance indices and design parameters of treatment wetlands for H⁺, Fe, and Mn retention. *Ecological Engineering*, 5(4), 433-444. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/0925-8574\(95\)00008-9](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/0925-8574(95)00008-9)
- Tarutis, W., Stark, L., & Williams, F. (1999). Sizing and performance estimation of coal mine drainage wetlands. *Ecological Engineering*, 12(3-4), 353-372. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0925-8574\(98\)00114-1](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0925-8574(98)00114-1)
- Tong, L., Fan, R., Yang, S., & Li, C. (2021). Development and Status of the Treatment Technology for Acid Mine Drainage. *Mining, Metallurgy & Exploration*, 38, 315-327. <https://doi.org/https://doi.org/10.1007/s42461-020-00298-3>
- Tucto, R. (2019). *Optimización del consumo del floculante para el tratamiento del Aluminio y Manganeso del agua de mina Unidad Minera Orcopampa – Buenaventura - Arequipa, 2019*. Tesis de licenciatura, Universidad Nacional Daniel Alcides Carrión, Cerro de Pasco. http://45.177.23.200/bitstream/undac/1434/1/T026_70880054_T.pdf

- Tyrrell, W., Mulligan, D., Sly, L., & Clive, L. (1997). Trialing wetlands to treat coal mining wastewaters in a low rainfall, high evaporation environment. *Water Science and Technology*, 35(5), 293-299. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0273-1223\(97\)00082-6](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0273-1223(97)00082-6)
- United States Environmental Protection Agency. (2001). *Coal reining best management practices guidance manual*. Washington: Environmental Protection Agency. https://www.epa.gov/sites/default/files/2014-08/documents/coal_reining_bmp_guidance_2001.pdf
- Villa, D., Hong, P., Berry, L., Liu, D., & Edraki, M. (2023). Element distribution in electrochemically treated mine wastewater for efficient resource recovery and water treatment: A pilot study. *Chemosphere*, 339(139536). <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2023.139536>
- Walton, K. (1999). Geochemistry of the Processes that Attenuate Acid Mine Drainage in Wetlands. En G. Plumlee, M. Logsdon, & L. Filipek, *The Environmental Geochemistry of Mineral Deposits* (págs. 218-228). Colorado: Society of Economic Geologists. <https://doi.org/https://doi.org/10.5382/Rev.06.10>
- Watzlaf, G. (1997). Passive treatment of acid mine drainage in down-flow limestone systems. *American Society for Surface Mining and Reclamation*, 233-244. <https://www.osti.gov/biblio/613863>
- Wieder, R. (1993). Ion input/output budgets for five wetlands constructed for acid coal mine drainage treatment. *Water Air Soil Pollution*, 71(3-4), 231-270. <https://doi.org/https://doi.org/10.1007/BF00480548>
- Wildeman, T., Dietz, J., Gusek, J., & Morea, S. (1993). Handbook for constructed wetlands receiving acid mine drainage. *Risk Reduction Engineering*

Laboratory Office of Research and Development Cincinnati.

<https://www.osti.gov/biblio/5907502>

- Yan, S., Cheng, K., Morris, C., Douglas, G., Ginige, M., Zheng, G., Zhou, L., & Kaksonen, A. (2020). Sequential hydrotalcite precipitation and biological sulfate reduction for acid mine drainage treatment. *Chemosphere*, 252(126570).<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2020.126570>
- Young, P. (1997). The longevity of minewater pollution: a basis for decision-making. *Science of The Total Environment*, 194–195, 457-466.
[https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0048-9697\(96\)05383-1](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0048-9697(96)05383-1)
- Ziemkiewicz, P., Skousen, J., & Simmons, J. (2001). Cost Benefit Analysis of Passive Treatment Systems. *The National Mine Land Reclamation Center*.
<https://doi.org/https://wvmdtaskforce.files.wordpress.com/2016/01/01-ziem2.pdf>

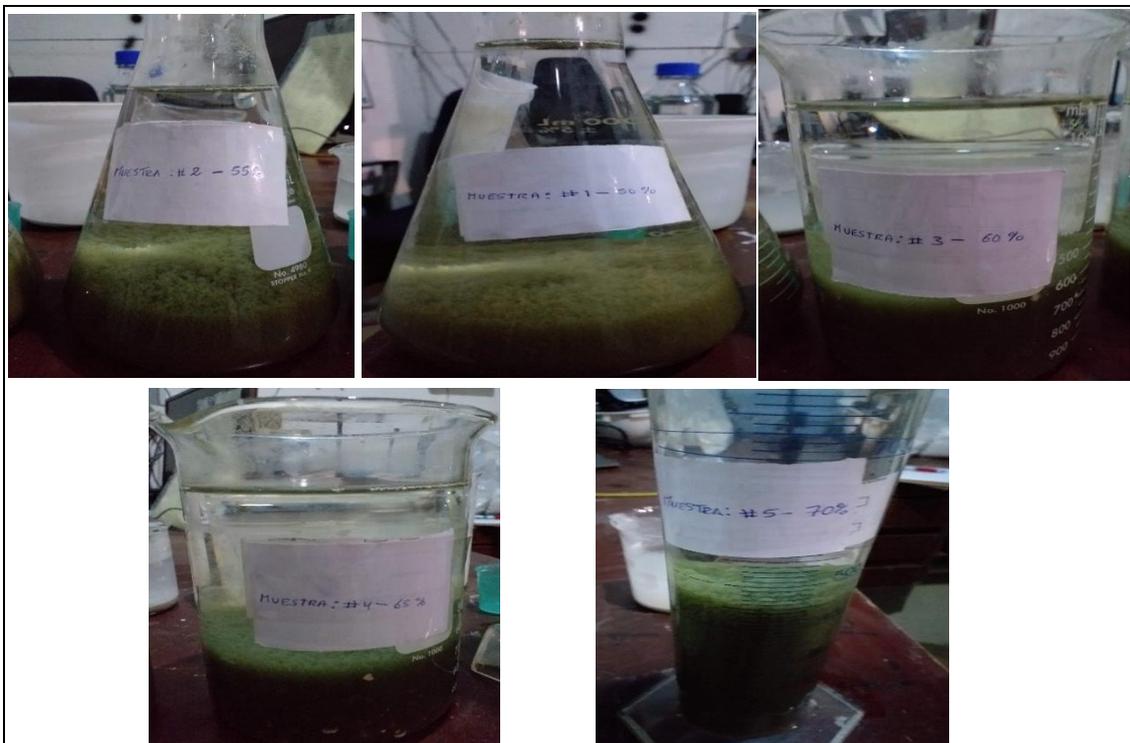
ANEXOS

ANEXO N°1: MATRIZ DE CONSISTENCIA

Título de la tesis: “OPTIMIZACIÓN DE PARÁMETROS DE LA PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUA DE MINA PARA REMOVER LOS METALES DEL CUERPO RECEPTOR CATEGORÍA 3 CONVERGENTE AL RIO HUARMEY”				
PROBLEMA GENERAL	OBJETIVO GENERAL	HIPÓTESIS GENERAL	HIPÓTESIS	
			VARIABLES DE LA HIPÓTESIS	
			IDENTIFICACIÓN	TÉCNICAS DE RECOLECCIÓN
El efluente minero compuesto se encuentra dentro del rango de PH 3 a 4, se caracteriza por tener alta carga metálica, el cual es tratado en la actual planta de tratamiento de aguas de manera deficiente, impactando al medio ambiente.	Optimizar la planta de tratamiento del agua de mina para remover As y Cd cumpliendo con la categoría 3 en el cuerpo receptor convergente al río Huarmey.	La eficiente optimización de la planta de tratamiento del agua de mina permitirá la remoción de metales As y Cd cumpliendo con la Categoría 3 en el cuerpo receptor.	Variable independiente	Prueba de jarras
			Optimización (reactivos y diseño de componentes de la planta)	
			Variable dependiente	Análisis químico de la calidad de agua
			Remoción de metales As y Cd	Prueba de jarras
			Variables intervinientes controladas	
			Método de estudio	
		Revoluciones de agitación		
PROBLEMAS ESPECÍFICOS	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	HIPÓTESIS ESPECÍFICAS	VARIABLES DE LA HIPÓTESIS	
Problema Específico N.º 1	Objetivo Específico N.º 1	Hipótesis Específica N.º 1	NOMBRE DE LA VARIABLE	TÉCNICAS DE RECOLECCIÓN
En la actual planta de tratamiento de aguas ocurren limitaciones en el efluente minero respecto a la dosificación de reactivos.	Determinar la dosificación óptima de reactivos cumpliendo los límites máximos permisibles en la descarga del efluente minero.	Una óptima dosificación de reactivos logrará el cumplimiento de los límites máximos permisibles.	Variable independiente	Controladores de dosificación (Bombas Peristálticas)
			Dosificación óptima de reactivos	
			Variable dependiente	Prueba de jarras
			Cumplimiento de límites máximos permisibles.	
Problema Específico N.º 2	Objetivo Específico N.º 2	Hipótesis Específica N.º 2	NOMBRE DE LA VARIABLE	TÉCNICAS DE RECOLECCIÓN
Se requiere formular el diseño de los componentes de la planta de tratamiento del agua de mina para remover los metales As y Cd.	Diseñar adecuadamente los componentes de la planta de tratamiento del agua de mina para remover los metales As y Cd.	Un adecuado diseño de componentes de la planta de tratamiento podrá remover los metales As y Cd.	Variable independiente	Prueba de jarras
			Diseño de los componentes de la planta	
			Variable dependiente	Análisis químico de la calidad de agua
			Remoción de metales As y Cd	

ANEXO N°2

✓ Álbum Fotográfico



Fotografía 1. Muestras de agua de mina determinando la pureza óptima de hidróxido de calcio 50%, 55%, 60%, 65% y 70%



Fotografía 2. Lodos generados en las pruebas N°01, 02, 03, 04 y 05 a diferentes puridades de hidróxido de calcio $\text{Ca}(\text{OH})_2$



Foto N°3: Muestras de agua de mina con diferentes floculantes en formación de flocs.



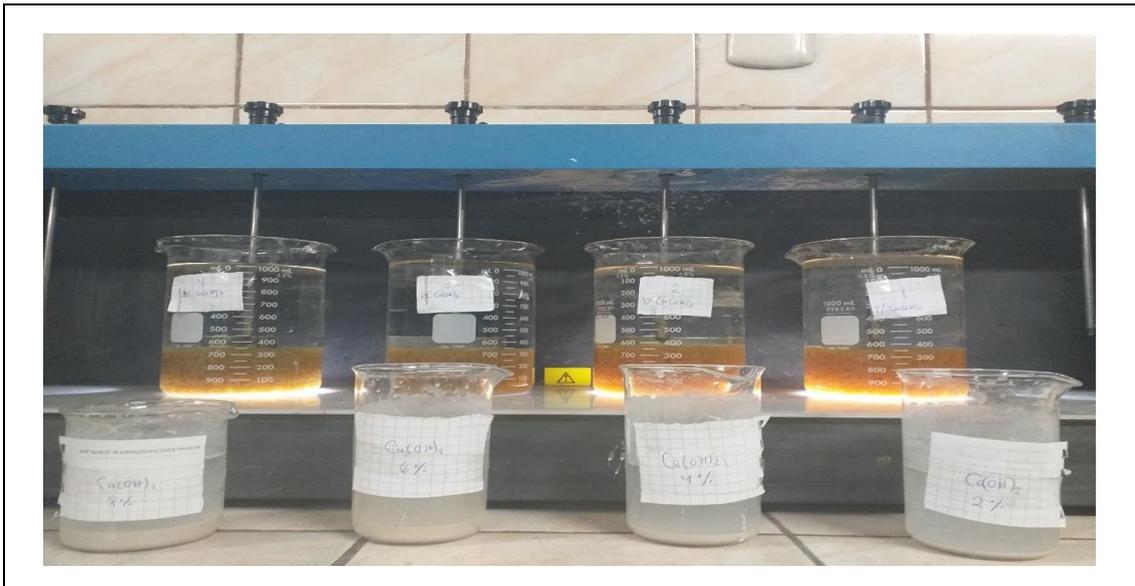
Foto N°4: Muestras de agua de mina tratada sedimentada con diferentes floculantes



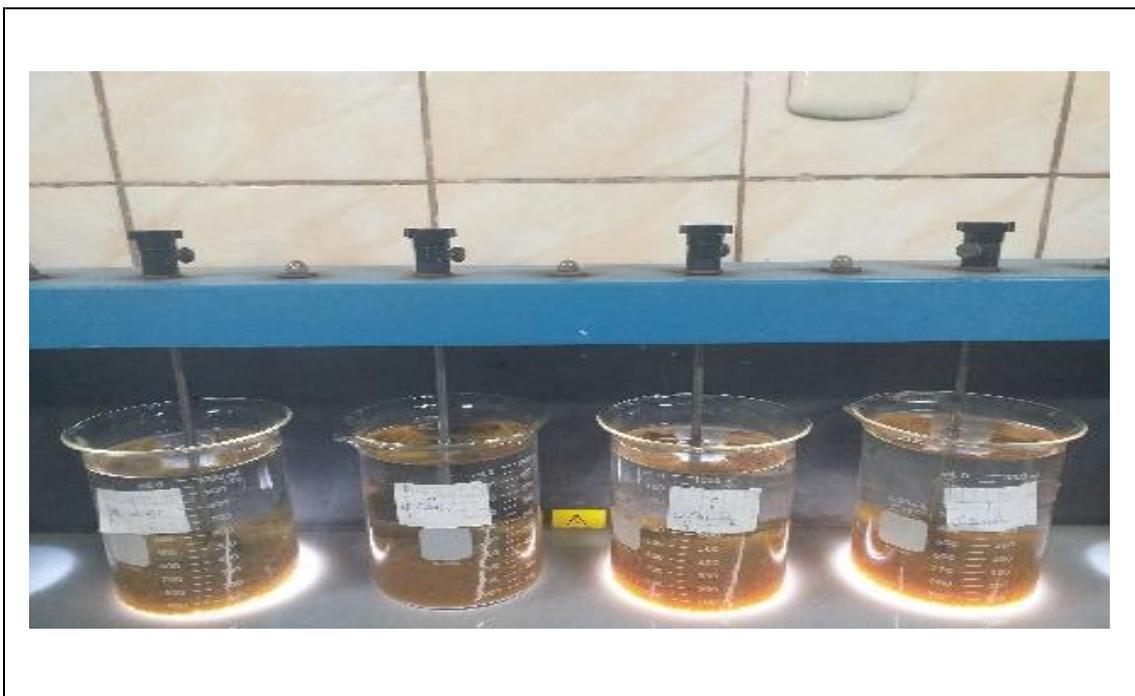
Foto N°5: Muestras de agua mina a diferentes determinando los floculantes adecuados



Foto N°6: De izquierda a derecha: Superfloc (actual), Arenas AR 1032 y Arenas 5240, después de la dosificación de floculantes y sedimentación, se aprecia mejor compactación y mayor tamaño de flocs del floculante AR 1032.



Fotografía 7. Muestras de agua de mina determinando la concentración óptima de lechada de cal a las concentraciones 2%, 4%, 6% y 8%

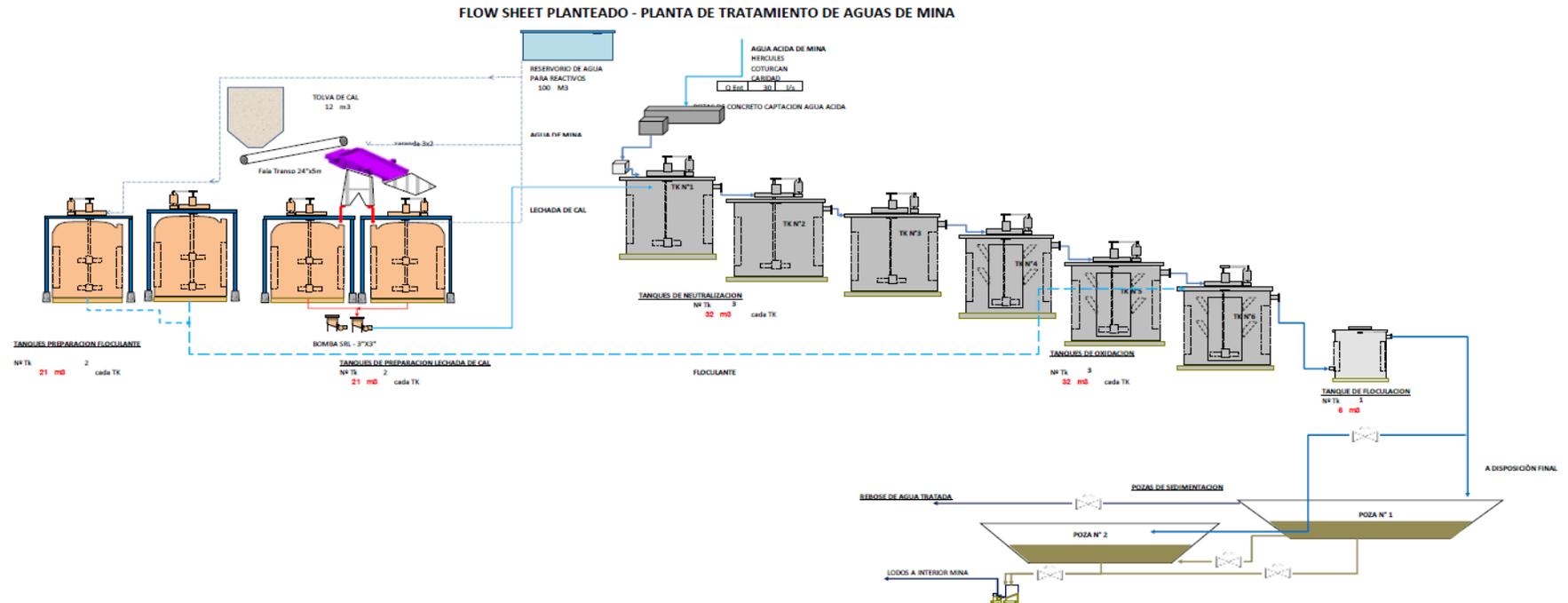


Fotografía 8. Muestras de aguas de mina tratadas a diferentes concentraciones de hidróxido de calcio, agua clarificada y lodo.



ANEXO N°3

- ✓ Flow Shett de la planta de tratamiento de agua de mina



ANEXO N°4. Cálculo del diseño

1. Cálculo previo

1.1. Cálculo de los parámetros para la Cal

A. Dosis de Ca(OH)_2

El cálculo para hallar la dosis de la lechada de cal al 6%, se realizó en base a los resultados obtenidos en el capítulo 3, este valor nos sirvió para hallar el caudal necesario de lechada de cal para dosificar un flujo de 30 L/s de agua ácida de un efluente minero. Por tanto, se procedió a calcular la dosis, mediante la (Ec. 1):

$$\text{Ec. 1: } D = \frac{q \times C \times \text{FS}}{Q}, \frac{\text{mgCa(OH)}_2}{\text{L efluente}}$$

Siendo:

q: Volumen de lechada de cal, ml

C: Concentración de lechada, $\frac{\text{gCa(OH)}_2}{\text{ml lechada}}$

FS: Factor de seguridad igual a 1,5

Q: Volumen de efluente a tratar, L

Reemplazando los datos en la (Ec.9) se tiene:

$$D = 0,918 \frac{\text{gCa(OH)}_2}{\text{L efluente}}$$

B. Consumo de Ca(OH)_2

El cálculo del consumo de Ca(OH)_2 por día, se realizó con el resultado de la dosis obtenida anteriormente, este valor nos ayudó a saber cuánto se necesitó para neutralizar el agua ácida y el costo de cal por día. Este cálculo se realizó, mediante la (Ec. 2):

$$\text{Ec. 2: } \text{Consumo de Ca(OH)}_2 = D \times Q, \frac{\text{kg cal}}{\text{día}}$$

Siendo:

D: Dosis de Ca(OH)_2 , $\frac{\text{gCa(OH)}_2}{\text{L efluente}}$

Q: Caudal del efluente, $\frac{\text{L efluente}}{\text{s}}$

Reemplazando los resultados obtenidos en la (Ec. 2) se tiene:

$$\text{Consumo de Ca(OH)}_2 = 2379,5 \frac{\text{kgCa(OH)}_2}{\text{día}}$$

C. Flujo másico de lechada de cal

Se calculó el flujo másico de lechada de cal, a partir de la (Ec. 3), teniendo en cuenta que la concentración de la lechada es $0,06 \frac{\text{gCa(OH)}_2}{\text{ml lechada}}$ y el consumo de Ca(OH)_2 por día es 2379,4 kg.

$$\text{Ec. 3: } \dot{q} = \frac{\text{Consumo de Ca(OH)}_2}{\text{Concentración de lechada}}, \frac{\text{kg de lechada}}{\text{día}}$$

Reemplazando los resultados obtenidos en la (Ec. 3) se tiene:

$$\dot{q} = 39658 \frac{\text{kg de lechada}}{\text{día}}$$

D. Flujo volumétrico de lechada de cal

Con los datos obtenidos anteriormente, se calculó el flujo volumétrico de la lechada de cal, mediante la (Ec. 4):

$$\text{Ec. 4: } \text{Flujo Vol. de lechada} = \frac{\dot{q} \times \frac{1}{24\text{h}}}{\rho_{\text{lechada}}}, \frac{\text{kg de lechada}}{\text{h}}$$

Siendo:

$$\dot{q}: \text{Flujo másico de lechada, } \frac{\text{kg de lechada}}{\text{día}}$$

$$\rho_{\text{lechada}}: \text{Densidad de la lechada, } \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

La densidad de lechada de cal al 6% fue hallada en Laboratorio de la planta de tratamiento de agua, es igual a $1025 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$.

Reemplazando los resultados obtenidos en la (Ec.4) se tiene:

$$\text{Flujo Vol. de lechada} = \frac{1652,4 \frac{\text{kg de lechada}}{\text{h}}}{1025 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}} = 1,6121 \frac{\text{m}^3 \text{ lechada}}{\text{h}}$$

E. Flujo volumétrico de agua utilizada en la lechada de cal

A partir de los anteriores cálculos, se determinó el flujo volumétrico de agua utilizada en la lechada se cal, por medio de las (Ec.5) y (Ec. 6):

$$\text{Ec. 5: } q = \frac{\text{Masa de agua utilizada en la lechada}}{\rho_{\text{agua}}}, \frac{\text{L}}{\text{s}}$$

Siendo:

Ec. 6: Masa de agua utilizada en la lechada = Masa de lechada –
Masa de $\text{Ca}(\text{OH})_2$

Reemplazando los datos en la (Ec. 6)

Masa de agua utilizada en la lechada = 37278,14 kg/día

Reemplazando los datos en la (Ec. 5) se obtiene:

$$q = 1,5533 \text{ m}^3/\text{h}$$

1.2. Cálculo de los parámetros para el Floculante AR-1032

A. Dosis de solución de floculante

El cálculo para hallar la dosis de la solución de floculante al 0,05%, se realizó en base a los resultados obtenidos en el capítulo 3, este valor nos sirvió para hallar el caudal necesario de solución de floculante para dosificar un flujo de 30 L/s de agua ácida de un efluente minero. Por tanto, se procedió a calcular, mediante la (Ec. 7):

$$\text{Ec. 7: } D = \frac{q \times C \times \text{FS}}{Q}, \frac{\text{mg floculante}}{\text{L efluente}}$$

Siendo:

q: Volumen de solución de floculante, ml

C: Concentración de solución de floculante, $\frac{\text{g Floculante}}{\text{ml Sol. de floculante}}$

FS: Factor de seguridad igual a 1,5

Q: Volumen de efluente a tratar, L

Reemplazando los datos en la (Ec. 7) se tiene:

$$D = 0,002625 \frac{\text{g Floculante}}{\text{L efluente}}$$

B. Consumo de floculante

La cantidad de floculante a consumir se calcula con la siguiente fórmula:

$$\text{Ec. 8: } \text{Consumo de Floc} = D \times Q, \frac{\text{kg}}{\text{día}}$$

Siendo:

D: Dosis de Sol. De Floculante, $\frac{\text{g Floculante}}{\text{L efluente}}$

Q: Caudal del afluente, $\frac{L \text{ efluente}}{s}$

Reemplazando los resultados obtenidos en la (Ec. 8) se tiene:

$$\text{Consumo de Floc} = 6,804 \frac{\text{kg Floc.}}{\text{día}}$$

C. Flujo másico de solución de floculante

Se calculó el flujo másico de solución de floculante, a partir de la (Ec. 9), teniendo en cuenta que la concentración de la lechada es $0,0005 \frac{\text{gfloc}}{\text{ml sol.floc}}$ y el consumo de floculante por día es 6,804 kg.

$$\text{Ec. 9: } \dot{q} = \frac{\text{Consumo de Floculante}}{\text{Concentración de sol.de floculante}}, \frac{\text{kg Sol.de Floculante}}{\text{día}}$$

Reemplazando los resultados obtenidos en la (Ec. 9) se tiene:

$$\dot{q} = 13608,0 \frac{\text{kg Sol. de Floculante}}{\text{día}}$$

D. Flujo volumétrico de la dilución del Floculante

Con los datos obtenidos anteriormente, se calculó el flujo volumétrico de la solución de floculante mediante la (Ec. 10):

$$\text{Ec. 10: Flujo Vol. de Sol. de Floculante} = \frac{q \times \frac{1}{24h}}{\rho_{\text{sol de floculante}}}, \frac{\text{kg de sol.floc}}{\text{día}}$$

Siendo:

$$\dot{q}: \text{Flujo másico de floculante, } \frac{\text{kg de sol.floculante}}{\text{día}}$$

$$\rho_{\text{lechada}}: \text{Densidad de la solución de floculante, } \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

La densidad fue hallada en el Laboratorio de planta de tratamiento es igual a $795 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$

Reemplazando los resultados obtenidos en la (Ec. 10) se tiene:

$$\text{Flujo Vol. de Sol. de Floc} = 0,7132 \frac{\text{m}^3 \text{ sol. floc}}{\text{h}}$$

E. Flujo volumétrico de agua utilizada en la dilución del floculante

A partir de los anteriores cálculos, se determinó el flujo volumétrico de agua utilizada en la lechada se cal, por medio de las (Ec. 11) y (Ec. 12):

$$\text{Ec. 11: } q = \frac{\text{Masa de agua utilizada en la sol. de floc.}}{\rho_{\text{agua}}}, \frac{\text{m}^3}{\text{h}}$$

Siendo:

$$\text{Ec.12: } \text{Masa de agua util. en la sol. de floc} = \text{Masa de sol. de floc.} - \text{Masa de Floculante}$$

Reemplazando los datos en la (Ec. 12)

$$\text{Masa de agua utilizada en la sol. de floc} = 13601,0 \text{ kg/día}$$

Reemplazando los datos en la (Ec. 11) se obtiene:

$$q = 0,5667 \text{ m}^3/\text{h}$$

1.3. Balance de masa

Se presenta el balance de masa para la mejora del sistema de tratamiento de aguas ácidas de un efluente minero.

Para estos fines se consideró al termino afluente (agua ácida sin tratar) y efluente (agua ácida tratada)

El balance de masa del sistema tiene los siguientes elementos: afluente, lechada de cal, solución de floculante, efluente, lodos y caliche.

$$\text{Ec. 13: } \text{Entrada} = \text{Salida}$$

$$\text{A (afluente)} + \text{Lechada de cal} + \text{Floculante} = \text{B (efluente)} + \text{Lodo} + \text{Caliche: Ec. 14}$$

A. Cálculo de lodo en el sistema

En cuanto para el cálculo de lodo generado se consideró lo siguiente: La formación del precipitado hidróxido de los metales, los sólidos totales que se encuentra en el afluente, el hidróxido de calcio que no reacciona en el proceso de neutralización y el floculante que no reacciona en el proceso.

Lodo generado por la oxidación del hierro, zinc, cadmio, arsénico, cobre y plomo. Se realiza el cálculo para el Hierro.



De la ecuación se tiene que los números de moles de hidróxido férrico son igual a los del ion ferroso, entonces:

$$\text{Ec.16: } n_{\text{Fe}^{2+}} = n_{\text{Fe}(\text{OH})_3}$$

$$\text{Ec. 17: } \frac{m_{\text{Fe}^{2+}}}{\bar{M}_{\text{Fe}^{2+}}} = \frac{m_{\text{Fe(OH)}_3}}{\bar{M}_{\text{Fe(OH)}_3}}$$

$$\text{Ec. 18: } m_{\text{Fe(OH)}_3} = \bar{M}_{\text{Fe(OH)}_3} \times \frac{m_{\text{Fe}^{2+}}}{\bar{M}_{\text{Fe}^{2+}}}$$

Reemplazando los datos en la (Ec. 18)

$$m_{\text{Fe(OH)}_3} = 107 \times \frac{249.238}{56} = 476.2 \frac{\text{mg}}{\text{L}} \cong 476.2 \text{ ppm}$$

De igual manera se realiza el cálculo para los hidróxidos de zinc, cadmio, arsénico, cobre y plomo obteniendo un total de 1263.3 ppm.

El lodo generado en el sistema por la oxidación de los metales en un flujo de $30 \frac{\text{L}}{\text{s}}$ de afluente calculamos en la Ec. 19

$$m_{\text{hidroxido metalico lodo}} = 1263,3 \frac{\text{mg}}{\text{L}} \times 30 \frac{\text{L}}{\text{s}} \times \frac{36000 \text{ s}}{1\text{h}} \times \frac{24\text{h}}{1\text{día}} \times \frac{1\text{kg}}{1000000\text{mg}} \text{ Ec. 19}$$

$$m_{\text{hidroxido metalico lodo}} = 3274,3 \frac{\text{kg hidroxido Metalico}}{\text{día}}$$

Lodo generado por los sólidos totales presentes en el afluente de flujo igual a $30 \frac{\text{L}}{\text{s}}$ calculamos en la Ec. 20

$$m_{\text{lodo}} = 394 \frac{\text{mg lodo}}{\text{L}} \times 30 \frac{\text{L}}{\text{s}} \times \frac{36000 \text{ s}}{1\text{h}} \times \frac{24\text{h}}{1\text{día}} \times \frac{1\text{kg}}{1000000\text{mg}} \text{ Ec. 20}$$

$$m_{\text{lodo por sólidos totales}} = 1021.2 \frac{\text{kg lodo}}{\text{día}}$$

Lodos generados por el hidróxido de calcio que no reacciono en el proceso de neutralización, llamado también formación de caliche.

Del tratamiento de datos de lechada de cal se tiene que el consumo de cal por agua tratada es de $0,918 \frac{\text{g Ca(OH)}_2}{\text{L}}$ y la eficiencia del proceso de mejora se consideró igual a 75%.

➤ El total de sólidos producidos por la cal:

$$m_{\text{cal}} = 2379.4 \frac{\text{kg Ca(OH)}_2}{\text{día}}$$

➤ Masa de cal que no reacciona y genera lodo es:

$$m_{\text{cal que genera lodo}} = 2379.4 \frac{\text{kg Ca(OH)}_2}{\text{día}} \times 25\% = 594.8 \frac{\text{kg Ca(OH)}_2}{\text{día}} \text{ Ec. 21}$$

➤ Lodos generados por el floculante que no reacciona en el proceso de floculación.

La cantidad de floculante por kilo de lodo seco es de $0.5 \frac{\text{g floculante}}{\text{kg de lodo seco}}$, valor referencial tomado de la Actual planta de tratamiento de aguas. Asimismo, el valor de cantidad de lodo seco es igual a $6675 \frac{\text{kg de lodo seco}}{\text{día}}$.

$$m_{\text{floc que no reacciona}} = 3,34 \frac{\text{kg floculante}}{\text{día}}$$

➤ Lodo total generado

Ec. 22:

$$\text{Lodo}_{\text{total}} = m_{\text{hidroxido metalico lodo}} + m_{\text{lodo por SST}} + m_{\text{cal que genera lodo}} + m_{\text{floc que no reacciona}}$$

$$\text{Lodo}_{\text{total}} = 13356.77 \frac{\text{kg lodo seco}}{\text{día}}$$

➤ Lodo húmedo generado

Del análisis realizado al lodo en el ensayo de laboratorio se tiene que el porcentaje de sólidos es igual a 8,5% y la densidad del lodo es 1100 kg/m³

Lodo húmedo generado en masa:

$$\text{Ec. 23: Lodo húmedo} = \text{Lodo Total} \times \frac{100}{\% \text{ sólidos}}$$

$$\text{Lodos húmedos} = 157138.50 \frac{\text{kg lodo húmedo}}{\text{día}}$$

Lodo húmedo generado en volumen:

$$\text{Ec. 24: Lodo húmedo} = \text{Lodo Total} \times \frac{100}{\% \text{ sólidos} \times \rho_{\text{lodo}}}$$

$$\text{Lodo húmedo} = 142.58 \frac{\text{m}^3 \text{ de lodo}}{\text{día}}$$

B. Balance de agua en el sistema

Para el balance de masa del agua en el sistema se consideró como entrada el agua utilizada para la dosificación de la cal y floculante asimismo el agua por tratar y como salida, el agua tratada, agua presente en el lodo y en la cal que no reacciona y las pérdidas de operación (evaporación).

Del sistema mostrado, se define las entradas y las salidas de la siguiente manera:

$$\text{Ec. 25: Entrada} = \text{Salida}$$

Reemplazamos en la (Ec. 25).

$$\text{Agua Total}_{\text{Ingreso}} = \text{Agua Total}_{\text{Salida}}$$

Entrada de agua:

Ec. 26:

$$\text{Agua Tot}_{\text{Ingr}} = \text{Agua acid}_{\text{día}} + \text{Agua neutr para cal}_{\text{día}} + \text{Agua neutr para floc}_{\text{día}}$$

Detallamos las entradas de agua en el sistema:

➤ Agua tratada diariamente

$$\text{Caudal de agua a tratar} = 30 \frac{\text{L}}{\text{s}} \cong 2592000 \frac{\text{L}}{\text{día}}$$

- Agua neutra para la dosificación de cal

Dato obtenido del tratamiento de datos para lechada de cal

$$\text{Caudal agua para dosificación de cal} = 0,918 \frac{\text{L}}{\text{s}} \cong 79315.2 \frac{\text{L}}{\text{día}}$$

- Agua neutra para la dosificación del floculante

Dato obtenido del tratamiento de datos para floculante

$$\text{Caudal agua para dosificación de floculante} = 0,1981 \frac{\text{L}}{\text{s}} \cong 17115.84 \frac{\text{L}}{\text{día}}$$

Reemplazamos los datos calculados en la (Ec. 26), siendo el agua total de ingreso 2688431 L/día

Salida de agua:

Ec.27:

$$\begin{aligned} \text{Agua Total}_{\text{salida}} &= \text{Caudal de agua a tratada}_{\text{día}} \\ &+ \text{Cant. de agua en el caliche}_{\text{día}} \\ &+ \text{Cant. de agua en el lodo}_{\text{día}} \\ &+ \text{Cant. de agua por perdidas en operacion}_{\text{día}} \end{aligned}$$

- Cantidad de agua en el hidróxido de calcio que no reacciona (caliche).

Dato de la planta, el porcentaje de sólidos por el residuo de cal es 80%

$$V_{\text{cal que genera agua}} = 2379,456 \frac{\text{kg Ca(OH)}_2}{\text{día}} \times \frac{20\%}{80\%} \times 1 \frac{\text{L}}{\text{kg}} = 594 \frac{\text{L}}{\text{día}} \text{ Ec. 28}$$

- Cantidad de agua en el lodo

$$Q_{\text{lodo}} = 1.65 \text{ L/s}$$

$$Q_{\text{lodo}} = 142560 \frac{\text{L}}{\text{día}}$$

- Cantidad de agua por perdidas en la operación evaporación se considera 7%

$$\text{Perdidas por evaporacion} = 181440 \frac{\text{L}}{\text{día}}$$

Reemplazamos los datos calculados en la (Ec. 25), siendo el agua total de salida máximo $2363837 \frac{\text{L}}{\text{día}} \triangleleft 27.359 \text{ L/s}$

2. Diseño de sedimentador

2.1. Dimensionamiento

Los criterios aplicados para el diseño del sedimentador son según la Norma Técnica de Edificación OS.090 Planta de Tratamiento de Aguas Residuales:

- Los requisitos de área se determinan usando la carga superficial entre los valores de 24– 60 m³/m²/ día basado en el caudal medio de diseño, lo cual equivale a una velocidad de sedimentación de 1,0 a 2,5 m/h

Del capítulo 2 se obtuvo una velocidad de sedimentación de 0.039 cm/s,

- Cálculo del área superficial de la unidad

$$\text{Ec. 29: } A_S = \frac{Q}{V_S}$$

Siendo:

V_S : Velocidad de sedimentación (m/s)

Q : Caudal de diseño (m³/s)

Reemplazando los datos en la Ec. 29, se obtiene:

$$A_S = \frac{0,03 \text{ m}^3/\text{s}}{0,00039 \text{ m/s}} = 76,92 \text{ m}^2$$

- Determinar las dimensiones de largo, ancho y altura de manera que se cumplan los criterios de diseño.

$$\text{Ec. 30: } L = \frac{A_S}{B}$$

Siendo:

B : Ancho del sedimentador de 4 m (Fuente: Actual planta de tratamiento)

Reemplazando en la (Ec. 30) se obtiene:

$$L_2 = \frac{76,92 \text{ m}^2}{4 \text{ m}} = 19.23 \text{ m}$$

Se asume la distancia de separación entre la entrada y la pantalla difusora

$$L_1 = 1 \text{ m}$$

Entonces longitud de la unidad $L=L_1+L_2= 20.23$ Ec. 31

Se verifica la relación Ec. 32: L/B debe estar en el rango de [3 – 10]

$$\frac{L}{B} = \frac{20,23 \text{ m}}{4 \text{ m}} = 5,06$$

Profundidad de $H= 3,85$ m (Fuente: Actual planta de tratamiento)

Se verifica la relación Ec. 33 : L/H debe estar en el rango de [5 – 30]

$$\frac{L}{H} = \frac{20,23 \text{ m}}{3,85 \text{ m}} = 5,25$$

- Determinar la velocidad horizontal, mediante la relación

$$\text{Ec. 34: } V_h = \frac{100 \times Q}{B \times H}$$

$$V_h = 0.195 \text{ m/s}$$

- Determinar el periodo de retención nominal, mediante la relación

$$\text{Ec. 35: } T_o = \frac{\text{Volumen}}{\text{Caudal}}$$

Siendo:

$$\text{Ec. 36: } \text{Volumen} = A_s \times H$$

Con una pendiente de 10% en el fondo de la unidad se tiene como altura máxima:

$$H_{\text{total}} = H + 0.1H = 4.24 \text{ m}$$

Reemplazando los datos en la (Ec. 36) con un factor de seguridad 50%

$$\text{Volumen} = 76,92 \text{ m}^2 \times 4,24 \text{ m} \times 1.5 = 488,65 \text{ m}^3$$

Reemplazando los datos en la (Ec. 35) se obtiene:

$$T_o = \frac{488,65 \text{ m}^3}{108 \text{ m}^3/\text{h}} \cong 4,52 \text{ h}$$

3. Diseño del tanque de lechada de cal

3.1. Criterios de diseño

Para definir los criterios de diseño se tomó en cuenta que es una mezcla de concentración al 6% y de poca viscosidad. Los criterios aplicados para el diseño fueron tomados de Mc Mabe

En la siguiente tabla se resume los datos obtenidos para la lechada de cal:

Densidad de la lechada de cal	1025 kg/m ³
Consumo de Ca (OH) ₂	2379.45 kgCa(OH) ₂ /día
Concentración de lechada de cal	6%

$$\text{Volumen de lechada de cal} = 25 \text{ m}^3$$

- El tanque será de forma cilíndrica y provista de un eje vertical, con un fondo de tanque redondeado con el fin de eliminar las regiones en las que no penetrarían las corrientes del fluido.
- El rodete va instalado sobre un eje suspendido, este mismo este accionado por un motor o través de una caja reductora de velocidad.

- El diseño del tanque será uno estándar de proceso con agitación tipo turbina. Para ello deben cumplir ciertas proporciones típicas, según Mc Cabe.

Relación de la altura del líquido en el tanque (H) y diámetro del tanque (D_t) es igual a 1.

Calculando el diámetro y la altura del tanque a partir que se considera para un diseño de tanque redondeado.

$$\text{Ec.37: } H = D_t = 3.1692$$

Relación del diámetro de agitador (D_a) y diámetro del tanque (D_t).

$$\text{Ec.38: } \frac{D_a}{D_t} = \frac{1}{3}$$

$$D_a = \frac{1}{3} \times 3.1692 = 1.0564 \text{ m}$$

Relación de la altura de la base al tanque (E) y diámetro del agitador (D_a).

$$\text{Ec. 39: } \frac{D_a}{E} = 1$$

$$D_a = E = 1,0564 \text{ m}$$

Relación de la altura de agitador (W) y diámetro del agitador (D_a)

$$\text{Ec. 40: } \frac{W}{D_a} = \frac{1}{5}$$

$$W = \frac{1}{5} \times 1,0564 = 0,211 \text{ m}$$

Relación del ancho del deflector (J) y diámetro del tanque (D_t).

$$\text{Ec. 41 : } \frac{J}{D_t} = \frac{1}{12}$$

$$J = \frac{1}{12} \times 3,1692 = 0,2641 \text{ m}$$

Relación del largo de la paleta del agitador (L) y diámetro del agitador (D_a)

$$\text{Ec. 42: } \frac{L}{D_a} = \frac{1}{4}$$

$$L = \frac{1}{4} \times 1,0564 = 0,2641 \text{ m}$$

- Asimismo, el tipo de agitador seleccionado es de turbina de 6 aspas planas, ya que son eficaces en líquidos pocos viscosos y producen corrientes

intensas que se extienden por todo el tanque y destruyen las masas de líquido estancado.

- Los agitadores tipo turbina generan corrientes radiales y tangenciales. El componente tangencial da lugar a vórtices y torbellinos, estos se evitarán por medio de placas deflectoras, con el fin que el agitador sea eficaz. Por este propósito se instalará 4 deflectores.
- El factor importante en el diseño de un recipiente de agitación es la potencia para mover el impulsor y para calcular ello, se necesita el número de Reynolds y su aplicación de gráficas, según Mc Cabe.

Número de Reynolds

$$\text{Ec.43: } N_{re} = \frac{(D_a)^2 \times N \times \rho}{\mu}$$

Dónde:

D_a : Diámetro del agitador, m

N : Velocidad de giro del agitador, rev/s

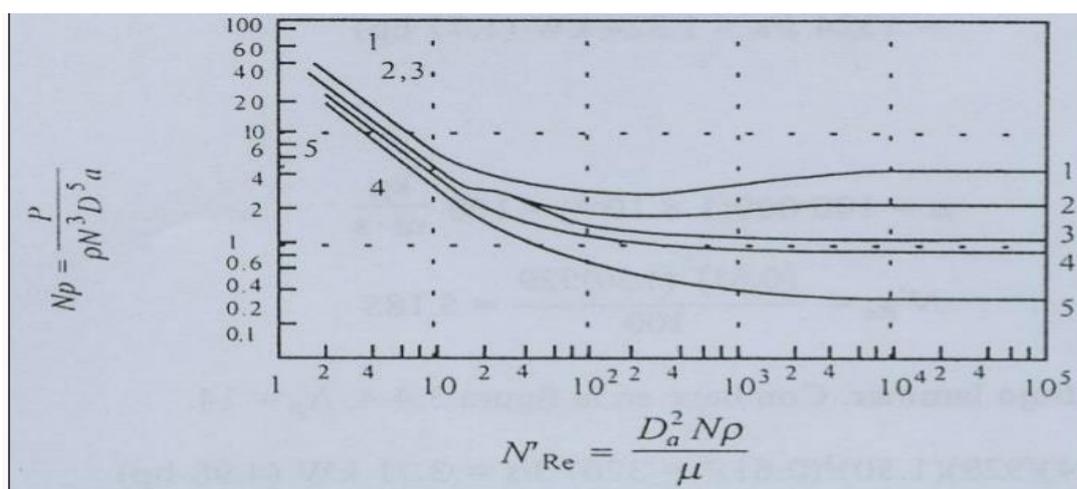
μ : Viscosidad dinámica del agua Pa, s

ρ : Densidad de la leche de cal, $\frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$

Reemplazando los datos obtenidos en la (Ec. 43):

$$N_{re} = 11421.2$$

De la figura siguiente: Gráfica de correlaciones de potencia para diversos impulsores y deflectores, se obtiene el Número de potencia (N_p)



Correlaciones de potencia para diversos impulsores y deflectores (véase las dimensiones D_a , D_t , J y W).

Curva 1. Turbina de seis aspas planas; $D_a/W = 5$; cuatro deflectores cada uno con $D_t/J = 12$.

Curva 2. Turbina abierta de seis aspas planas; $D_a/W = 8$; cuatro deflectores con $D_t/J = 12$.

Curva 3. Turbina abierta de seis aspas a 45° ; $D_a/W = 8$; cuatro deflectores con $D_t/J = 12$.

Curva 4. Propulsor; inclinación $2D_a$. cuatro deflectores con $D_t/J = 10$; también es válida para el mismo propulsor en posición angular y desplazado del centro sin deflectores.

Curva 5. Propulsor; inclinación = D_a . Cuatro deflectores con $D_t/J = 10$; también es válida para un propulsor en Posición angular desplazada del centro sin deflectores.

Con el Número de Reynolds 11421.2 en el eje X de la figura 32, trazamos una perpendicular a la curva N° 1, debido que el tipo de agitador es turbina de 6 aspas, obteniendo en el eje Y de la misma el Número de potencia.

$$\text{Ec.44: } Np = \frac{P}{\rho \times N^3 \times D_a^5}$$

Reemplazando los datos obtenidos en la Ec. 44, se obtiene:

$$\text{Potencia} = 11421,2 \text{ W} = 15,31 \text{ HP}$$

4. Diseño del tanque para la dilución del floculante AR-1032

4.1. Criterios de diseño

Para definir los criterios de diseño se tomó en cuenta que es una mezcla de concentración al 0,05% y de alta viscosidad. Los criterios aplicados para el diseño fueron tomados de Mc Cabe.

En la siguiente tabla se resume los datos obtenidos para la dilución del floculante AR-1032:

Densidad de la dilución del floculante	795 kg/m ³
Consumo de floculante AR 1032	6,804 kg floculante/día
Concentración de la dilución del floculante	0,05%
Volumen del tk de la dilucion del floculante = 15 m ³	

- El tanque será de forma cilíndrica y provista de un eje vertical, con un fondo de tanque redondeado con el fin de eliminar las regiones en las que no penetrarían las corrientes del fluido.
- El rodete va instalado sobre un eje suspendido, este mismo este accionado por un motor o través de una caja reductora de velocidad.
- El diseño del tanque será uno estándar de proceso con agitación tipo turbina. Para ello deben cumplir ciertas proporciones típicas, según Mc Cabe.

Relación de la altura del líquido en el tanque (H) y diámetro del tanque (D_t) es igual a 1.

Calculando el diámetro y la altura del tanque, se considera para un diseño de tanque redondeado.

$$\text{Ec. 45: } H = D_t = 2,67\text{m}$$

Relación del diámetro de agitador (D_a) y diámetro del tanque (D_t) .

$$\text{EC. 46: } \frac{D_a}{D_t} = \frac{1}{3}$$

$$D_a = \frac{1}{3} \times 2,67 = 0,89 \text{ m}$$

Relación de la altura de la base al tanque (E) y diámetro del agitador (D_a)

$$\text{Ec. 47: } \frac{D_a}{E} = 1$$

$$D_a = E = 0,89 \text{ m}$$

Relación de la altura de agitador (W) y diámetro del agitador (D_a) .

$$\text{Ec. 48: } \frac{W}{D_a} = \frac{1}{5}$$

$$W = \frac{1}{5} \times 0,89 = 0,17 \text{ m}$$

Relación del ancho del deflector (J) y diámetro del tanque (D_t).

$$\text{Ec. 49: } \frac{J}{D_t} = \frac{1}{12}$$

$$J = \frac{1}{12} \times 2,67 = 0,22 \text{ m}$$

Relación del largo de la paleta del agitador (L) y diámetro del agitador (D_a).

$$\text{Ec. 50: } \frac{L}{D_a} = \frac{1}{4}$$

$$L = \frac{1}{4} \times 0,89 = 0,22 \text{ m}$$

- Asimismo, el tipo de agitador seleccionado será de turbina de 6 aspas planas, ya que son eficaces en líquidos pocos viscosos y producen corrientes intensas que se extienden por todo el tanque y destruyen las masas de líquido estancado.
- Los agitadores tipo turbina generan corrientes radiales y tangenciales. El componente tangencial da lugar a vórtices y torbellinos, estos se evitarán por medio de placas deflectoras, con el fin que el agitador sea eficiente. Por este propósito se instalará 4 deflectores.
- El factor importante en el diseño de un recipiente de agitación es la potencia para mover el impulsor y para calcular ello, se necesita el número de Reynolds y su aplicación de gráficas, según Mc Cabe.

Número de Reynolds

$$\text{Ec.51: } N_{re} = \frac{(D_a)^2 \times N \times \rho}{\mu}$$

Dónde:

D_a : Diámetro del agitador, m

N : Velocidad de giro del agitador, rev/s

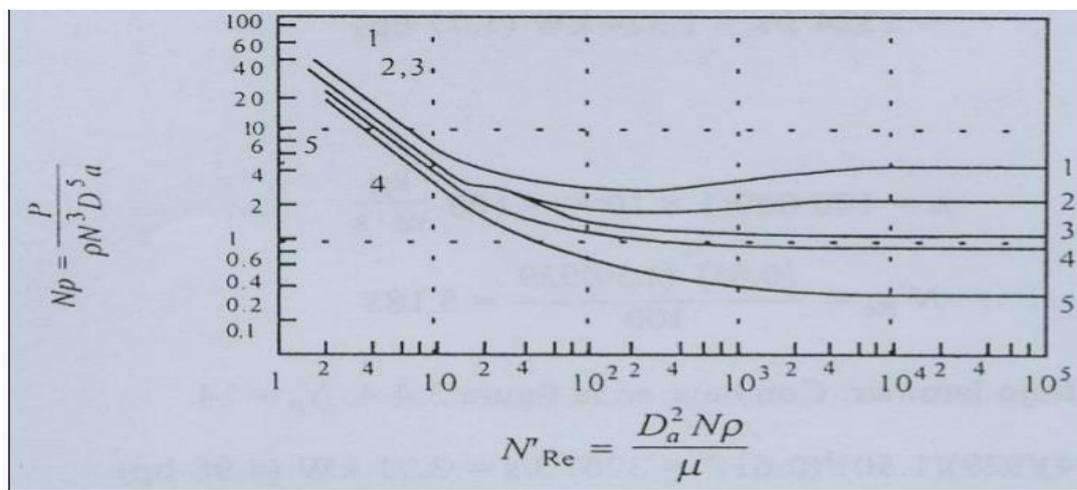
μ : Viscosidad dinámica del agua Pa, s

ρ : Densidad de la dilución del floculante, kg/m^3

Reemplazando los datos obtenidos en la (ec. 51):

$$N_{re} = 1524,9$$

De la siguiente figura: Gráfica de correlaciones de potencia para diversos impulsadores y deflectores, se obtiene el Número de potencia (N_p)



Correlaciones de potencia para diversos impulsadores y deflectores (véase las dimensiones D_a , D_t , J y W).

Curva 1. Turbina de seis aspas planas; $D_a/W = 5$; cuatro deflectores cada uno con $D_t/J = 12$.

Curva 2. Turbina abierta de seis aspas planas; $D_a/W = 8$; cuatro deflectores con $D_t/J = 12$.

Curva 3. Turbina abierta de seis aspas a 45° ; $D_a/W = 8$; cuatro deflectores con $D_t/J = 12$.

Curva 4. Propulsor; inclinación $2D_a$. cuatro deflectores con $D_t/J = 10$; también es válida para el mismo propulsor en posición angular y desplazado del centro sin deflectores.

Curva 5. Propulsor; inclinación = D_a . Cuatro deflectores con $D_t/J = 10$; también es válida para un propulsor en Posición angular desplazada del centro sin deflectores.

Con el Número de Reynolds 1524,9 en el eje X de la figura 28, trazamos una perpendicular a la curva N° 1, debido que el tipo de agitador es turbina de 6 aspas, obteniendo en el eje Y de la misma el Número de potencia.

$$\text{Ec.52: } N_p = \frac{P}{\rho \times N^3 \times D_a^5}$$

Reemplazando los datos obtenidos en la (Ec. 52), se obtiene:

$$\text{Potencia} = 7604,45 \text{ W} = 10,19\text{HP}$$

5. Diseño del tanque reactor

5.1. Criterios de diseño

Para definir los criterios de diseño se tomó en cuenta que es una mezcla de lechada de cal y agua de mina de poca viscosidad. Los criterios aplicados para el diseño fueron tomados de Mc Mabe

$$\text{Volumen del tanque reactor} = 34 \text{ m}^3$$

- El tanque será de forma cilíndrica y provista de un eje vertical, con un fondo de tanque redondeado con el fin de eliminar las regiones en las que no penetrarían las corrientes del fluido.
- El rodete va instalado sobre un eje suspendido, este mismo este accionado por un motor o través de una caja reductora de velocidad.
- El diseño del tanque será uno estándar de proceso con agitación tipo turbina. Para ello deben cumplir ciertas proporciones típicas, según Mc Cabe.

Relación de la altura del líquido en el tanque (H) y diámetro del tanque (D_t) es igual a 1.

Calculando el diámetro y la altura del tanque a partir que se considera para un diseño de tanque redondeado.

$$\text{Ec.53: } H = D_t = 3.51$$

Relación del diámetro de agitador (D_a) y diámetro del tanque (D_t).

$$\text{Ec.54: } \frac{D_a}{D_t} = \frac{1}{3}$$

$$D_a = 1,17 \text{ m}$$

Relación de la altura de la base al tanque (E) y diámetro del agitador (D_a).

$$\text{Ec. 55: } \frac{D_a}{E} = 1$$

$$D_a = E = 1,17 \text{ m}$$

Relación de la altura de agitador (W) y diámetro del agitador (D_a)

$$\text{Ec. 56: } \frac{W}{D_a} = \frac{1}{5}$$

$$W = 0,234 \text{ m}$$

Relación del ancho del deflector (J) y diámetro del tanque (D_t).

$$\text{Ec. 57 : } \frac{J}{D_t} = \frac{1}{12}$$

$$J = \frac{1}{12} \times 3,51 = 0,29 \text{ m}$$

Relación del largo de la paleta del agitador (L) y diámetro del agitador (D_a)

$$\text{Ec. 58: } \frac{L}{D_a} = \frac{1}{4}$$

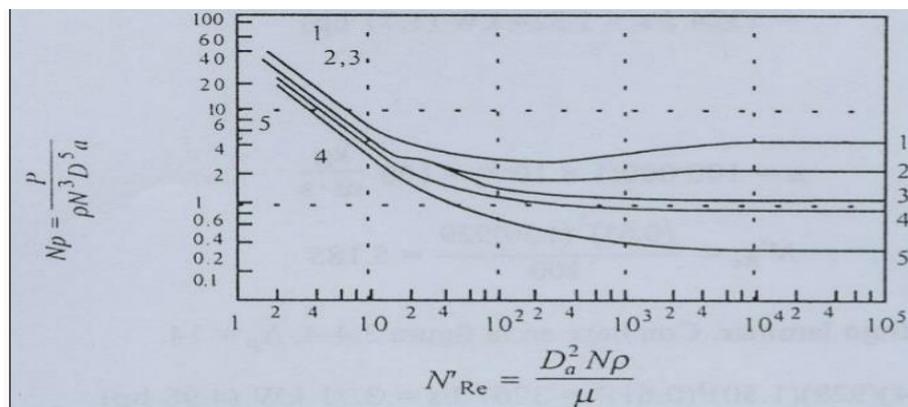
$$L = 0,29 \text{ m}$$

- Asimismo, el tipo de agitador seleccionado es de turbina de 6 aspas planas, ya que son eficaces en líquidos pocos viscosos y producen corrientes intensas que se extienden por todo el tanque y destruyen las masas de líquido estancado.
- Los agitadores tipo turbina generan corrientes radiales y tangenciales. El componente tangencial da lugar a vórtices y torbellinos, estos se evitarán por medio de placas deflectoras, con el fin que el agitador sea eficaz. Por este propósito se instalará 4 deflectores.
- El factor importante en el diseño de un recipiente de agitación es la potencia para mover el impulsor y para calcular ello, se necesita el número de Reynolds y su aplicación de gráficas, según Mc Cabe.

Número de Reynolds

$$\text{Ec.59: } N_{re} = \frac{(D_a)^2 \times N \times \rho}{\mu}$$

De la siguiente figura : Gráfica de correlaciones de potencia para diversos impulsores y deflectores, se obtiene el Número de potencia (N_p)



Correlaciones de potencia para diversos impulsores y deflectores (véase las dimensiones D_a , D_t , J y W).
Curva 1. Turbina de seis aspas planas; $D_a/W = 5$; cuatro deflectores cada uno con $D_t/J = 12$.
Curva 2. Turbina abierta de seis aspas planas; $D_a/W = 8$; cuatro deflectores con $D_t/J = 12$.
Curva 3. Turbina abierta de seis aspas a 45° ; $D_a/W = 8$; cuatro deflectores con $D_t/J = 12$.
Curva 4. Propulsor; inclinación $2D_a$. cuatro deflectores con $D_t/J = 10$; también es válida para el mismo propulsor en posición angular y desplazado del centro sin deflectores.
Curva 5. Propulsor; inclinación = D_a . Cuatro deflectores con $D_t/J = 10$; también es válida para un propulsor en Posición angular desplazada del centro sin deflectores.

El Número de Reynolds en el eje X de la figura 29, trazamos una perpendicular a la curva N° 1, debido que el tipo de agitador es turbina de 6 aspas, obteniendo en el eje Y de la misma el Número de potencia.

$$\text{Ec.60: } N_p = \frac{P}{\rho \times N^3 \times D_a^5}$$

Reemplazando los datos obtenidos en la Ec. 60, se obtiene:

$$\text{Potencia} = 20,43 \text{ HP}$$

ANEXO N°5

✓ Resultados de Laboratorio Químico



LABORATORIO QUIMICO

INFORME DE ENSAYO

CLIENTE	Ing. Carina de la Cruz Garcia
CANTIDAD DE MUESTRAS	06
ENSAYO	Analisis de metales totales Pruebas determinando la pureza de
CARACTERISTICA DE LA MUESTRA	hidroxido de calcio
PROCEDENCIA	Aija-Huaraz
FECHA DE RECEPCIÓN	05/01/2021
FECHA DE REPORTE	06/01/2021

Parametro	METALES TOTALES					pH
	Cu	Pb	Zn	As	Fe	
Unidad	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	pH
Agua de mina	3.695	4.24	495.03	13.62	249.24	3.20
Prueba N°01	0.0240	0.1110	0.3190	0.1870	0.1380	9.00
Prueba N°02	0.0230	0.1420	0.3010	0.1170	0.1440	9.00
Prueba N°03	0.0120	0.1620	0.4500	0.1840	0.1450	8.67
Prueba N°04	0.0090	0.1670	0.3000	0.0370	0.1430	8.30
Prueba N°05	0.0200	0.1660	0.3100	0.0590	0.1460	8.43

Jefe de Laboratorio Químico



LABORATORIO QUIMICO

INFORME DE ENSAYO

CLIENTE	Ing. Carina de la Cruz Garcia
CANTIDAD DE MUESTRAS	06
ENSAYO	Análisis de aguas
CARACTERÍSTICA DE LA MUESTRA	Prueba determinación de PH optimo
PROCEDENCIA	Aija . Huaraz
FECHA DE RECEPCIÓN	17/02/2021
FECHA DE REPORTE	18/02/2021

Parametro	METALES TOTALES						METAL DISUELTO
	PH	Cu	Pb	Cd	Zn	As	Fe
Unidad	PH	(mg/L)	(mg/L)	(mg/L)	(mg/L)	(mg/L)	(mg/L)
Prueba N°01	7,5	0.0234	0.1050	0.3820	0.1418	0.0545	0.0943
Prueba N°02	8,0	0.0197	0.0980	0.2001	0.0463	0.0396	0.0333
Prueba N°03	8,2	0.0167	0.0060	0.1032	0.0238	0.0375	0.0195
Prueba N°04	8,45	0.0145	0.0049	0.0603	0.0214	0.0364	0.0183
Prueba N°05	8,75	0.0101	0.0029	0.0423	0.2167	0.0328	0.0173
Prueba N°06	9,0	0.0125	0.0079	0.0276	0.0205	0.0314	0.0083

Jefe de Laboratorio Químico



LABORATORIO QUIMICO

INFORME DE ENSAYO

CLIENTE	<i>Ing. Carina de la Cruz Garcia</i>
CANTIDAD DE MUESTRAS	04
ENSAYO	<i>Analisis de aguas</i>
CARACTERISTICA DE LA MUESTRA	<i>Determinacion de la concentracion de lechada de cal</i>
PROCEDENCIA	<i>Aija . Huaraz</i>
FECHA DE RECEPCIÓN	22/02/2021
FECHA DE REPORTE	23/02/2021

Parametro	Concentracion lechada de cal	METALES TOTALES				
		Cu	Pb	Zn	Fe	As
Unidad		(mg/L)	(mg/L)	(mg/L)	(mg/L)	(mg/L)
Prueba N°01	2%	0.024	0.116	0.764	0.987	1.001
Prueba N°02	4%	0.021	0.127	0.947	0.727	0.059
Prueba N°03	6%	0.020	0.124	0.525	0.576	0.037
Prueba N°04	8%	0.033	0.092	0.974	0.645	0.184

Jefe de Laboratorio Quimico

HUANCAPETI, 23 de Febrero - 2021.



LABORATORIO QUIMICO

INFORME DE ENSAYO

CLIENTE	Ing. Carina de la Cruz Garcia
CANTIDAD DE MUESTRAS	10
ENSAYO	Analisis de aguas
CARACTERISTICA DE LA MUESTRA	Determinacion de concentracion de solucion de floculante
PROCEDECENCIA	Aija . Huaraz
FECHA DE RECEPCIÓN	08/03/2021
FECHA DE REPORTE	09/03/2021

Parametro	Concentracion solucion de floculante	METALES TOTALES					
		Cu (mg/L)	Pb (mg/L)	Cd (mg/L)	Zn (mg/L)	Fe (mg/L)	As (mg/L)
Prueba N°01	0.005%	0.0416	0.1804	0.0671	1.751	0.9005	0.2600
Prueba N°02	0.01%	0.0315	0.1118	0.0586	1.643	0.8013	0.1067
Prueba N°03	0.02%	0.0247	0.1165	0.0402	1.514	0.8009	0.1140
Prueba N°04	0.03%	0.0218	0.0172	0.0453	1.529	0.6005	0.1052
Prueba N°05	0.04%	0.0119	0.0082	0.0586	1.504	0.5003	0.1030
Prueba N°06	0.05%	0.0103	0.0015	0.0178	1.321	0.3001	0.0724
Prueba N°07	0.06%	0.0099	0.0011	0.0290	1.236	0.3002	0.0810
Prueba N°08	0.08%	0.0081	0.0138	0.0206	1.372	0.3011	0.0845
Prueba N°09	0.10%	0.0012	0.0105	0.0282	1.402	0.3501	0.0755
Prueba N°10	0.20%	0.0013	0.0120	0.0237	1.387	0.3201	0.0736

Jefe de Laboratorio Químico

HUANCAPETI , 09 de Marzo - 2021.



LABORATORIO QUIMICO

INFORME DE ENSAYO

CLIENTE	Ing. Carina de la Cruz Garcia
CANTIDAD DE MUESTRAS	06
ENSAYO	Analisis de aguas
CARACTERISTICA DE LA MUESTRA	Dosis de floculante
PROCEDENCIA	Aija . Huaraz
FECHA DE RECEPCIÓN	15/03/2021
FECHA DE REPORTE	16/03/2021

Parametro	Dosis de floculante	METALES TOTALES					
		Cu	Pb	Cd	Zn	Fe	As
Unidad		(mg/L)	(mg/L)	(mg/L)	(mg/L)	(mg/L)	(mg/L)
Prueba N°01	1.5ml	0.0406	0.1704	0.0498	1492.0	0.8005	0.0921
Prueba N°02	2 ml	0.0302	0.1018	0.0426	1403.0	0.7026	0.0870
Prueba N°03	3.5ml	0.0100	0.0125	0.0163	1232.0	0.4800	0.0540
Prueba N°04	5ml	0.0118	0.0152	0.0353	1342.0	0.5005	0.0852
Prueba N°05	7ml	0.0127	0.0160	0.0383	1404.0	0.6003	0.0930
Prueba N°06	10ml	0.0136	0.0185	0.0203	1484.0	0.6009	0.0978

Jefe de Laboratorio Químico.

HUANCAPETI , 16 de Marzo - 2021.



LABORATORIO QUÍMICO

INFORME DE ENSAYO

CLIENTE	Ing. Carina de la Cruz Garcia
CANTIDAD DE MUESTRAS	12
ENSAYO	Análisis de aguas
CARACTERÍSTICA DE LA MUESTRA	Determinación de velocidad de agitación y tiempo de floculación
PROCEDENCIA	Aija . Huaraz
FECHA DE RECEPCIÓN	24/03/2021
FECHA DE REPORTE	25/03/2021

Parametro	Velocidad	Tiempo	METALES TOTALES					
			Cu	Pb	Cd	Zn	Fe	As
Unidad	RPM	min	(mg/L)	(mg/L)	(mg/L)	(mg/L)	(mg/L)	(mg/L)
Prueba N°01	20	5	0.0042	0.0511	0.0053	0.0245	0.0198	0.0001
Prueba N°02		10	0.0059	0.0361	0.0026	0.0108	0.0134	0.0008
Prueba N°03		15	0.0103	0.0392	0.0010	0.0764	0.0046	0.0004
Prueba N°04	30	5	0.0066	0.0095	0.0024	0.0503	0.0124	0.0002
Prueba N°05		10	0.0059	0.0631	0.0062	0.0181	0.1201	0.0001
Prueba N°06		15	0.0092	0.0245	0.0074	0.0765	0.0165	0.0002
Prueba N°07	40	5	0.0035	0.0008	0.0106	0.0267	0.0254	0.0005
Prueba N°08		10	0.0061	0.0207	0.0110	0.0634	0.0102	0.0003
Prueba N°09		15	0.0083	0.0293	0.0107	0.0345	0.0123	0.0002
Prueba N°10	60	5	0.0084	0.0462	0.0087	0.0383	0.0101	0.0007
Prueba N°11		10	0.0111	0.0003	0.0119	0.0005	0.0217	0.0001
Prueba N°12		15	0.0127	0.0023	0.0107	0.0272	0.0306	0.0001

Jefe de Laboratorio Químico.

HUANCAPETI, 25 de Marzo - 2021.



LABORATORIO QUÍMICO

INFORME DE ENSAYO

CLIENTE	Ing. Carina de la Cruz García
CANTIDAD DE MUESTRAS	02
ENSAYO	Análisis de aguas
CARACTERÍSTICA DE LA MUESTRA	Muestras con los parámetros óptimos
PROCEDECENCIA	Aija . Huaraz
FECHA DE RECEPCIÓN	08/04/2021
FECHA DE REPORTE	09/04/2021

METALES DISUELTOS							
Parametro	PH	Cu	Pb	Cd	Zn	Fe	As
Unidad	PH	(mg/L)	(mg/L)	(mg/L)	(mg/L)	(mg/L)	(mg/L)
Muestra sin tratar	3.200	-	-	-	-	9.1080	-
Muestra tratada	8.690	-	-	-	-	0.0001	-

Parametro	METALES TOTALES						
	TSS	Cu	Pb	Cd	Zn	Fe	As
Unidad	(mg/L)	(mg/L)	(mg/L)	(mg/L)	(mg/L)	(mg/L)	(mg/L)
Muestra sin tratar	398.0000	3.6950	4.2390	1.3570	495.0250	249.2380	13.6210
Muestra tratada	4.0000	0.0039	0.0002	0.0022	0.0228	0.3204	0.0002

Jefe de Laboratorio Químico

HUANCAPETI , 09 de Abril - 2021.



LABORATORIO QUIMICO

INFORME DE ENSAYO

CLIENTE	Ing. Carina de la Cruz Garcia
CANTIDAD DE MUESTRAS	03
ENSAYO	Análisis de aguas
CARACTERÍSTICA DE LA MUESTRA	Muestra tratamiento actual
PROCEDENCIA	Aija - Huaraz
FECHA DE RECEPCIÓN	15/04/2021
FECHA DE REPORTE	16/04/2021

Parametro	METALES DISUELTO						
	TSS	Cu	Pb	Cd	Zn	Fe	As
Unidad	(mg/L)	(mg/L)	(mg/L)	(mg/L)	(mg/L)	(mg/L)	(mg/L)
Muestra sin tratar	-	-	-	-	-	9.108000	-
Muestra tratada actual	-	-	-	-	-	-	-
Muestra tratada parámetros óptimos	-	-	-	-	-	0.000109	-

Parametro	PH	METALES TOTALES						
		TSS	Cu	Pb	Cd	Zn	Fe	As
Unidad	PH	(mg/L)	(mg/L)	(mg/L)	(mg/L)	(mg/L)	(mg/L)	(mg/L)
Muestra sin tratar	3.2	398.0000	3.6950	4.2390	1.3570	495.0250	249.2380	13.6210
Muestra tratada actual	8.1	67.0000	0.3100	0.2100	0.2300	1.7600	1.4500	0.1300
Muestra tratada parámetros óptimos	8.69	4.0000	0.0039	0.0002	0.0022	0.0228	0.3204	0.0002

Jefe de Laboratorio Químico.

HUANCAPETI, 16 de Abril - 2021.

ANEXO N°5: Formulario de autorización



Ley N° 30035
Respositorio Nacional Digital



**UNIVERSIDAD
NACIONAL DE
INGENIERIA**

**FORMULARIO DE AUTORIZACIÓN PARA LA PUBLICACIÓN
ELECTRÓNICA EN EL PORTAL DEL REPOSITORIO INSTITUCIONAL
DE LA UNI**

1. DATOS PERSONALES

Apellidos y nombres: De la Cruz García, Carina Jhanina

D.N.I: 45156116

Teléfono casa: - celular: 979 388 235

Correos electrónicos: cdelacruzg@uni.pe

2. DATOS ACADÉMICOS

Grado académico: Bachiller

Mención: Ingeniería Química

3. DATOS DE LA TESIS

Título: "OPTIMIZACIÓN DE LA PLANTA DE TRATAMIENTO DEL AGUA DE MINA PARA REMOVER ARSÉNICO Y CADMIO CUMPLIENDO CON LA CATEGORÍA 3 EN EL CUERPO RECEPTOR CONVERGENTE AL RÍO SANTA"

Año de publicación: 2024

A través del presente, autorizo a la Biblioteca Central de la Universidad Nacional de Ingeniería, la publicación electrónica a texto completo en el Repositorio Institucional, el citado título.

Firma:

Fecha de recepción: 15/11/2024

ANEXO N°6: Currículum Vitae

Currículum Vitae



DETALLES PERSONALES

Nombre

Carina Jhanina de la Cruz García

Dirección

Lima

Número de teléfono

+51 979388235

Correo electrónico

cdelacruzg@uni.pe

Fecha de nacimiento

19/02/1988

Nacionalidad

Peruana

N° CIP 214601

EDUCACION SUPERIOR

Universidad Nacional de Ingeniería**Abril 2019 – Feb. 2021***Maestría en Minería y Medio Ambiente***Universidad Nacional de Ingeniería****2008 – 2014***Ingeniero Químico*

ESPECIALIZACION

Autoridad Nacional del Agua - CARE**Mayo 2024 – Noviembre 2024***Huella Hídrica para MYPES***Pontificia Universidad Católica del Perú****Marzo a Julio 2024***Gestión de Operaciones Mineras***Universidad Nacional de Trujillo - CELAEP****2015***Gestión de cierre de minas y Remediación de pasivos ambientales mineros.***Universidad Nacional José Faustino Sánchez Carrión. - CAPMEN****2014***Sistemas Integrados de Gestión de la calidad, ambiental, seguridad y salud ocupacional y Responsabilidad Social.*

PERFIL

Ingeniera Química Titulada y Colegiada de la Universidad Nacional de Ingeniería con maestría en Minería y Medio Ambiente, con más de ocho (08) años de experiencia en Medio Ambiente en el Sector Minero con especialización en Gestión de recursos Hídricos, Operación y Mantenimiento de Plantas de tratamiento de aguas, Gestión de Residuos Sólidos, Monitoreo Ambiental, Plan de cierre de minas y Pasivos Ambientales Mineros, Cálculo de huella hídrica, Atención de autoridades ambientales, Licencias de uso de agua, Remediación Ambiental, Auditoría Interna y Externa, Implementación y seguimiento al Sistema de Gestión Ambiental, calidad y Seguridad

Me considero con habilidades en Mejora Continua, optimización de recursos, trabajo en equipo y responsable con capacidad de análisis, manejo de conflictos, relaciones interpersonales

EXPERIENCIA LABORAL

- Julio 2024 – Actualidad **Supervisor líder de Plantas de tratamiento de aguas Corporativo**
RIVL WATER, LIMA
- Nov 2021 – Feb 2024 **Ingeniero de Medio Ambiente**
NEXA RESOURCES SA - UNIDAD MINERA ATACOCHA, CERRO DE PASCO
- Abril 2021 – Oct. 2021 **Supervisor de Medio Ambiente**
AJANI SAC- UNIDAD TUCARI, MOQUEGUA
- Abril 2019 – dic. 2020 **Supervisor de Medio Ambiente**
COMPAÑÍA MINERA LINCUNA SA, HUARAZ
- Jun. 2018 – Mar 2019 **Analista de sistema de gestión calidad, ambiental y seguridad**
PALMAS DEL ESPINO - GRUPO PALMAS, TOCACHE
- Jun 2015 – Set. 2017 **Asistente del departamento de asuntos ambientales**
ACTIVOS MINEROS SAC, LIMA
- Set. 2014 – May. 2015 **Asistente de gestión de calidad**
ACTIVOS MINEROS SAC, LIMA

FORMACION COMPLEMENTARIA

Instituto Minero del Pacifico 2024*Manejo de RR. SS en los aspectos fiscalizables por el OEFA***Centro de Especialización Ambiental 2017***Monitoreo Ambiental; agua, aire y suelo***Instituto Minero del Pacifico 2017***Tratamiento de Agua acida en Minería***Centro de Especialización Ambiental 2015***Monitoreo de la Calidad de los Suelos***Colegio de Ingenieros del Perú 2015***Aplicación de Tecnologías de Auditoría Ambiental en la Industria Minera.***Pontificia Universidad Católica del Perú 2015***Instrumentos de Gestión Ambiental, Aspectos Legales, Sector minero.*

CONOCIMIENTOS

Word, Excel, Power Point, MS Project, AutoCAD, Goldsim
Software: ERP, SAP, ARGIS, BIOSAL, SMAD, GEORGE

Curriculum Vitae



PERSONAL DETAILS

Name

Carina Jhanina de la Cruz García

Address

Lima

Phone number

+51 979388235

E-mail address

odelacruzg@uni.pe

Date of birth

19/02/1988

Nationality

Peruvian

CIP No 214601

HIGHER EDUCATION

National University of Engineering

April 2019 - Feb. 2021

Maestría on Minaria and Environment

National University of Engineering

2008 – 2014

Chemical Engineer

SPECIALIZATION

National Water Authority -
CARE

May 2024 - November 2024

Water Footprint for MYPES

Pontifical Catholic University

from Peru March to July 2024

Management of Mining Operations

National University of Trujillo -

CELAEP 2015

Mine closure management and

Remediation of environmental liabilities
miners.

Universidad Nacional José

Faustino Sánchez Carrión.-

CAPMEN 2014

Integrated Management Systems of the
quality, environmental, safety and health
occupational and Social ResponsatWotad.

PROFILE

Chemical Engineer Degree and Collegiate of the National University of Engineering with a Master's degree in Mining and Environment, with more than eight (08) years of Environmental experience in the Sector Miner with specialization in Water Resources Management, Operation and Maintenance of water Treatment, Solid Waste Management, Environmental Monitoring, mine Closure NFP and Mining Environmental Liabilities, Water footprint Calculation, AU Attention environmental authorities, Water Use Licenses, Environmental Remediation, Internal and External Audit, Implementation and monitoring of the Environmental, Quality and Safety Management System

I consider myself with skills in Continuous Improvement, resource optimization, teamwork and responsible with the ability to analyze, manage conflicts, interpersonal relationships

WORK EXPERIENCE

July 2024 - News Lead Supervisor of Water treatment Plants Corporate
RML WATER, LIMA

Nov 2021 - Feb 2024 Environmental Engineer
NEXA RESOURCES SA- UNIDAD HINERA, ATACCOCHA, CERRO DE PASCO

April 2021 - Oct. 2021 Environmental Supervisor
AJANI SAC- UNIDAD TUCARL, MOQUEGUA

All 2019 -de 2000 Environmental Supervisor
MINING COMPANY LINCUNA SA, HUARAZ

Jun. 2018 - Mar 2019 Quality, environmental and safety management system analyst
PALMAS DEL ESPINO - GRUPO PALMAS, TOCACHE

Jun 2015 -Set 2017 Assistant to the Department of Environmental affairs
ACTIVOS MINEROS SAC, LIMA

Set. 2014 - May. 2015 Quality management Assistant
ACTIVOS MINEROS SAC, LIMA

COMPLEMENTARY TRAINING

Pacific Mining Institute 2024

Management of RR. SS in the aspects controllable by the OEFA

Center of Environmental Specialization 2017

Monitoring environmental water, air and soil

Pacific Mining Institute 2017

Acid water treatment in Mining

Center of Environmental Specialization 2015

Monitoring of Soil Quality

College of Engineers of Peru 2015

Application of Environmental Audit Technologies in the Mining Industry.

Pontifical Catholic University of Peru 2015

Environmental Management Instruments, Legal Aspects, Sector miner.

KNOWLEDGE

Word, Excel, Powerpoint, MS Project, AutoCAD, Goldsim
Software: ERP, SAP, ARGIS, BIOSAL, SMAD, GEORGE