

UNIVERSIDAD NACIONAL DEL CALLAO
FACULTAD DE INGENIERÍA AMBIENTAL Y DE RECURSOS NATURALES
ESCUELA DE POSGRADO
UNIDAD DE POSGRADO



**“TRATAMIENTO CONVENCIONAL CON UNA ETAPA
ADICIONAL DE SULFURACIÓN PARA EL DRENAJE ÁCIDO DE
MINA DE LA UNIDAD MINERA CERRO DE PASCO DEL
DISTRITO DE SIMÓN BOLÍVAR, PASCO”**

TESIS PARA OPTAR EL GRADO ACADÉMICO DE MAESTRO EN GESTIÓN
AMBIENTAL PARA EL DESARROLLO SOSTENIBLE

SERGIO ROJAS RIMACHI

ASESOR: MÁXIMO FIDEL BACA NEGLIA

Two handwritten signatures in black ink are positioned to the right of the author and advisor names. The top signature is for Sergio Rojas Rimachi, and the bottom one is for Máximo Fidel Baca Neglia.

LÍNEA DE INVESTIGACIÓN: CIENCIAS DE LA TIERRA Y DEL AMBIENTE

Callao, 2023

PERÚ

INFORMACIÓN BÁSICA

FACULTAD:

INGENIERÍA AMBIENTAL Y DE RECURSOS NATURALES

UNIDAD DE INVESTIGACIÓN:

UNIDAD DE POSGRADO DE LA FACULTAD DE INGENIERÍA AMBIENTAL Y DE RECURSOS NATURALES

TÍTULO:

TRATAMIENTO CONVENCIONAL CON UNA ETAPA ADICIONAL DE SULFURACIÓN PARA EL DRENAJE ÁCIDO DE MINA DE LA UNIDAD MINERA CERRO DE PASCO DEL DISTRITO DE SIMÓN BOLÍVAR, PASCO – 2022

AUTOR:

SERGIO ROJAS RIMACHI ORCID ID: 0000-0001-9232-8721 DNI: 07361322

ASESOR:

MÁXIMO FIDEL BACA NEGLIA ORCID ID: 0000-0002-6892-7633 DNI: 25436367

LUGAR DE EJECUCIÓN:

EN LOS LABORATORIOS DE ANÁLISIS QUÍMICO E INSTRUMENTAL DE TECSUP – LIMA

UNIDAD DE ANÁLISIS:

DRENAJE ÁCIDO DE MINA

TIPO / ENFOQUE / DISEÑO DE INVESTIGACIÓN:

APLICATIVA / CUANTITATIVA / EXPERIMENTAL

TEMA OCDE:

1.05.08 CIENCIAS DEL MEDIO AMBIENTE

HOJA DE REFERENCIA DEL JURADO Y APROBACIÓN

MIEMBROS DEL JURADO DE SUSTENTACIÓN

- DR. EDUARDO VALDEMAR TRUJILLO FLORES PRESIDENTE
- MTRO. CARLOS ODORICO TOME RAMOS SECRETARIO
- DR. ENRIQUE GUSTAVO GARCÍA TALLEDO VOCAL
- MG. LUIS ENRIQUE LOZANO VIEYTES VOCAL

ASESOR:

DR. MÁXIMO FIDEL BACA NEGLIA / CÓDIGO ORCID 0000-0002-6892-7633 / DNI 25436367

N° DE LIBRO : 01

N° DE FOLIO : 10

N° DE ACTA : 007

FECHA DE APROBACIÓN DE LA TESIS : 23 DE SETIEMBRE DE 2023



UNIVERSIDAD NACIONAL DEL CALLAO
FACULTAD DE INGENIERIA AMBIENTAL Y DE RECURSOS NATURALES
Unidad de Posgrado - Investigación

CONSTANCIA DE ANTIPLAGIO N° 006-2023-OUR/URK –
UPG FIARN

LA UNIDAD DE POSGRADO DE LA FACULTAD DE INGENIERÍA AMBIENTAL Y DE RECURSOS NATURALES DE LA UNIVERSIDAD NACIONAL DEL CALLAO, QUE SUSCRIBE:

HACE CONSTAR

QUE, EL BACHILLER:

ROJAS RIMACHI, Sergio

DE LA MAESTRÍA EN “GESTIÓN AMBIENTAL PARA EL DESARROLLO SOSTENIBLE”, HA PRESENTADO SU TESIS TITULADA: “TRATAMIENTO CONVENCIONAL CON UNA ETAPA ADICIONAL DE SULFURACIÓN PARA EL DRENAJE ÁCIDO DE MINA DE LA UNIDAD MINERA CERRO DE PASCO DEL DISTRITO DE SIMÓN BOLÍVAR, PASCO”, PARA LA EVALUACIÓN ANTIPLAGIO ORIGINAL, OBTENIENDO COMO RESULTADO 12% DE SIMILITUD, SEGÚN EL DOCUMENTO N° D173272174, ESTANDO DENTRO DEL PORCENTAJE PERMITIDO (MÁXIMO 20%, ESTABLECIDO EN LA DIRECTIVA N° 013-2019-R “DIRECTIVA QUE REGULA Y NORMA EL USO DEL SOFTWARE PARA LA IDENTIFICACIÓN DE LA AUTENTICIDAD DE DOCUMENTOS ACADÉMICOS EN LA UNIVERSIDAD NACIONAL DEL CALLAO”, APROBADO CON RES. N° 704-2019-R DEL 05 DE JULIO DE 2019).

SE EXPIDE LA PRESENTE CONSTANCIA A SOLICITUD DEL INTERESADO PARA REALIZAR TRÁMITES CORRESPONDIENTES A LA SUSTENTACIÓN DE TESIS.

Bellavista, 30 de agosto del 2023

UNIVERSIDAD NACIONAL DEL CALLAO
Facultad de Ingeniería Ambiental y de Recursos Naturales

MITRO. AMÉRICO CARLOS MILLA FIGUEROA
RESPONSABLE DE TESIS
UPG- FIARN - UNAC

UNIVERSIDAD NACIONAL DEL CALLAO
Facultad de Ingeniería Ambiental y de Recursos Naturales

DR. MÁXIMO FIDEL BACA NEGLIA
DIRECTOR DE INVESTIGACIÓN
FIARN - UNAC

DEDICATORIA

Dedico este trabajo:

A mis padres, María y Diego, por su infinito amor y sus sabios consejos. No están más conmigo, pero siempre los tengo presente.

A Janet, mi compañera de vida, por su apoyo incondicional; y, a nuestras hijas, Alexandra Janet y Ximena Valeria.

A mis hermanos Eduardo, Juan Luis (†), Irma, Javier (†) y Carlos (†). Siempre los tengo presente.

AGRADECIMIENTO

Al Dr. Máximo Fidel Baca Neglia, mi asesor, mi guía; por su sabiduría y valiosa ayuda en el desarrollo de la presente tesis. Mi gratitud por siempre.

A mi alma mater, la Universidad Nacional del Callao, a sus facultades de Ingeniería Química e Ingeniería Ambiental y de Recursos Naturales, y a sus maestros, de quienes me llevo lo mejor.

Al jurado evaluador por señalarme el camino correcto y velar por la calidad y rigor científico en el desarrollo de mi tesis. Muchas gracias

A mis amigos que la vida me regaló, quienes me alentaron a llegar a la meta. Tarea cumplida.

ÍNDICE DE CONTENIDO

ÍNDICE DE CONTENIDO.....	1
ÍNDICE DE TABLAS	5
ÍNDICE DE FIGURAS	8
ABREVIATURAS	9
RESUMEN	10
RESUMO	11
INTRODUCCIÓN	12
I. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	14
1.1. Descripción de la realidad problemática	14
1.2. Formulación del problema.....	16
1.2.1. Problema general	16
1.2.2. Problemas específicos	16
1.3. Objetivos	17
1.3.1. Objetivo general	17
1.3.2. Objetivos específicos.....	17
1.4. Justificación	17
1.4.1. Justificación teórica	17
1.4.2. Justificación metodológica.....	18
1.4.3. Justificación social.....	18
1.4.4. Justificación ambiental	18
1.5. Delimitantes de la investigación.....	19
1.5.1. Delimitante teórica.....	19
1.5.2. Delimitante temporal.....	19
1.5.3. Delimitante espacial	20
II. MARCO TEÓRICO.....	21
2.1. Antecedentes	21

2.1.1.	Internacionales	21
2.1.2.	Nacionales.....	24
2.2.	Bases teóricas	26
2.2.1.	Calidad del DAM tratado para su disposición final	26
2.2.2.	Tratamiento de drenaje ácido de mina	28
2.2.3.	Marco legal.....	35
2.3.	Marco conceptual.....	38
2.3.1.	Drenaje ácido de mina (DAM)	38
2.3.2.	Coagulación	46
2.3.3.	Floculación	47
2.4.	Definición de términos básicos	48
III.	HIPÓTESIS Y VARIABLES	51
3.1.	Hipótesis	51
3.1.1.	Hipótesis general.....	51
3.1.2.	Hipótesis específicas.....	51
3.2.	Operacionalización de variables	53
IV.	METODOLOGÍA DEL PROYECTO.....	54
4.1.	Diseño metodológico.....	54
4.2.	Método de investigación	54
4.3.	Población y muestra.....	55
4.3.1.	Población.....	55
4.3.2.	Muestra	56
4.4.	Lugar de estudio	56
4.5.	Técnicas e instrumentos para la recolección de información.....	57
4.6.	Análisis y procesamiento de datos.....	58
4.6.1.	Parámetros fisicoquímicos del drenaje ácido de mina.....	58
4.6.2.	Diseño experimental del tratamiento de drenaje ácido de mina ...	59
4.6.3.	Procesamiento de datos y análisis estadístico	61

4.6.4. Determinación de la eficiencia de la remoción de los metales pesados.....	61
4.7. Aspectos éticos en investigación	61
V. RESULTADOS.....	63
5.1. Resultados descriptivos	63
5.1.1. Características fisicoquímicas iniciales del drenaje ácido de mina de la laguna de Quiulacocha	63
5.1.2. Resultados del tratamiento del drenaje ácido de mina de la laguna Quiulacocha.....	63
5.1.3. Procesamiento de los resultados obtenidos del tratamiento del DAM mediante alcalinización y sulfuración	71
5.2. Resultados inferenciales	78
5.2.1. Prueba de normalidad para las variables independientes	78
5.2.2. Prueba de normalidad para las variables dependientes.....	80
5.2.3. Prueba t para las variables dependientes	105
VI. DISCUSIÓN DE RESULTADOS	107
6.1. Contrastación y demostración de las hipótesis con los resultados ...	107
6.1.1. Hipótesis general.....	107
6.1.2. Hipótesis específica.....	110
6.2. Contrastación de los resultados con otros estudios similares.....	112
6.3. Responsabilidad ética.....	113
VII. CONCLUSIONES.....	115
VIII. RECOMENDACIONES	116
IX. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	117
ANEXOS	123
Anexo N° 1: Matriz de consistencia	123
Anexo N° 2: Validación de instrumento de recolección de datos.....	124
Anexo N° 3: Constancia de uso de laboratorio	133
Anexo N° 4: Recolección de datos de análisis y tratamiento del DAM	135

Anexo N° 5: Normativa ambiental de efluentes minero-metalúrgicos	137
Anexo N° 6: Base de datos	139
Anexo N° 7: Instrumentos para la medición de parámetros fisicoquímicos del agua.....	140
Anexo N° 8: Imágenes de las operaciones y procesos del tratamiento del DAM.....	142

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 Velocidad de precipitación de los sólidos disueltos.....	31
Tabla 2 Tipos de drenaje ácido de mina de acuerdo a su pH	39
Tabla 3 Tipos de DAM de acuerdo a su pH y potencial de acidez/alcalinidad .	40
Tabla 4 Tipos de DAM de acuerdo a su pH y concentración de metales.....	40
Tabla 5 Operacionalización de variables	53
Tabla 6 Parámetros fisicoquímicos iniciales de DAM proveniente de la laguna Quiulacocha	58
Tabla 7 Diseño de tres factores para el tratamiento de DAM.....	60
Tabla 8 Tabla cruzada del diseño factorial para el tratamiento de DAM	61
Tabla 9 Cuadro comparativo de los parámetros iniciales de DAM con las normas ambientales LMP y ECA categoría 3	63
Tabla 10 Resultados del tratamiento de DAM por alcalinización y sulfuración para el hierro	64
Tabla 11 Resultados del tratamiento de DAM por alcalinización y sulfuración para el cobre	65
Tabla 12 Resultados del tratamiento de DAM por alcalinización y sulfuración para el plomo	65
Tabla 13 Resultados del tratamiento de DAM por alcalinización y sulfuración para el cinc.....	66
Tabla 14 Concentración de los metales después del tratamiento del DAM mediante alcalinización	66
Tabla 15 Promedio de las concentraciones de los metales después del tratamiento del DAM mediante alcalinización	67
Tabla 16 Porcentaje de remoción de los metales después de la alcalinización del drenaje ácido de mina.....	67

Tabla 17 Resultados del tratamiento del DAM mediante alcalinización y sulfuración.....	69
Tabla 18 Promedio de las concentraciones de los metales luego del tratamiento mediante alcalinización y sulfuración	70
Tabla 19 Porcentaje de remoción de los metales después de alcalinización y sulfuración del DAM.....	70
Tabla 20 Parámetros fisicoquímicos del DAM con las normas ambientales antes y después de su tratamiento	71
Tabla 21 Medias marginales de la interacción de un factor para el hierro	72
Tabla 22 Medias marginales de la interacción de dos factores para el hierro..	72
Tabla 23 Medias marginales de la interacción de tres factores para el hierro .	73
Tabla 24 Medias marginales de la interacción de un factor para el cobre	73
Tabla 25 Medias marginales de la interacción de dos factores para el cobre..	74
Tabla 26 Medias marginales de la interacción de tres factores para el cobre..	74
Tabla 27 Medias marginales de la interacción de un factor para el plomo.....	75
Tabla 28 Medias marginales de la interacción de dos factores para el plomo .	75
Tabla 29 Medias marginales de la interacción de tres factores para el plomo .	76
Tabla 30 Medias marginales de la interacción de un factor para el cinc	76
Tabla 31 Medias marginales de la interacción de dos factores para el cinc	77
Tabla 32 Medias marginales de la interacción de tres factores para el cinc	77
Tabla 33 Prueba de Shapiro – Wilk para la alcalinización del DAM con cal	78
Tabla 34 Resultados de verificación de la distribución normal de datos mediante la alcalinización con cal.....	78
Tabla 35 Test de Shapiro – Wilk para la sulfuración del DAM con NaSH	79
Tabla 36 Resultado de verificación de la normalidad de los datos mediante la sulfuración del DAM con NaSH.....	79

Tabla 37 Test de Shapiro – Wilk para el gradiente de velocidad	80
Tabla 38 Resultados de verificación de la normalidad de datos con el gradiente de velocidad.....	80
Tabla 39 ANOVA para la variable hierro	81
Tabla 40 ANOVA para la variable cobre	87
Tabla 41 ANOVA para la variable plomo	93
Tabla 42 ANOVA para la variable cinc.....	99
Tabla 43 Prueba de t student para el hierro.....	105
Tabla 44 Prueba de t student para el cobre	106
Tabla 45 Prueba de t student para el plomo	106
Tabla 46 Prueba de t student para el cinc.....	106
Tabla 47 Media de los metales en el DAM después de su tratamiento por alcalinización y sulfuración.....	107

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 Esquema del tratamiento convencional de drenaje ácido de mina	28
Figura 2 Diagrama de Pourbaix del hierro	29
Figura 3 Esquema del tratamiento del DAM por HDS	32
Figura 4 Esquema del tratamiento del DAM por NCD.....	33
Figura 5 Drenaje ácido de mina	39
Figura 6 Proceso de formación de drenaje ácido de mina	41
Figura 7 Etapas de formación del drenaje ácido de mina	42
Figura 8 Velocidad de oxidación del catión ferroso.....	45
Figura 9 Esquema de la función $y = f(x)$	54
Figura 10 Drenaje ácido de mina antes de su tratamiento	56
Figura 11 Ubicación de Tecsup en el distrito de Santa Anita, Lima	57
Figura 12 Secuencia de muestreo, caracterización y tratamiento del DAM	57
Figura 13 pH y conductividad inicial del DAM	59
Figura 14 DAM después de su tratamiento por alcalinización y sulfuración	64

ABREVIATURAS

ANA:	Autoridad Nacional del Agua
APHA:	American Public Health
AWWA:	American Water Works Association
DAM:	Drenaje Ácido de Mina
ECA:	Estándar de Calidad Ambiental
HDS:	High Density Sludge Process (proceso de lodos de alta densidad)
LMP:	Límite Máximo Permisible
MINAM:	Ministerio del Ambiente
Mt:	Mega toneladas
NCD:	Neutralización y Coagulación Dinámica
nm:	nanómetro, 10^{-9} metros
PBI:	Producto Bruto Interno
pH:	potencial de Hidrógeno
RPM:	Revoluciones por Minuto

RESUMEN

Esta investigación tuvo como objetivo proponer una alternativa de solución al problema generado por las aguas ácidas de la laguna Quiulacocha que desembocan en el río San Juan e impactan negativamente en el ecosistema, principalmente, en la población del distrito de Simón Bolívar de la provincia de Pasco. La metodología aplicada fue de enfoque cuantitativo, de nivel explicativo y experimental; este consistió en la toma de muestras compuestas de drenaje ácido de mina en un punto de la laguna Quiulacocha; luego de caracterizarlo, se encontró que los valores de los parámetros fisicoquímicos estaban por encima de los valores exigidos por las normas ambientales LMP de acuerdo al D.S. N° 010-2010-MINAM y ECA, categoría 3 de acuerdo al D.S. N° 004-2017-MINAM. Se trató ocho muestras de 1 L de drenaje ácido de mina con sus respectivas réplicas; la cantidad de muestras se obtuvo mediante el diseño experimental factorial 2^k con tres factores (cal, NaSH y gradiente de velocidad, cada uno con dos niveles). Para el tratamiento se utilizó el método de alcalinización del drenaje ácido de mina con una solución de cal al 10 % m/v, seguido de una etapa de sulfuración con una solución de sulfhidrato de sodio (NaSH) al 10 % m/v con la finalidad de incrementar el porcentaje de remoción de los metales hierro, cobre, plomo y cinc. Los resultados del tratamiento en la etapa de alcalinización superaron ligeramente las normas ambientales para el hierro, cobre y cinc, y no para el plomo; con la etapa adicional de sulfuración, la remoción de los metales superó ampliamente lo exigido por las normas ambientales, para el Hierro fue del 98,30 %, para el cobre 99.83 %, para el plomo 99,48 % y para el cinc del 66.59 %. Se concluyó que las aguas de la laguna Quiulacocha tienen una alta carga de metales pesados altamente contaminantes y muy peligrosos para la salud de la población; así mismo, el método de alcalinización con cal al 10 % m/v con una etapa adicional de sulfuración con NaSH al 10 % m/v es una buena alternativa para neutralizar las aguas ácidas de la laguna Quiulacocha para prevenir la contaminación de las aguas del río San Juan del distrito de Simón Bolívar, Pasco.

Palabras claves: Drenaje ácido de mina, alcalinización, sulfuración.

RESUMO

Esta pesquisa teve como objetivo propor uma solução alternativa para o problema gerado pelas águas ácidas da lagoa Quiulacocha que deságuam no rio San Juan e impactam negativamente o ecossistema, principalmente, sobre a população do distrito Simón Bolívar da província de Pasco. A metodologia aplicada foi de abordagem quantitativa, com nível explicativo e experimental; Consistiu em colher amostras compostas de drenagem ácida de minas em um ponto da lagoa Quiulacocha; Após caracterizá-lo, constatou-se que os valores dos parâmetros físico-químicos estavam acima dos valores exigidos pelas normas ambientais LMP segundo D.S. N° 010-2010-MINAM e ECA, categoria 3 segundo D.S. N° 004-2017-MINAM. Oito amostras de 1 L de drenagem ácida de minas foram tratadas com suas respectivas réplicas; O número de amostras foi obtido utilizando o planejamento experimental fatorial 2K com três fatores (cal, NaSH e gradiente de velocidade, cada um com dois níveis). Para o tratamento foi utilizado o método de alcalinização da drenagem ácida de minas com solução de cal 10% m/v, seguida de etapa de sulfetação com solução de sulfidrato de sódio (NaSH) 10% m/v com a finalidade de aumentar o percentual de remoção dos metais ferro, cobre, chumbo e zinco. Os resultados do tratamento na fase de alcalinização excederam ligeiramente os padrões ambientais para ferro, cobre e zinco, mas não para chumbo; Com a etapa adicional de sulfetação, a remoção de metais superou em muito a exigida pelas normas ambientais, para o Ferro foi de 98,30%, para o cobre 99,83%, para o chumbo 99,48% e para o zinco 66,59%. Concluiu-se que as águas da lagoa Quiulacocha possuem uma elevada carga de metais pesados altamente poluentes e muito perigosos para a saúde da população; Da mesma forma, o método de alcalinização com cal a 10% m/v com etapa adicional de sulfetação com NaSH a 10% m/v é uma boa alternativa para neutralizar as águas ácidas da lagoa Quiulacocha para evitar a contaminação das águas do rio San Juan. do distrito Simón Bolívar, Pasco.

Palavras-chave: Drenagem ácida de minas, alcalinização, sulfetação.

INTRODUCCIÓN

La minería es una de las actividades económicas más importantes en nuestro país, y también a nivel mundial. Sin embargo, esta actividad deja gran cantidad de residuos denominados pasivos ambientales que comprometen la calidad de vida de las futuras generaciones. Estos pasivos ambientales pueden ser botaderos, relaves, escorias, ripios, entre otros que son potenciales generadores de drenaje ácido de mina (DAM), que si no son tratados oportunamente producen daños irreparables en el ecosistema.

Las actividades mineras, generan DAM debido a la percolación del agua en los minerales estériles sulfurados que quedan después de la extracción de los metales y que son acumulados cerca de las minas, estos, con el oxígeno del aire se combinan para producir sulfatos y ácido sulfúrico; como resultado, el DAM por su acidez va lixiviando los metales pesados presentes en las rocas. Al final, el agua además de su acidez, presenta contaminantes por encima de los límites exigidos por las normas ambientales.

La investigación tuvo el propósito de abordar el problema generado por el DAM principalmente en las aguas del río San Juan del distrito de Simón Bolívar de la provincia de Pasco; para tal efecto, se comprobó que la alcalinización de las aguas ácidas de la laguna de Quiulacocha que discurren hacia el río San Juan, y su posterior sulfuración con sulfhidrato de sodio (NaSH), permitió una mayor eficiencia en la remoción de los metales pesados presentes en el DAM; de esta forma se logró reducir la acidez y la cantidad de los metales pesados contenidos en el DAM, y cumplir con la calidad de agua para su disposición final en el río San Juan de acuerdo a la normatividad vigente, D.S. N° 010-2010-MINAM y D.S. N° 004-2017-MINAM.

Finalmente, la presente investigación es de tipo aplicada porque su finalidad fue resolver un problema ambiental, y su enfoque, cuantitativo porque se basó en principios teóricos y empleó métodos cuantitativos para la recolección de datos; así mismo, es de nivel explicativo, porque su finalidad fue encontrar las razones

o motivos por los cuales ocurren los hechos del fenómeno que se estudió, observando sus causas y los efectos que estas producen.

I. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

1.1. Descripción de la realidad problemática

Las operaciones de minería en todo el mundo, ya sean a cielo abierto o subterráneas, tienen impactos ambientales ciertamente relevantes. Aunque cada caso muestra sus propias peculiaridades, los peligros del impacto negativo en el ambiente son evidentes, así, tenemos:

Sobre el medio atmosférico. “Las variadas actividades mineras y de construcción asociadas, movilizan grandes cantidades de partículas de polvo. Éstas pueden producir impactos negativos debido tanto a su naturaleza física como química. El procesamiento de minerales y específicamente las operaciones de fundición, emiten cantidades masivas de partículas y gases aéreos potencialmente tóxicos.” (Moran, 2001).

Sobre el medio hídrico. “La minería rompe y comprime la roca, creando nuevos túneles para que el oxígeno, aire y microbios, reaccionen con los minerales. En consecuencia, las rocas pueden generar ácido, movilizando otros muchos componentes químicos, los que podrían contaminar cuerpos de agua por décadas o incluso cientos de años después del cierre de la mina. Incluso el uso de explosivos aumenta las concentraciones de nitrato y amoníaco, provocando el incremento de la eutrofización y la contaminación de cuerpos de agua. La roca residual a menudo contiene concentraciones elevadas de sulfatos, metales tóxicos, no metales, y componentes radioactivos. Dicha roca generalmente se desecha en montones en la superficie del suelo, al borde de los tajos o fuera de las obras. Muchos contaminantes se pueden filtrar de estos montones de desecho, contaminando las aguas superficiales y subterráneas. El procesamiento del mineral generalmente requiere de tratamientos químicos para remover los metales pesados. Estos metales a menudo son filtrados directamente del mineral usando ácidos fuertes” (Moran, 2001).

Sobre el suelo. Las operaciones mineras implican, en general, el movimiento y la transformación de grandes volúmenes de tierra, así como

el depósito de desechos inertes, balsas de remediación y relaves que modifican la morfología del suelo con la consiguiente modificación del paisaje. Estos impactos no solo son los directamente asociados al espacio que ocupan las explotaciones mineras y las infraestructuras asociadas, sino que también se derivan del impacto de estas sobre el ciclo hídrico, la erosión hídrica y eólica. Como resultado, las personas se ven afectadas directamente en su salud e indirectamente en el impacto sobre las actividades económicas, sociales y culturales. También se ven afectadas la flora y fauna, así como los procesos ecológicos (por ejemplo, las cadenas tróficas) y geofísicos (como los procesos de erosión y sedimentación) (AYALA CARCEDO, y otros, 2004).

En suma, los pasivos ambientales y su posterior impacto negativo en el ambiente por drenaje ácido de mina (DAM), es una de las amenazas más graves para los recursos hídricos a mediano y largo plazo; así, en el ámbito global, en la International Conference on Acid Rock Drainag, el U.S. Departament of de Interior informó que tienen más 10 0000 zonas mineras en estado de abandono con problemas de aguas ácidas; asimismo se informó la existencia de 15 625 km de ríos y 117 km² de embalses afectados por drenajes ácidos (LÓPEZ PAMO, y otros, 2002). Esta realidad se puede extrapolar a otros países en donde la minería es una de sus actividades económicas principales.

En el Perú, el Ministerio de Energía y Minas, a través de la empresa consultora KOIKA WORDLS FRIEND de KOREA, presentó el informe de evaluación sobre la existencia de 8794 pasivos ambientales mineros (PAM), los cuales impactan negativamente al ecosistema y el entorno salud del área minera y generan conflictos sociales, por ello, la remediación de los mismos es urgente (Informe Final “Fortalecimiento de la Gestión para la Remediación de Pasivos Ambientales Mineros en el Perú”, 2018) (BOLETIN COREA, 2018). Por otro lado, de acuerdo al inventario publicado por el Ministerio de Energía y Minas el 9 de marzo de 2015, se identificaron 8 616 pasivos ambientales mineros en todo el país, y en regiones como Huancavelica, Ayacucho, Apurímac, Cusco y Pasco,

y la existencia de alrededor de 152 minas abandonadas que han contaminado sus respectivas cuencas hidrográficas con drenaje ácido de mina (VEGA LUNA, 2015).

Simón Bolívar, es uno de los distritos de Pasco que se ve afectado por las actividades mineras extractivas que se desarrollan en la unidad minera Cerro de Pasco debido a que producen relaves mineros y aguas ácidas que terminan en la laguna de Quiulacocha, convertida en depósito de relaves, y de esta, discurren hacia el río San Juan modificando las características físico-químicas de sus aguas impactando negativamente en el ambiente y la salud de la población; de acuerdo a los estudios realizados por la Asociación Source International de Italia y la Municipalidad Distrital de Simón Bolívar, hay un elevado riesgo de exposición e intoxicación crónica en seres humanos a metales como plomo, arsénico, mercurio, aluminio y cadmio por la ingesta de agua contaminada (SOURCE, 2018).

Finalmente, el propósito de la presente investigación fue aportar en la prevención y remediación de las aguas ácidas para mitigar el impacto negativo en el ambiente y en la salud de los habitantes del distrito de Simón Bolívar. Pasco.

1.2. Formulación del problema

1.2.1. Problema general

¿Cómo será el tratamiento convencional con una etapa adicional de sulfuración para el drenaje ácido de mina de la unidad minera Cerro de Pasco del distrito de Simón Bolívar, Pasco?

1.2.2. Problemas específicos

¿Cuál será la dosis de cal en la etapa de alcalinización para la remoción de los metales del drenaje ácido de mina de la unidad minera Cerro de Pasco del distrito de Simón Bolívar, Pasco?

¿Cuál será la dosis de sulfhidrato de sodio (NaSH) en la etapa de sulfuración para la remoción de los metales del drenaje ácido de mina de la unidad minera Cerro de Pasco del distrito de Simón Bolívar, Pasco?

¿Cuál será el gradiente de velocidad en la etapa de sulfuración para la remoción de los metales del drenaje ácido de mina de la unidad minera Cerro de Pasco del distrito de Simón Bolívar, Pasco?

1.3. Objetivos

1.3.1. Objetivo general

Evaluar el tratamiento convencional con una etapa adicional de sulfuración para drenaje ácido de mina de la unidad minera Cerro de Pasco del distrito de Simón Bolívar, Pasco.

1.3.2. Objetivos específicos

Determinar la dosis de cal en la etapa de alcalinización para la remoción de los metales del drenaje ácido de mina de la unidad minera Cerro de Pasco del distrito de Simón Bolívar, Pasco.

Determinar la dosis de sulfhidrato de sodio (NaSH) en la etapa de sulfuración para la remoción de los metales del drenaje ácido de mina de la unidad minera Cerro de Pasco del distrito de Simón Bolívar, Pasco.

Determinar el gradiente de velocidad en la etapa de sulfuración para la remoción de los metales del drenaje ácido de mina de la unidad minera Cerro de Pasco del distrito de Simón Bolívar, Pasco.

1.4. Justificación

1.4.1. Justificación teórica

El DAM es uno de los grandes problemas que existen en países como el nuestro, que cuentan con yacimientos mineros, debido a que su presencia impacta negativamente en el ecosistema. La presente investigación se realizó con el propósito de aplicar los conocimientos existentes para el tratamiento del DAM con la finalidad de mitigar el impacto ambiental en el ecosistema, concretamente, el agua. Se comprobó que el tratamiento

convencional con una etapa adicional de sulfuración del DAM es un método eficiente, lo cual le permitió cumplir con la normatividad ambiental, D.S. N° 010-2010-MINAM y D.S. N° 004-2017-MINAM, logrando que el efluente tratado adquiriera las características de categoría 3, agua para riego.

1.4.2. Justificación metodológica

Para lograr los objetivos propuestos en la presente investigación se tomaron muestras del DAM que luego se caracterizó. Posteriormente, se realizó su tratamiento a escala de laboratorio; se alcalinizó (tratamiento convencional) el DAM con cal con la finalidad de incrementar su pH y precipitar los metales pesados contaminantes; luego, para mejorar la eficiencia en la precipitación de los metales se realizó el proceso de sulfuración con sulfhidrato de sodio (NaSH).

1.4.3. Justificación social

El DAM producido en las actividades mineras en el distrito Simón Bolívar de la provincia de Pasco afecta directamente al río San Juan; por lo que un tratamiento del DAM antes de que este se incorpore al cuerpo del río, es una solución a su contaminación, lo que permitirá que las aguas del río puedan ser utilizados por los pobladores de Simón Bolívar en sus diferentes actividades, tales como la agricultura y la ganadería.

1.4.4. Justificación ambiental

Una de las consecuencias que producen las actividades mineras es la generación de DAM que impacta negativamente en el ecosistema, afectando la calidad del suelo y el agua, y por ende, la salud de los pobladores; por lo que la presente investigación se justifica debido a que ofrece una alternativa de solución mediante el tratamiento del DAM, lo cual reducirá los pasivos ambientales de la zona en la que se producen por la explotación de los yacimientos mineros y, se alinea con uno de los ejes de la política nacional del ambiente, gestión integral de la calidad del agua, y con el objetivo prioritario N° 3 de la Política Nacional del Ambiente al 2030: Reducir la contaminación del aire, agua y suelo. De modo que la

presente investigación se involucra también con los siguientes sub objetivos:

- OP3.14. Porcentaje de pasivos ambientales que cuentan con planes de remediación y/o cierre, en implementación, cuyo logro esperado al 2030 es de 36%, el valor del logro esperado corresponde a los pasivos ambientales mineros. Este logro se actualizará incluyendo la información de los pasivos ambientales de otros sectores en el marco de la implementación del Decreto de Urgencia N° 022-2020.
- OP3.15. Tasa de variación de emisiones y/o liberaciones de sustancias químicas tóxicas al ambiente, cuyo logro esperado al 2030 estimados es 25%.

1.5. Delimitantes de la investigación

1.5.1. Delimitante teórica

Se conoce dos tipos de tecnología para tratar el DAM, estas, se describen como activas o pasivas. Las tecnologías de tratamiento activo requieren suministro continuo de reactivos químicos y energía externa, mientras que las tecnologías de tratamiento pasivo utilizan procesos naturales como microorganismos, plantas, piedra caliza, y no utilizan energía externa (SIGLER, y otros, 2015).

La presente investigación se circunscribe al uso de la tecnología activa de alcalinización del DAM. Según (ADUVIRI, 2006), la alcalinización consiste en la adición de sustancias alcalinas con la finalidad de neutralizar el ácido y alcanzar las condiciones de pH para la precipitación de los metales. Para aumentar la eficiencia de la alcalinización se añadió una etapa de sulfuración, la cual consistió en la adición de sulfhidrato de sodio, NaSH.

1.5.2. Delimitante temporal

La presente investigación se desarrolló entre los meses de abril y diciembre de 2022.

1.5.3. Delimitante espacial

La presente investigación se realizó en dos etapas; la primera, la toma de muestras en la laguna de Quiulacocha del distrito de Simón Bolívar de la provincia de Pasco; y la segunda, el análisis y el tratamiento del drenaje ácido de mina en los laboratorios de análisis químico e instrumental de Tecsup – Lima.

II. MARCO TEÓRICO

2.1. Antecedentes

2.1.1. Internacionales

El artículo titulado “Carbonatos pedogénicos para el tratamiento del drenaje ácido de mina (DAM). Experimentos de laboratorio”, tuvo como objetivo estudiar la efectividad de un edafosedimento carbonatado y una caliza en el tratamiento del drenaje ácido de mina de una mina abandonada. La metodología consistió en la caracterización química, mineralógica, geoquímica y micromorfológica de los materiales formados de carbonato de calcio con diferente origen (edafosedimento y caliza); realizó también pruebas en lotes utilizando edafosedimento carbonatado-DAM con relaciones 1:2,5 y 1:20 (sólido: líquido) y caliza-DAM con las mismas relaciones. Midieron también la cinética del pH y conductividad eléctrica a la primera hora y posteriormente cada 24 horas hasta las 259 horas. Los valores de pH finales en ambos experimentos cambiaron de ácidos a neutros. Los resultados después del tratamiento indicaron una retención del 100 % de Cu, Fe, Ni, Al y Cd en la caliza y en el edafosedimento una relación 1:2,5; en cuanto al Zn se logró una retención con valores por debajo de los límites permisibles. Como resultado de la investigación se comprobó la eficiencia del edafosedimento carbonatado en la neutralización de los elementos potencialmente tóxicos y la más viable, la relación 1:20, ya que la relación 1:2,5 presentó altas concentraciones de Na^+ y Cl^- , (RIVERA, y otros, 2020).

El artículo titulado “Evaluación a escala de laboratorio del gradiente de acidez de drenaje ácido de mina, mediante el uso de columnas de caliza como sistema pasivo de neutralización”, tuvo como objetivo fue evaluar el gradiente de acidez del DAM a partir del monitoreo de sus parámetros fisicoquímicos. De acuerdo a su metodología de investigación diseñó y construyó un sistema de neutralización a escala de laboratorio con el uso de columnas de material calcáreo provenientes de los bancos de caliza E y H del miembro superior calcáreo de la Formación Tibasosa, seguido de

la implementación del sistema de pruebas de caudales, neutralización por horas y tiempos de residencia donde se evaluó el comportamiento de variables como granulometría, caudal, tiempo de residencia y reactividad del material. Como resultado de su investigación determinó que la granulometría más efectiva para la neutralización del DAM es de 3/8” y el banco de caliza con mayor capacidad de neutralización es el banco H a pesar de su menor contenido de CaCO_3 , (RUIZ, y otros, 2018).

El artículo titulado “Pruebas de tratamiento de un drenaje ácido en un sistema continuo de celdas con rocas filita y caliza”, tuvo como objetivo evaluar un sistema pasivo de neutralización de drenaje ácido de mina a escala mediante pruebas realizadas en una celda de acrílico a nivel de laboratorio con rocas de filita y caliza. La metodología de la investigación consistió en cuatro pruebas, dos de ellas realizadas con un solo lote de DAM con la finalidad de observar el incremento de pH de acuerdo al tiempo de residencia y las otras utilizando cuatro y cinco lotes de DAM, para observar la eficiencia de la roca una vez que los precipitados de hierro van recubriendo su superficie. Para estas pruebas utilizó tres tipos de rocas: filita y caliza, obtenidas en la mina para las pruebas 1 y 2, y roca caliza proporcionada por Cemex para las pruebas tres y cuatro. Los resultados obtenidos demostraron que tanto las rocas obtenidas de la geología propia de la mina como con la roca dada por Cemex se logra un pH superior a 5,7, siendo las pruebas con roca obtenida de la mina las que dieron mejores resultados, (LÓPEZ, 2016).

En el artículo titulado “Evaluación de sistemas de humedales construidos para la disminución de la concentración de metales pesados generados por los drenajes ácidos de minería”, tuvo como objetivo establecer la configuración óptima de humedales construidos para la disminución de la concentración de Zn y Pb al tratar drenajes ácidos de mina. La investigación se desarrolló en dos grandes fases, modificándose el tiempo de retención de los sistemas donde la primera fase tuvo una duración de 22 semanas y la segunda fase, 23 semanas; adicionalmente, durante cada fase se realizaron tres cambios en la concentración de los metales

a evaluar, Zn y Pb. Para el caso de humedales con flujo vertical, en la primera fase del estudio los humedales se manejaron inundados con el fin de favorecer la vía de remoción anaerobia, para la segunda fase, se decidió modificar los sistemas dejándolos sin acumulación de agua con el fin de observar el comportamiento ante una condición aeróbica. El resultado de la investigación logra establecer que las diferentes configuraciones de los humedales tienen la capacidad de remover los metales pesados, tales como el zinc y plomo a diferentes concentraciones, también que estos sistemas con las plantas utilizadas pueden manejar adecuadamente valores de pH bajos. Se encontró también que la carga hidráulica aplicada, la cual tiene relación con el tiempo de retención hidráulica en algunos de los sistemas, es un parámetro que influye en la eficiencia de la remoción, de los metales pesados del drenaje ácido de mina, (GALVÁN USMA, 2016).

El artículo titulado “Diseño de un sistema de tratamiento para el drenaje ácido de mina basado en el proceso de lodos de alta densidad (HDS)” tuvo como objetivo presentar a través de un estudio analógico, el diseño de una planta de tratamiento para el drenaje ácido de mina. En la investigación se caracterizó el agua ácida a través de un muestreo compuesto de 24 horas (cada hora), analizando parámetros importantes para el diseño de la planta de tratamiento, tales como pH, temperatura, sólidos, hierro total y aluminio total, además de otros metales que son contaminantes en los cuerpos de agua. Como resultado de la investigación, con respecto al proceso de neutralización convencional puede ser una opción viable, sin embargo, el alto volumen de lodos de baja densidad que se producen lo presentan en desventaja con el proceso HDS. El proceso de lodos de alta densidad (HDS) ofrece varias ventajas como son, una producción de lodos de bajo volumen y alta densidad, costos más económicos de operación, equipo y de materia prima (cal). En suma, el resultado global de esta investigación no sólo involucró la selección del mejor proceso de tratamiento para el DAM, sino también, el diseño total de la planta de tratamiento para el drenaje ácido de la mina

“La Guitarra”, siendo el proceso HDS el más viable comparado con los demás expuestos, (ESPINOZA RODRÍGUEZ, y otros, 2016).

2.1.2. Nacionales

La tesis titulada “Sistema de tratamiento activo mediante neutralización con óxido de calcio en solución, para la remoción de concentraciones de hierro y aluminio del drenaje ácido de mina de la unidad minera Arasi, Ocuwiri – Puno 2019” tuvo como objetivo evaluar un sistema de neutralización usando una solución de óxido de calcio con la finalidad de remover hierro y aluminio de un drenaje ácido de mina proveniente de las actividades de la empresa minera Aruntani. La investigación consistió en analizar las tendencias de remoción del hierro y aluminio a distintos pH con la finalidad de encontrar un rango pH adecuado en el cual la remoción de los metales cumpla con los LMP. Los resultados de tendencia mostraron que el aluminio total y el hierro disuelto se encuentran por debajo de los LMP en un rango de pH de 6 a 9; luego, mediante el análisis de superficie de respuesta determinó que a pH igual a 7,7 y una dosis de floculante aniónico de 6,77 mg/L minimiza la concentración del aluminio total y hierro disuelto en el drenaje ácido de mina, (PATIÑO TIPACTI, 2022).

El artículo titulado “Estudio de neutralización dinámica de drenaje ácido de mina con pulpa de relave fino de planta concentradora – 2021” tuvo como objetivo aprovechar el potencial neutralizante de la pulpa de relave fino para neutralizar el drenaje ácido de mina para disminuir el consumo de cal. La investigación consistió en la neutralización de muestras de drenaje ácido de mina provenientes del efluente del túnel de Victoria y pulpa de relave de la planta concentradora Victoria – Carhuacra, para comprobar el potencial de neutralización del relave con fracciones de granulometría fina y determinar la cinética del proceso de neutralización con respecto a la velocidad de coagulación, aglomeración y precipitación de los iones de metales pesados y sólidos en suspensión presentes en el efluente ácido de mina del túnel Victoria. Como resultado de la

investigación se concluyó que el empleo de relave fino de la planta concentradora en el proceso de neutralización de drenajes ácidos de mina, reduce significativamente el consumo de cal y coagulantes, resultando ser económicamente viable; asimismo, la cinética del proceso de neutralización con pulpa de relave fino es rápida, solo requiere de un tiempo de 6 a 10 minutos, alcanzando concentraciones de metales disueltos en la solución final con valores por debajo de los LMP, (GUERREROS LAZO, 2021).

El artículo titulado “Tratamiento de aguas ácidas con dolomita para disminuir la concentración de Cu y Zn en efluentes de la planta concentradora Victoria en la provincia de Yauli – La Oroya” tuvo como objetivo disminuir la concentración de los metales Cu y Zn de las aguas ácidas con dolomita. La investigación se enfocó en la caracterización fisicoquímica de las aguas ácidas provenientes de la planta concentradora Victoria Yauli – La Oroya. Previamente, preparó la dolomita hasta obtener la granulometría de malla 10 que luego mezcló con agua para obtener una pulpa heterogénea con carbonato de calcio y magnesio en fase sólida; esta pulpa fue secada y luego llevado a molienda hasta obtener partículas de dolomita de 45 micrones y 37 micrones respectivamente, que luego utilizó en el tratamiento de las aguas ácidas. Como resultado del tratamiento de las aguas ácidas con dolomita se redujo las concentraciones de Cu de un valor inicial de 42,270 ppm a 2,075 ppm y del Zn de 202,465 ppm a 9,090 ppm, (RUIZ SALAZAR, 2018).

El artículo titulado “Diseño de planta de tratamiento de aguas ácidas de mina con alto contenido de manganeso y zinc” tuvo objetivo realizar un tratamiento selectivo de las aguas ácidas de mina con alto contenido de zinc y manganeso, para diseñar adecuadamente la planta de tratamiento de aguas ácidas. Alcanzando el cumplimiento de la normativa ambiental vigente. La investigación se enfocó en el análisis y caracterización de una muestra de agua ácida con alto contenido de zinc y manganeso y luego se neutralizó con una solución de hidróxido de calcio Ca(OH)_2 al 10 % seguido de la remoción de los metales con una dosis de 1,19 g de

hipoclorito de sodio por litro de agua, y su posterior coagulación y floculación. Como resultado de su investigación realizó el diseño de una planta de tratamiento de agua de mina para un caudal de DAM de 180 L/s, (RODRÍGUEZ VÁSQUEZ, 2018)

El artículo titulado “Mejora de la calidad de aguas del río San Juan aplicando el proceso HDS en el distrito de Rancas, Pasco”, tuvo como objetivo los impactos ambientales mediante la aplicación del método HDS a las aguas del río San Juan que son producto de la contaminación de las aguas del río por la actividad minera, industrial y doméstica en Pasco en el ecosistema acuático del río San Juan. En la investigación se realizó operaciones para la obtención de lodos que se utilizaron en el tratamiento de las aguas del río San Juan juntamente con cal viva. Como resultado de la investigación concluye que la dosificación óptima es 0,25 g CaO/L de agua del río San Juan; asimismo, el tiempo óptimo fue de 200 segundos a 100 rpm, con una dosificación de RENAFLOC 1,5 mg/L. Luego del tratamiento, las aguas del río San Juan se pueden considerar de tipo 3 para su uso en riego de cultivos y abrevadero de animales, (RAMOS MARTÍNEZ, 2018).

2.2. Bases teóricas

2.2.1. Calidad del DAM tratado para su disposición final

El fenómeno de drenaje ácido proveniente de minerales sulfurosos es un proceso que ocurre en forma natural. Hace cientos de años, se descubrieron muchos yacimientos minerales por la presencia de agua de drenaje rojiza, indicando la presencia de minerales sulfurosos. Hace sólo alrededor de 20 años, se desarrolló una preocupación ambiental asociada con esta agua ácida, rica en metales disueltos, así como el término "drenaje ácido de mina" o DAM. No obstante, el drenaje ácido no ocurre únicamente en las minas, por lo que el término "drenaje ácido de roca" o DAR también es usado comúnmente. (BROUGHTON, y otros, 1995). La importancia en el estudio de sus impactos sobre el medio ambiente radica en que los drenajes ácidos son efluentes de trabajos mineros que

contaminan fuentes hídricas superficiales y cuerpos de agua subterráneos porque presentan valores de pH entre 1,5 y 6, aportan una gran cantidad de acidez debida a la formación de ácido sulfúrico y elevadas concentraciones de metales pesados como el cobre, plomo, arsénico, entre otros; que son solubles a valores de pH bajos. Adicionalmente, los DAM generan sedimentos de color rojo – naranja debido a precipitados de hierro y de sulfatos que ocupan los espacios para el desove de los peces, se introducen entre sus branquias y cubren los detritos que sirven como alimento (JENNINGS, y otros, 2008). Por otra parte, la vegetación terrestre que pueda estar en contacto con los DAM también se ve ampliamente afectada ya que la acidez y concentración de iones como sulfatos y cloruros impide su normal crecimiento (JENNINGS, y otros, 2008). De lo expuesto líneas arriba, es importante tratar el drenaje ácido de mina antes de su disposición final en un cuerpo de agua para prevenir el impacto negativo en el ambiente y la salud de las personas.

Las aguas residuales tratadas pueden descargarse directamente en cuerpos de agua de un río o lagos; también pueden ser introducidas a los acuíferos de manera directa o indirecta con la finalidad de incrementar la disponibilidad de los recursos hídricos (TILLEY, y otros, 2015). El drenaje ácido de mina tratado debe cumplir con ciertos requisitos antes de ser descargados a los cuerpos receptores que pueden ser las aguas de un río o un lago. En Perú, estos requisitos son las normas ambientales, tales como los Límites Máximos Permisibles para la descarga de efluentes líquidos de actividades minero – metalúrgicos a través del D.S. N° 010-2010-MINAM y el estándar de calidad ambiental (ECA) para el agua a través del D.S. N° 004-2017-MINAM. En algunos países como México y Estados Unidos las aguas tratadas se disponen reinyectándolo al manto acuífero mediante lagunas de recarga superficial a cielo abierto (CONAGUA, y otros, 2014). Para garantizar el cumplimiento de las normas ambientales y prevenir los impactos negativos del ambiente se monitorea y muestrea periódicamente.

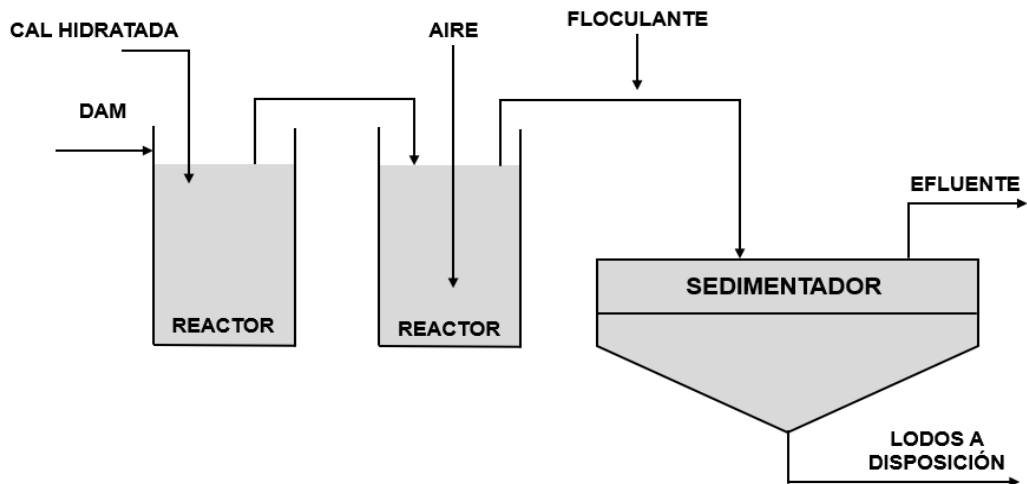
2.2.2. Tratamiento de drenaje ácido de mina

Se basan en la neutralización del DAM con sustancias alcalinas, generalmente cal, cal hidratada, caliza hidratada, sosa caústica o carbonato sódico. A condiciones adecuadas de pH, los metales precipitan como hidróxidos insolubles, el hierro ferroso se convierte en hidróxido ferroso y precipita a pH mayor a 8,5 y el manganeso a pH mayor a 9,5. En general se suele trabajar a un pH promedio de 9 debido a que a mayores condiciones de basicidad aumenta la solubilidad de algunos metales como el plomo y cinc.

En general el tratamiento activo del DAM se basa en la precipitación de los metales como hidróxidos, y se realizan en tres pasos: oxidación, para convertir Fe^{2+} a Fe^{3+} , adición de álcalis y sedimentación. A continuación, se describen las principales tecnologías activas para el tratamiento del DAM.

Figura 1

Esquema del tratamiento convencional de drenaje ácido de mina



Nota. Inicialmente se neutraliza las aguas ácidas con cal y termina con la oxidación del ion ferroso a ion férrico. Fuente: (VILLACHICA, y otros, 2005)

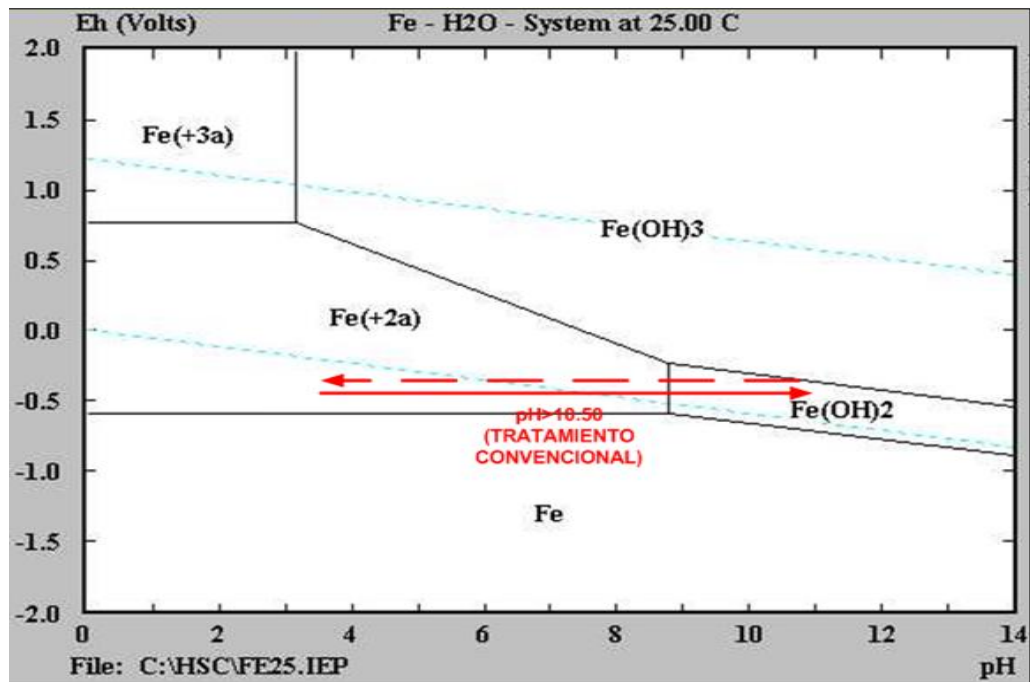
a. Alcalinización convencional del drenaje ácido de mina

También se le conoce como tratamiento convencional. Consiste en incrementar el pH del drenaje ácido de mina agregando sustancias

alcalinas acompañado de oxigenación a través de una aireación; las sustancias alcalinas más utilizadas para neutralizar el drenaje ácido de mina y lograr las condiciones apropiadas para la precipitación de los metales pesados son la cal, el carbonato de sodio o la soda caustica.

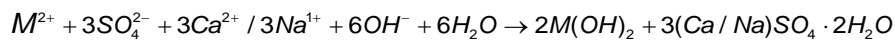
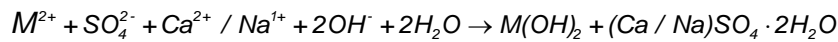
La importancia del uso de la cal (CaO), radica en que al combinarse con el agua forma hidróxido de calcio, y este, al combinarse con el drenaje ácido de mina logra precipitar a los sulfatos como sulfato de calcio (CaSO₄), no ocurriría con los hidróxidos aparentemente más limpios como el hidróxido de sodio (NaOH) o el hidróxido de potasio (KOH), pues forman sales solubles. La oxigenación se hace con la finalidad de oxidar a los metales y obtener precipitados más estables. En la figura 2, se aprecia que el hierro, uno de los componentes del DAM, precipitan como hidróxido insoluble en un rango de pH comprendido entre 8,5 y 10.

Figura 2
Diagrama de Pourbaix del hierro



Nota. El diagrama de Pourbaix ayuda a predecir los estados más estables de un metal.

En general, las reacciones de este método, considerando M como metal pesado son:



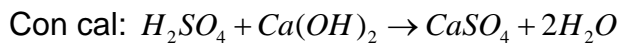
El proceso de la alcalinización termina con la coagulación floculación y la separación sólido-líquido en un clarificador. Las fases del proceso de alcalinización convencional son:

- **Homogenización**

Se recolectan el DAM en grandes depósitos en la que son mantenidos de 12 a 24 horas para su homogenización; después de este tiempo de retención pasa a la planta de tratamiento.

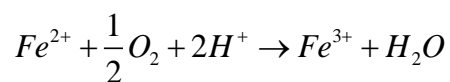
- **Neutralización**

Se utiliza cal viva, lechada de cal u otro agente neutralizante; dependerá principalmente de la disponibilidad o del costo. Algunas de las reacciones en esta etapa pueden ser:

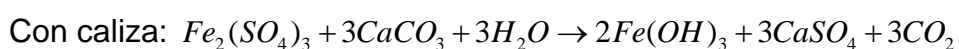
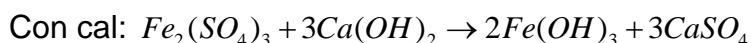


- **Aireación**

Se realiza con la finalidad de oxidar el Fe^{2+} a Fe^{3+} que tiene poca solubilidad. El ion ferroso tiene una solubilidad mínima en el intervalo de pH de 9,3 a 12,0; mientras que el ion férrico es poco soluble y precipita como hidróxido a un pH aproximado de cuatro.



Los hidróxidos que se forman al reaccionar el sulfato férrico con los agentes neutralizantes son:



Una regla práctica para predecir la rapidez con que los metales disueltos precipitan en función al pH se muestra en la tabla 1.

Tabla 1

Velocidad de precipitación de los sólidos disueltos

Rango de pH	Velocidad de precipitación
Menor a 6	Muy lenta; salvo presencia de bacterias.
6 a 8	Moderada
Mayor a 8	Muy rápida

Nota. Cinéticamente la oxidación de la pirita por el oxígeno en un principio es un proceso lento.

▪ **Sedimentación**

Una vez que el DAM se neutraliza y el ion ferroso se ha oxidado a ion férrico prosigue la sedimentación, con la cual se remueven los lodos que contienen a los hidróxidos que se han formado; el pH del medio a la cual se realiza la precipitación depende del tipo de metal que contiene el DAM; así, por ejemplo, el pH mínimo para el Pb^{2+} es 6,3; para el Fe^{2+} es 9,5 y para el Mn^{2+} es 10,6. Si el DAM contiene metales anfóteros como el cinc y el aluminio, estos aumentan su solubilidad a elevados pH por lo que se debe tener muy en cuenta a estos metales al momento de tratar el drenaje ácido de mina.

▪ **Disposición de lodos**

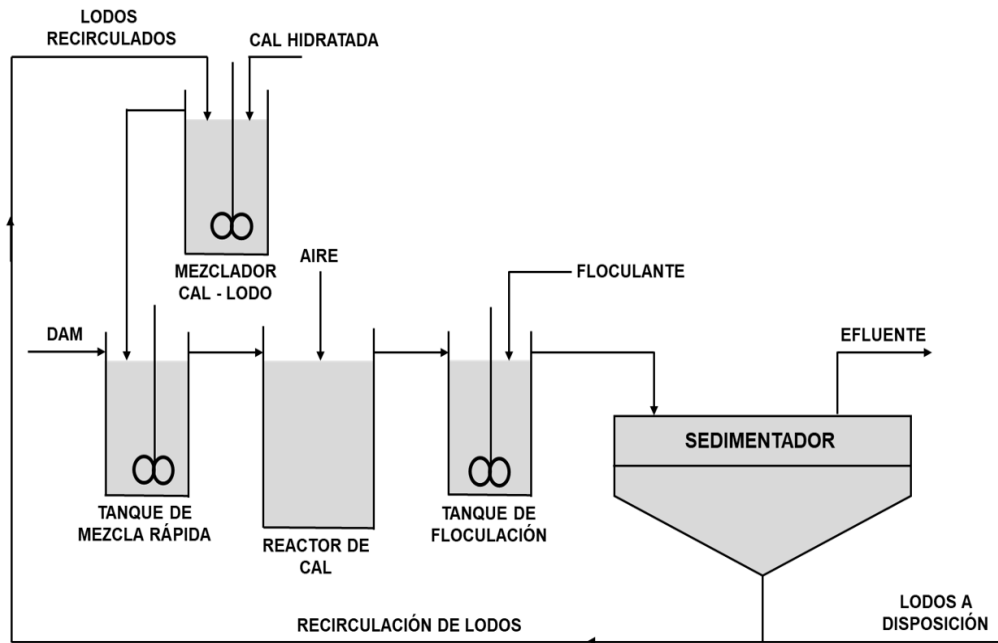
Es una parte esencial del proceso; una vez culminado el tratamiento se debe realizar una adecuada disposición de los lodos producidos para reducir los impactos ambientales.

b. High Density Sludge (HDS)

Esta tecnología conocida en español como lodos de alta densidad. Consiste en la recirculación de lodos producidos en la alcalinización para que en la nueva mezcla con cal se formen nuevos lodos, más compactos y más densos que permitan una mayor eficiencia en la separación sólido – líquido.

Figura 3

Esquema del tratamiento del DAM por HDS



Nota. Planta de tratamiento de aguas ácidas por el proceso HDS. Fuente: (ORÉ, 2015).

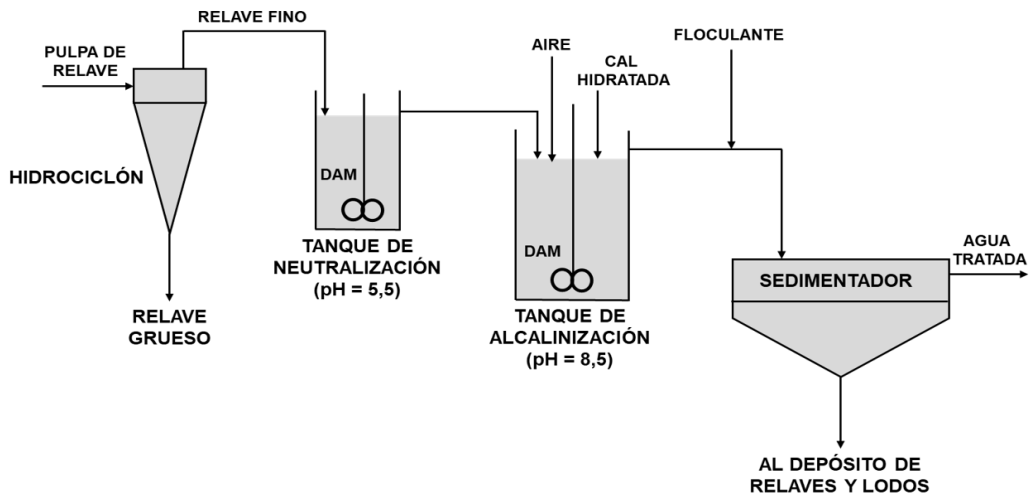
c. Neutralización y coagulación dinámica (NCD)

Patentado el 2004 por su inventor Villachica C. (SMALLVILL S.A.C.) Esta tecnología en la neutralización del DAM consiste en la precipitación de los metales disueltos y sedimentación de precipitados obtenidos mediante el uso de relaves mineros que aumenta la densidad de los lodos y lo hace más compactos. Algunas ventajas de la tecnología NCD con respecto al HDS son:

- Menor tiempo de retención, de 5 a 6 minutos con respecto a los 50 minutos de del HDS.
- Mayor velocidad de sedimentación.
- El precipitado adsorbido no ocupa un espacio adicional al espacio requerido por el colector.

Figura 4

Esquema del tratamiento del DAM por NCD



Nota. Planta de tratamiento de aguas ácidas por el proceso de neutralización-coagulación-decantación (NCD). Fuente: (VILLACHICA, y otros, 2005).

El proceso consiste en aprovechar la característica coloidal de los precipitados que se obtienen al neutralizar los DAM y la energía que este genera durante su transporte a través de un canal o tubería. El agente neutralizante se añade durante su transporte aguas arriba de su punto de descarga, a una distancia suficiente que permita proporcionar el tiempo necesario para completar las reacciones de neutralización y precipitación de los sólidos disueltos.

La separación sólido-líquido del efluente neutralizado se logra mezclándolo con relaves, cuarzo, magnetita, escoria u otro material sólido de carácter granular que coagula los precipitados coloidales sobre su superficie, reduce su volumen y sedimenta rápidamente debido tienen mayor densidad que los que se obtienen convencionalmente.

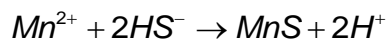
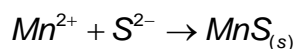
d. Etapas adicionales al tratamiento de alcalinización convencional

Las diferentes tecnologías que se aplican en el tratamiento de DAM no logran cumplir con los límites que las normativas vigentes exigen, tal es el caso del D.S. N° 010-2010-MINAM, y los ECA categoría 3 para riego de

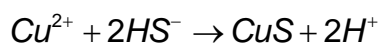
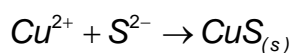
vegetales, D.S. N° 004-2017-MINAM; esto obliga a completar con un tratamiento terciario que generalmente puede ser ultrafiltración, nanofiltración u ósmosis inversa, todas, tecnologías de membrana con altos costos de inversión y operación, además de generar pasivos ambientales.

La presente investigación modifica el tratamiento convencional del drenaje ácido de mina con una etapa adicional de sulfuración (adición de solución de sulfhidrato de sodio, NaSH al 10 % m/v). La sulfuración forma lodos más densos que permiten una buena separación sólido – líquido, generando aguas más claras y con una menor carga contaminante debido a que la acción de los coagulantes y floculantes sobre los sulfuros insolubles son más eficientes con respecto a los hidróxidos, asegurando de este modo mayor eficiencia en la remoción de los metales pesados. Las reacciones más importantes son:

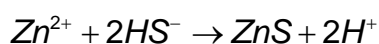
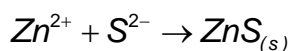
Para el manganeso:



Para el cobre



Para el cinc



El tratamiento del DAM culmina con una coagulación-floculación, para tal fin se utilizan sulfato de aluminio, cloruro férrico, policloruro de aluminio, entre otros. Por otro lado, la floculación consiste en la aglomeración de partículas ya neutralizadas. Las sustancias que logran este propósito son polímeros de tipo catiónico o aniónico que al ser macromoléculas son más eficientes en la aglomeración de las partículas neutralizadas. En el caso

del tratamiento del drenaje ácido de mina, los iones hierro sirven de coagulantes, por lo que se utilizan solo floculantes.

2.2.3. Marco legal

a. Ley N° 28611. Ley general de ambiente

Ordena el marco normativo legal para la gestión ambiental en el Perú. Establece los principios y normas básicas para asegurar el efectivo ejercicio del derecho a un ambiente saludable, equilibrado y adecuado para el pleno desarrollo de la vida, así como el cumplimiento del deber de contribuir a una efectiva gestión ambiental y de proteger el ambiente, así como sus componentes, con el objetivo de mejorar la calidad de vida de la población y lograr el desarrollo sostenible del país.

b. Ley N° 29338. Ley de recurso hídrico

Regula el uso y gestión de los recursos hídricos que comprenden al agua continental, superficial y subterránea, y los bienes asociados a esta; es de aplicación a todas las entidades del sector público nacional, regional y local que ejercen competencias, atribuciones y funciones respecto a la gestión y administración de recursos hídricos continentales superficiales y subterráneos; y, a toda persona natural o jurídica de derecho privado, que interviene en dicha gestión.

c. D.S. N° 001-2010-AG. Reglamento de la ley de Recursos Hídricos

Tiene por finalidad regular el uso y gestión integrada del agua, la actuación del Estado y los particulares en dicha gestión, así como en los bienes asociados a ésta, promoviendo la gestión integrada de los recursos hídricos con el propósito de lograr eficiencia y sostenibilidad en la gestión por cuencas hidrográficas y acuíferos, para la conservación e incremento de la disponibilidad del agua, así como para asegurar la protección de su calidad, fomentando una nueva cultura del agua.

d. Ley N° 28271. Ley que regula los pasivos ambientales de la actividad minera

Tiene por objeto regular la identificación de los pasivos ambientales de la actividad minera, la responsabilidad y el financiamiento para la remediación de las áreas afectadas por éstos, destinados a su reducción y/o eliminación, con la finalidad de mitigar sus impactos negativos a la salud de la población, al ecosistema circundante y la propiedad.

e. D.S. N° 004-2017-MINAM. Estándares de Calidad Ambiental (ECA) para el agua

El ECA establece los niveles de concentración de los elementos, sustancias, parámetros físicos, químicos y biológicos, presentes en el agua en su condición de cuerpo receptor. Su finalidad es fijar metas que representan el nivel a partir del cual se puede afectar significativamente la salud humana; la medición de la misma se realiza en los cuerpos receptores que son el aire, el suelo y el agua.

f. D.S. N° 010-2010-MINAM. Límites Máximos Permisibles para la descarga de efluentes líquidos de actividades minero – metalúrgicos

Límite Máximo Permissible (LMP) es la medida de la concentración o del grado de elementos, sustancias o parámetros físicos, químicos y biológicos, que caracterizan a los efluentes líquidos de actividades minero – metalúrgicas, y que al ser excedida causa o puede causar daños a la salud, al bienestar humano y al ambiente.

g. R.J. N° 224-2013-ANA. Reglamento para el otorgamiento de autorizaciones de vertimiento y reuso de aguas residuales tratadas

Tiene la finalidad de regular los aspectos y procedimientos administrativos a seguir para el otorgamiento de autorizaciones, modificaciones y renovaciones de vertimiento de aguas residuales tratadas a cuerpos

naturales de agua continental o marina, y de reuso de aguas residuales tratadas.

h. R.J. N° 274-2010-ANA

Define las medidas para la implementación del programa de adecuación de vertimientos y reuso de agua residual.

i. R.J. N° 010-2016-ANA

Tiene la finalidad de vigilar y fiscalizar la calidad de los recursos hídricos que permitan evaluar su calidad para planificar e implementar acciones de prevención, mitigación y control de los impactos negativos.

j. D.S. N° 023-2021-MINAM. Política Nacional del Ambiente al 2030

Objetivo prioritario 3: Reducir la contaminación del aire, agua y suelo Este objetivo responde a la causa directa “Deterioro de la calidad ambiental”. A través de este objetivo, se busca frenar el deterioro de las estructuras productivas, que se ven afectadas por la contaminación de recursos valiosos como el agua (marina y continental), y los suelos. También busca reducir los niveles de morbilidad y mortalidad, tanto en enfermedades gastrointestinales como en enfermedades respiratorias a nivel nacional. Este Objetivo responde, igualmente, a la necesidad de mejorar la calidad del aire y del agua en las unidades hidrográficas del país. Por ejemplo: La calidad del agua es monitoreada en 98 de las 159 unidades hidrográficas; sin embargo, más del 40 % (41 de 98) de las unidades hidrográficas monitoreadas no cumplen con los estándares de calidad ambiental. Este Objetivo prioritario está relacionado con las siguientes Políticas de Estado:

- Política y Estrategia Nacional de Recursos Hídricos.
- Política Nacional de competitividad y productividad.
- Política Nacional de Saneamiento.
- Política Energética Nacional del Perú 2010 - 2040.
- Política Nacional Multisectorial de Salud al 2030.

2.3. Marco conceptual

2.3.1. Drenaje ácido de mina (DAM)

El DAM es el agua contaminada que se origina por la explotación de un yacimiento minero, pueden producirse a nivel superficial o a nivel del sub suelo, tiene una alta acidez (bajo pH) muy rica en sulfatos y alto contenido de metales pesados tales como el hierro, manganeso y aluminio (ADUVIRI, 2006).

El DAM es una de las amenazas más graves para los recursos hídricos; tiene el potencial de causar daños irreparables al agua en la que se incorpora, y con ella, comprometer la salud de los habitantes y de todos aquellos que hacen uso del agua. Con frecuencia las aguas ácidas están asociadas a las actividades mineras, sin embargo, no está relacionado exclusivamente a las actividades de extracción, también puede ocurrir por la exposición de materiales y rocas con contenidos de sulfuros a la acción del aire y al agua.

a. Tipos de drenaje ácido de mina

El DAM se produce a partir de la oxidación de los minerales sulfurados, sin embargo, estas no corresponden a etapas consecutivas en su formación, debido a que resultan de una serie de procesos químicos y biológicos. El tipo de DAM depende de su composición (metales disueltos y sulfatos) y características físicas y químicas, esto incluye también a sus sedimentos; entre los principales parámetros que se cuantifican, se tiene al potencial de hidrógeno (pH), conductividad eléctrica, turbidez, concentración de metales disueltos, potencial redox, contenido de oxígeno, entre otros.

El DAM también se puede clasificar en función de su potencial de hidrógeno (pH) y el potencial de acidez/alcalinidad. Se debe tener en cuenta que los DAM no siempre son ácidos, lo cual implica que independientemente de su origen pueden ser drenajes alcalinos o drenajes ácidos.

Figura 5

Drenaje ácido de mina



Nota. La coloración rojiza es una de las características del DAM debido a la presencia de Fe^{3+} .

Tabla 2

Tipos de drenaje ácido de mina de acuerdo a su pH

Agua residual de mina	pH
Altamente ácidas	1,5 a 4,5
Blandas, ligeramente ácidas	5,0 a 7,0
Duras, neutras a alcalinas	7,0 a 8,5
Blandas, alcalinas	7,5 a 11,0
Muy Salinas	6,0 a 9,0
Blandas ácidas	3,5 a 5,5

Nota. Clasificación en función del pH de DAM. Fuente: (ADUVIRI, 2006).

Tabla 3

Tipos de DAM de acuerdo a su pH y potencial de acidez/alcalinidad

Clase	pH	Características
Ácido	Menor a 6	Acidez generada por la oxidación, principalmente sulfuros.
Alcalino	Mayor a 9 o 10	Alta alcalinidad por disolución de minerales básicos. Los niveles de metales como el aluminio son mayores que en los drenajes casi neutros.
Casi neutro	Varía entre 6 y 9 o 10	La concentración de los metales disueltos algunas veces puede exceder los niveles tóxicos.
Otros	Irrelevante	Puede afectar la concentración de los metales.

Nota. Los componentes del drenaje ácido de mina influyen en su pH. Fuente: (PANDURO, 2019).

También se puede clasificar de acuerdo a su pH, contenido de oxígeno y la concentración de metales.

Tabla 4

Tipos de DAM de acuerdo a su pH y concentración de metales

Tipo	pH	Características
I	Menor a 4,5	Alta concentración de Fe, Al, Mn, Zn, Cu, Ni, Pb Alto contenido de oxígeno
II	Menor a 6,0	Alta cantidad de sólidos disueltos Alta concentración de Fe ²⁺ y Mn ²⁺
III	Mayor a 6,0	De moderada cantidad de sólidos disueltos De bajo a moderado contenido de Fe ²⁺ y Mn Bajo contenido de oxígeno
IV	Mayor a 6,0	Alta cantidad de partículas disueltas A mayor tiempo de residencia, mayor fijación de partículas y el agua puede llegar a ser similar al de tipo V
V	Mayor a 6,0	El agua de drenaje es neutralizada Alta cantidad de sólidos disueltos Gran cantidad de hidróxidos precipitados Oxoaniones solubles como el bicarbonato y sulfato quedan en la solución

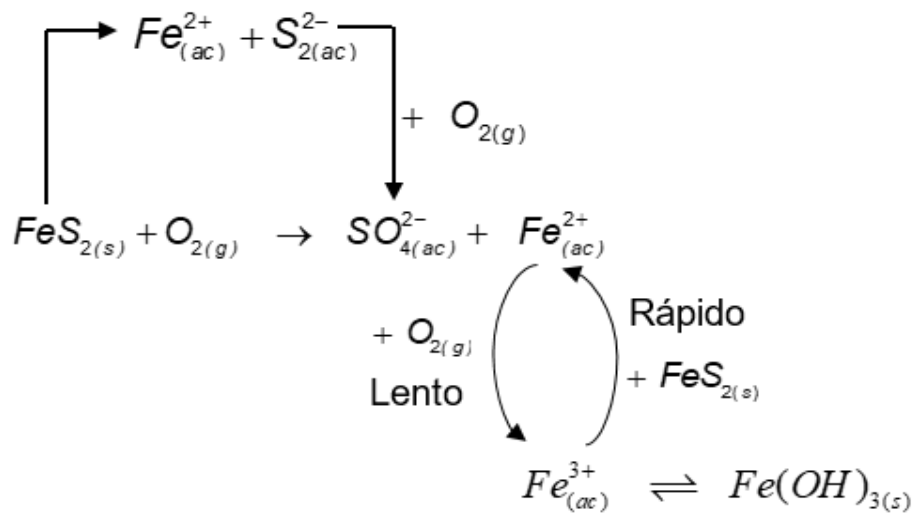
Nota. La concentración de los metales influye en el pH del DAM. Fuente: (MEDINA, 2018).

b. Formación del drenaje ácido de mina

La formación del DAM se inicia con la oxidación de los sulfuros, y en algunos casos catalizados por bacterias.

Figura 6

Proceso de formación de drenaje ácido de mina

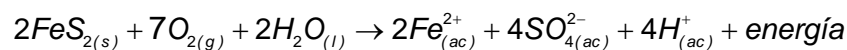


Nota. Modelo de oxidación de la pirita. Fuente: (ESPINOZA, y otros, 2010).

c. Etapas de la formación del drenaje ácido de mina

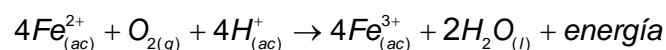
La oxidación de los sulfuros con la consecuente generación de acidez se divide en tres etapas en función del pH.

Etapas I. Se oxida la pirita biótica o abióticamente con oxígeno del aire como oxidante principal. El sulfuro se oxida a sulfato liberando Fe^{2+} y protones.



Los iones disueltos incrementan la concentración de los sólidos disueltos y de la acidez del agua, lo cual implica la disminución de su pH.

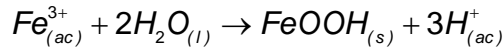
Etapas II. Corresponde a la oxidación biótica o abiótica del Fe^{2+} a Fe^{3+} .



Luego ocurre una precipitación en forma de hidróxido.



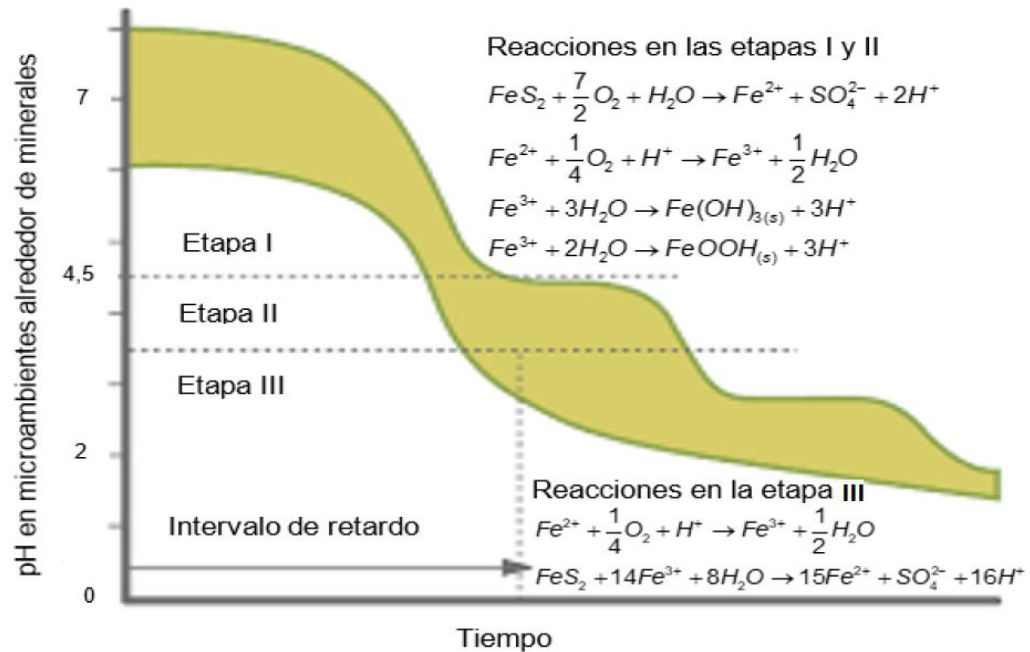
También forma oxihidróxidos produciendo un precipitado relativamente insoluble de color rojo-anaranjado, característica propia de los drenajes ácidos de mina.



Durante esta etapa continúa produciéndose más protones (H^+), y el pH varía entre 3,5 y 4,5.

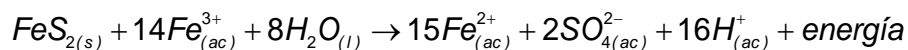
Figura 7

Etapas de formación del drenaje ácido de mina

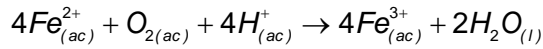


Fuente: (ADUVIRI, 2006)

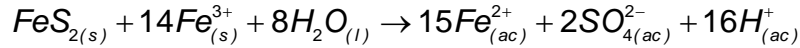
Etapa III. Cuando el pH disminuye por debajo de 3,5 el Fe^{3+} se ve afectado por las reacciones de oxidación – reducción y la acción bacteriana puede lixiviar el sulfuro de hierro directamente a sulfato. En esta etapa hay variación en la generación de ácido al aumentar la solubilidad del hierro, por lo que disminuye la precipitación del hidróxido férrico.



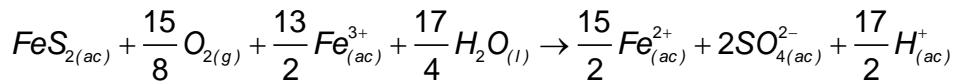
En esta etapa la bacteria *Thiobacillus ferrooxidans* oxida al catión ferroso a catión férrico que a su vez oxida a los sulfuros produciendo más ácido.



A pH 2,5 el catión férrico actúa como agente oxidante, formando nuevamente iones ferrosos, sulfatos y protones.

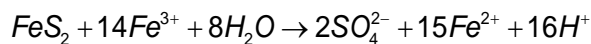


La reacción final para estabilizar el catión férrico a partir de la oxidación de la pirita es:



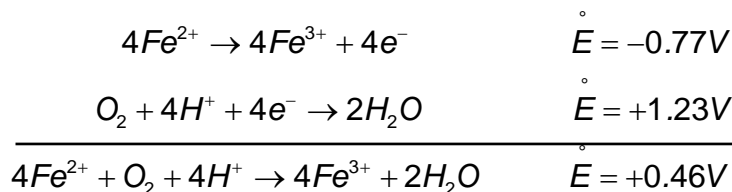
d. Cinética de la formación del drenaje ácido de mina

sulfuros metálicos que intervienen en la generación de drenajes ácidos de mina presentan distinto grado de reactividad. Inicialmente la oxidación de la pirita se basa en la adsorción del oxígeno y el agua por el ion ferroso de la superficie del mineral; como resultado se forman en sus superficies oxihidróxidos intermedios dependiendo del pH. En condiciones ácidas el mayor oxidante de la pirita es el ion ferroso según la siguiente ecuación:



El ion ferroso que se produce puede ser oxidado por el oxígeno disuelto disponible.

La reacción determinante del proceso global de la oxidación de la pirita está controlada por la oxidación del ion ferroso a ion férrico.



El potencial estándar de la reacción es positivo, lo cual indica que la oxidación del ion ferroso en presencia de oxígeno es termodinámicamente

favorable. La velocidad de reacción es un parámetro muy importante a considerar en la oxidación de la piritita debido a que esta determinará el impacto que ocasionará las aguas ácidas en el ecosistema; siendo esta:

$$-\frac{d[Fe^{2+}]}{dt} = k[Fe^{2+}][OH^-]^2 p_{O_2}$$

$$-\frac{d[Fe^{2+}]}{[Fe^{2+}]dt} = k[OH^-]^2 p_{O_2}$$

$$k = 8.0(\pm 2.5) \times 10^{13} \frac{L^2}{atm \times min \times mol^2} \quad \text{a } 20^\circ C$$

Considerando la presión parcial del oxígeno constante, y teniendo en cuenta, además que el producto iónico del agua es:

$$k_w = [H^+][OH^-]$$

Reemplazando en la ecuación anterior se tiene:

$$Velocidad = k \times \left(\frac{k_w}{[H^+]} \right)^2 \times p_{O_2} \Rightarrow Velocidad = k \times k_w^2 \times p_{O_2} \times \frac{1}{[H^+]^2}$$

Tomando logaritmos en ambos lados de la ecuación se tiene:

$$\log(velocidad) = \log k' + 2pH, \text{ donde: } k' = k \times k_w^2 \times p_{O_2}$$

De acuerdo a la ecuación anterior, la gráfica del logaritmo de la velocidad vs el pH tendría una recta con pendiente igual a dos, pero experimentalmente se observa que esto solo ocurre a pH mayores a cinco (ver figura 8).

Se comprueba además que a bajos valores de pH la velocidad de oxidación del ion Fe^{2+} es independiente del pH. En conclusión, a pH mayor a cinco, la velocidad de oxidación del ion Fe^{2+} depende del pH del medio, en tanto que a pH menores a cinco la oxidación del ion Fe^{2+} es muy lenta.

La oxidación del ion ferroso a bajos pH no coincide con lo que se observa en condiciones naturales, en las que la oxidación del ion ferroso a ion férrico se produce de una manera muy rápida. Según (MURR, 1980), esto se debe a que en aguas muy ácidas la oxidación del ion ferroso puede

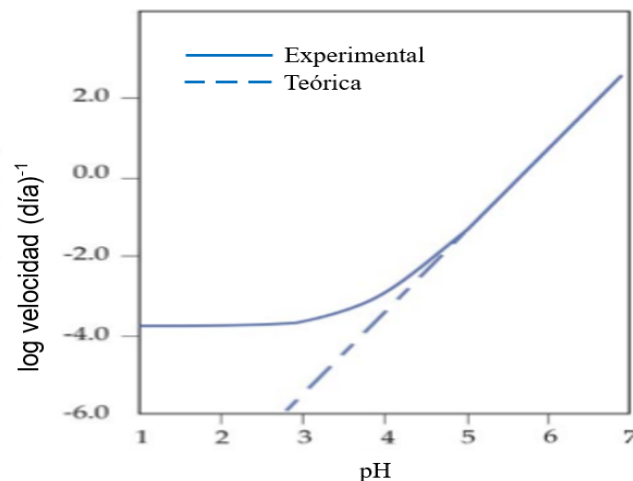
verse incrementado desde 10^4 a 10^6 veces por bacterias acidofílicas, que actúan como catalizadores de la oxidación del ion ferroso.

Se comprueba además que a bajos valores de pH la velocidad de oxidación del ion Fe^{2+} es independiente del pH. En conclusión, a pH mayor a cinco, la velocidad de oxidación del ion Fe^{2+} depende del pH del medio.

La oxidación del ion ferroso a bajos pH no coincide con lo que se observa en condiciones naturales, en las que la oxidación del ion ferroso a ion férrico se produce de una manera muy rápida. Según (MURR, 1980), esto se debe a que en aguas muy ácidas la oxidación del ion ferroso puede verse incrementado desde 10^4 a 10^6 veces por bacterias acidofílicas que actúan como catalizadores de la oxidación del ion ferroso.

Figura 8

Velocidad de oxidación del catión ferroso



Nota: El pH influye en la velocidad de reacción del DAM. Fuente: (MIGUEL, 2014)

e. Manejo del drenaje ácido de mina

Para el manejo del DAM se debe tener en consideración en primer lugar, la predicción de los potenciales recursos capaces de generar acidez, y, en segundo lugar, la formación de drenajes.

▪ Predicción

En esta etapa es importante determinar e identificar los posibles recursos de una mina que sean capaces de generar acidez. Para tal propósito se

emplean dos test a escala de laboratorio; el test estático que se utiliza para determinar si los recursos minerales pueden generar ácido como por ejemplo la pirita, la determinación de sulfuros que al oxidarse forman sulfatos y por lo tanto generan también ácido sulfúrico, los metales presentes, entre otros. También se tiene el test cinético que permite modelar el comportamiento del mineral con lo cual se puede predecir el tiempo en que se acidificaría un drenaje, el pH, los metales de roca que pueden lixiviarse, si los microorganismos son capaces de proliferar en el material de estudio.

▪ **Prevención**

A través de la predicción se puede estimar la existencia de minerales potenciales que pueden generar acidez dentro de la mina; con esta información se procede a realizar trabajos de prevención para evitar la generación del drenaje ácido de mina. Las técnicas de prevención se clasifican en métodos especiales de manejo, uso de cubiertas secas y cubiertas húmedas.

El método especial de manejo, una de las estrategias más utilizadas, consiste en la mezcla con materia orgánica que permite la reducción de sulfatos a sulfuros con la consecuente precipitación de los metales pesados. El método de la cubierta seca está diseñado para prevenir la generación de drenajes de ácidos de mina en lugares en donde se acopian los minerales estériles, de las colas que proceden del beneficio de los minerales, entre otros.

El método de cubiertas húmedas tiene el mismo propósito que las secas, minimizar el ingreso del oxígeno atmosférico hacia los minerales sulfurados; esto se logra debido a que el oxígeno disuelto en el agua es inferior al contenido en el aire.

2.3.2. Coagulación

Es un proceso que consiste en la desestabilización química de las partículas coloidales mediante la neutralización de sus cargas eléctricas por medio de la adición de coagulantes químicos” (MANAHAN, 2007).

La coagulación es un método muy utilizado en el tratamiento de efluentes de diversa naturaleza; si el proceso de coagulación no se realiza correctamente se puede degradar la calidad del agua, por lo que es importante considerar la dosis correcta del coagulante y los RPM de la agitación de la mezcla.

Los coagulantes son sustancias químicas que son capaces de reaccionar con los componentes químicos del agua para formar un precipitado constituido principalmente por el hidróxido metálico del coagulante; algunos coagulantes utilizados en el tratamiento del agua son sulfato de aluminio, aluminato de sodio, cloruro de aluminio, cloruro férrico, sulfato férrico, sulfato ferroso, entre otros; de los coagulantes antes mencionados, los más utilizados son las sales de aluminio y hierro, estas en el agua producen una serie de reacciones muy complejas donde los productos de la hidrólisis son más eficaces que los iones mismos y producen los hidróxidos de aluminio o hierro que son insolubles y forman precipitados.

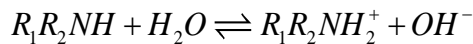
En el proceso de coagulación hay factores o parámetros que se deben tomar en cuenta; algunos de estos factores son el pH, turbidez, sales disueltas, temperatura del agua, tipo de coagulante, condiciones de mezcla, entre otros; la interrelación entre cada uno de ellos permite determinar la dosis óptima de coagulante que se debe adicionar al agua.

2.3.3. Floculación

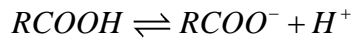
Según (DE VARGAS, 2004) la floculación es el proceso que sigue a la coagulación, consiste en la agitación de la masa coagulada para incrementar el crecimiento y aglomeración de los flóculos recién formados para su posterior sedimentación es favorecida por el mezclado lento que permite aglomerar a los flóculos; un mezclado intenso los rompe y es poco probable que se vuelvan a formar en su tamaño y fuerzas óptima.

Los floculantes son polímeros o polielectrolitos, pueden ser de naturaleza mineral, orgánico natural u orgánico de síntesis. Los polielectrolitos pueden clasificarse como catiónicos y como aniónicos; los polielectrolitos

catiónicos son poliaminas que hidrolizan con el agua según:



A pH elevado la reacción se desplaza hacia la izquierda y el polímero se vuelve no iónico. De forma análoga, los polímeros aniónicos incorporan a su estructura un grupo carboxilo que en el agua se ioniza según:



A pH bajo la reacción se desplaza hacia la izquierda y transforma el polímero aniónico en no iónico. De acuerdo a lo anterior, los polímeros catiónicos se utilizan a bajos pH y los aniónicos a altos pH.

2.4. Definición de términos básicos

a. Contaminación del agua

Presencia en el agua de materiales dañinos que producen efectos adversos sobre mantos acuíferos, cuerpos de agua, ecosistemas, y salud pública; los materiales dañinos son microorganismos, sustancias químicas, residuos industriales o domésticos que deterioran la calidad del agua (SANCHEZ, 2011).

b. Aguas residuales

Según (VESILIND, y otros, 2013) las aguas residuales son aquellas cuyas propiedades se encuentran alteradas debido a su uso doméstico, industrial, agrícola u otros. Los componentes de las aguas residuales pueden ser sustancias sólidas, líquidas o gases tales como carbohidratos, pesticidas, sales fenoles, metales pesados entre otros que le dan al agua residual características como olor, color alcalinidad, pH.

c. Potencial de hidrógeno

Es un parámetro que mide la concentración de iones hidronio presentes en el agua (SEVERICHE, y otros, 2013). El grado de acidez de una sustancia en base a la concentración de los iones hidrógeno presente en la solución, por lo que proporciona un valor característico relacionado con el nivel de acidez intrínseca de la solución que se analiza. El pH del agua

residual influye en su tratamiento, como consecuencia, el efluente puede modificar la concentración del ion hidrógeno del cuerpo receptor.

d. Carbonatos pedogénicos

Son los depósitos de los carbonatos secundarios precipitados en el suelo. Dos procesos se involucran en su formación: la lixiviación de carbonatos primarios y la transformación en ambientes superficiales de minerales primarios (CABADAS-BAEZ, y otros, 2016)

e. Alcalinidad

La alcalinidad es la capacidad del agua para neutralizar a los ácidos y es la suma de todas las bases titulables (SEVERICHE, y otros, 2013). Es decir, indica la variación que ocurrirá en el pH con la adición de cantidades moderadas de ácido. La alcalinidad de la mayoría de las aguas naturales está constituida principalmente por iones de carbonato, bicarbonato e hidróxido.

f. Drenaje ácido de mina

El drenaje ácido de mina es el agua contaminada que se origina por la oxidación natural de minerales sulfurados contenidos en las rocas, principalmente pirita, que han sido expuestos al aire y al agua, lo que genera una reducción del pH del agua de infiltración y lixiviación de metales (Predicción y estudio de drenaje ácido de mina sobre mineral de escombrera, 2021).

g. Proceso de neutralización

La neutralización del drenaje ácido de mina con sustancias alcalinas, tales como, cal, cal hidratada, caliza triturada, sosa caústica, entre otros; se produce a través de reacciones que consumen protones (H^+) que se encuentra contenido en soluciones ácidas. Estas reacciones ocurren de manera natural cuando los metales que generan acidez (sulfuros ricos en hierro) coexisten con minerales neutralizadores; lo minerales que son capaces de neutralizar la acidez son los carbonatos, silicatos e hidróxidos (LOTTEMOSER, 2010)

h. Tratamiento convencional

Se basan en la adición de cal, lechada de cal, caliza triturada, sosa caústica, carbonato sódico o amoniaco con la finalidad de neutralizar el ácido y alcanzar las condiciones adecuadas para la precipitación de los metales pesados (ADUVIRI, 2006). Los metales pesados precipitan como hidróxidos en un rango de pH de 8,5 a 10; por ejemplo, el Fe^{2+} se convierte en $\text{Fe}(\text{OH})_2$ a pH mayores a 8,5 en tanto el manganeso se hace insoluble a pH mayores a 9,5. La adición de reactivos para elevar el pH de agua ácida se conocen con tratamientos activos, siendo estos, los métodos más comunes en el tratamiento del DAM.

III. HIPÓTESIS Y VARIABLES

3.1. Hipótesis

3.1.1. Hipótesis general

H_g: El tratamiento convencional con una etapa adicional de sulfuración aumenta significativamente la remoción de los metales pesados del drenaje ácido de mina de la unidad minera Cerro de Pasco del distrito de Simón Bolívar, Pasco.

H₀: El tratamiento convencional con una etapa adicional de sulfuración no aumenta significativamente la remoción de los metales pesados del drenaje ácido de mina de la unidad minera Cerro de Pasco del distrito de Simón Bolívar, Pasco.

3.1.2. Hipótesis específicas

Hipótesis Alternas

H₁: La dosis de cal en la etapa de alcalinización aumenta significativamente la remoción de los metales del drenaje ácido de mina de la unidad minera Cerro de Pasco del distrito de Simón Bolívar, Pasco.

H₂: La dosis de sulfhidrato de sodio, NaSH, en la etapa de sulfuración aumenta significativamente la remoción de los metales del drenaje ácido de mina de la unidad minera Cerro de Pasco del distrito de Simón Bolívar, Pasco.

H₃: El gradiente de velocidad en la etapa de sulfuración aumenta significativamente la remoción de los metales del drenaje ácido de mina de la unidad minera Cerro de Pasco del distrito de Simón Bolívar, Pasco.

Hipótesis nulas

H₀₁: La dosis de cal en la etapa de alcalinización no aumenta significativamente la remoción de los metales del drenaje ácido de mina de la unidad minera Cerro de Pasco del distrito de Simón Bolívar, Pasco.

H₀₂: La dosis de sulfhidrato de sodio, NaSH, en la etapa de sulfuración no aumenta significativamente la remoción de los metales del drenaje ácido de mina de la unidad minera Cerro de Pasco del distrito de Simón Bolívar, Pasco.

H₀₃: El gradiente de velocidad en la etapa de sulfuración no aumenta significativamente la remoción de los metales del drenaje ácido de mina de la unidad minera Cerro de Pasco del distrito de Simón Bolívar, Pasco.

3.2. Operacionalización de variables

Tabla 5
Operacionalización de variables

	Variables	Definición conceptual	Definición operacional	Dimensiones	Indicadores	Índice/ítem	Método	Técnica
Independiente	Tratamiento convencional del drenaje ácido de mina con una etapa adicional de sulfuración	Consiste en la adición de sustancias alcalinas como la cal y/o caliza y NaSH para aumentar el pH del drenaje ácido de mina (DENEGRIMUÑOZ, y otros, 2020)	Neutralizar el drenaje ácido de mina con cal, seguido de una sulfuración para la remoción de los metales Fe, Zn, Pb y Cu	Adición de sustancias alcalinas como la cal, (mg/L)	Dosis de cal al 10% m/V	32 a 40 mL/L	Experimental	Observacional
				Adición de sustancias, NaSH, (mg/L)	Dosis de NaSH al 10% m/V	0,5 a 1,0 mL/L	Experimental	Observacional
				Velocidad de operación	Gradiente de velocidad	158 a 210 s ⁻¹	Experimental	Observacional
Dependiente	Calidad del drenaje ácido de mina para su disposición final	Agua tratada para satisfacer la demanda de diferentes sectores, incluidos la industria y la agricultura (RODRÍGUEZ, y otros, 2020)	Cantidad de agua disponible que cumpla con la normatividad ambiental para su disposición final	Concentración de los metales pesados en el agua tratada	Conc. de hierro Conc. de plomo Conc. de cobre Conc. de cinc Porcentaje de remoción de metales	Menor a 2,0 mg/L Menor a 0,2 mg/L Menor a 0,5 mg/L Menor a 1,5 mg/L $\%R = \frac{Ci - Cf}{Cf}$	Espectrometría de absorción atómica de llama Espectrometría de absorción atómica de llama	EPA 200.8 Revisión 5.4 1994 EPA 200.8 Revisión 5.4 1994

IV. METODOLOGÍA DEL PROYECTO

4.1. Diseño metodológico

La presente investigación es de tipo aplicada porque los conocimientos desarrollados ayudaron a resolver un problema. Por su enfoque es cuantitativo, ya que tomó en cuenta los principios teóricos y empleó métodos cuantitativos para la recolección de datos. Por su nivel es explicativo, debido a que se tiene una relación causal, recogiendo información sobre las variables en estudio para describir las características y rasgos importantes de las mismas y encontrar las causas del mismo (HERNÁNDEZ, y otros, 2014)

4.2. Método de investigación

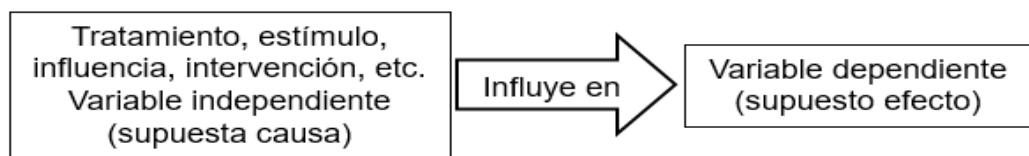
La presente investigación es de tipo experimental de causa y efecto de la forma, $y = f(x)$, donde:

y = variable dependiente

x = variable independiente, como se visualiza en la figura 9

Figura 9

Esquema de la función $y = f(x)$



La investigación consistió en el tratamiento del DAM que sale de la laguna Quiulacocha y discurre hacia el río San Juan, se neutralizó con dosis de Cal en la etapa de alcalinización y dosis de sulfhidrato de sodio, NaSH, en la etapa de sulfuración, para aumentar la remoción de los metales. El trabajo experimental y de gabinete se desarrolló en cuatro etapas.

Etapa 1: Muestreo de campo del drenaje ácido de mina

Se tomó muestras de drenaje ácido de mina a la salida de la laguna Quiulacocha, que discurren hacia el río San Juan. Se obtuvieron muestras puntuales, que se recolectó 20 litros por cada hora durante cinco horas;

de las muestras acumuladas en un depósito de cien litros, se obtuvo una muestra compuesta de cuarenta litros para su caracterización y posterior tratamiento.

Etapa 2: Caracterización y tratamiento de las muestras de drenaje ácido de mina

La caracterización fisicoquímica del drenaje ácido de mina se realizó en el punto de muestreo y en el laboratorio de Tecsup – Lima. Los parámetros que se midieron fueron el pH, temperatura, conductividad, ORP, sólidos suspendidos totales y sólidos totales.

Etapa 3: Procesamiento de los resultados obtenidos

Los datos recopilados del tratamiento del DAM se procesaron mediante el software estadístico SPSS

Etapa 4: determinación de las dosis adecuadas de cal y NaSH

De acuerdo al diseño experimental aplicado se realizó tratamientos del drenaje ácido de mina con diferentes combinaciones de soluciones de cal, NaSH y RPM; con los cuales se determinó las dosis y RPM adecuados para el tratamiento de drenaje.

4.3. Población y muestra

4.3.1. Población

La población puede ser definida como el total de las unidades de estudio, estas unidades pueden ser personas, objetos, conglomerados, hechos o fenómenos que representan las características para la investigación (ÑAUPAS PAITAN, y otros, 2018). La población de la investigación fueron las aguas de la laguna Quiulacocha que está ubicada en la cordillera central de Perú del departamento de Pasco, provincia de Pasco, distrito de Simón Bolívar (76°16'19" latitud oeste, 10°44'17" latitud sur), a unos 280 km de Lima y a 130 km de La Oroya, y con una altitud de 4266 m sobre el nivel de mar.

4.3.2. Muestra

La muestra es, en esencia, un sub grupo de la población. Digamos que es un subconjunto de elementos que pertenecen a ese conjunto definido en sus características al que llamamos población (HERNÁNDEZ, y otros, 2014). La muestra es una porción de la población que por lo tanto tiene las características necesarias para la investigación, es suficientemente clara para que no haya confusión alguna (ÑAUPAS PAITAN, y otros, 2018). En la presente investigación las muestras fueron puntuales, estas se recolectaron durante el día hasta obtener 100 litros, de esta se extrajo una muestra compuesta de 40 litros que se caracterizó (pH, conductividad, temperatura y ORP) en el lugar; el resto de sus características fisicoquímicas y tratamiento se realizó en los laboratorios de Tecsup. Para determinar el tamaño de la muestra se consideró el gasto del DAM en su caracterización y tratamientos con sus respectivas réplicas según el diseño factorial 2^K , donde "K" es igual al número de factores (tres). Para cada tratamiento se utilizó un litro de muestra, por lo que se requirió en total 16 litros de DAM.

Figura 10

Drenaje ácido de mina antes de su tratamiento

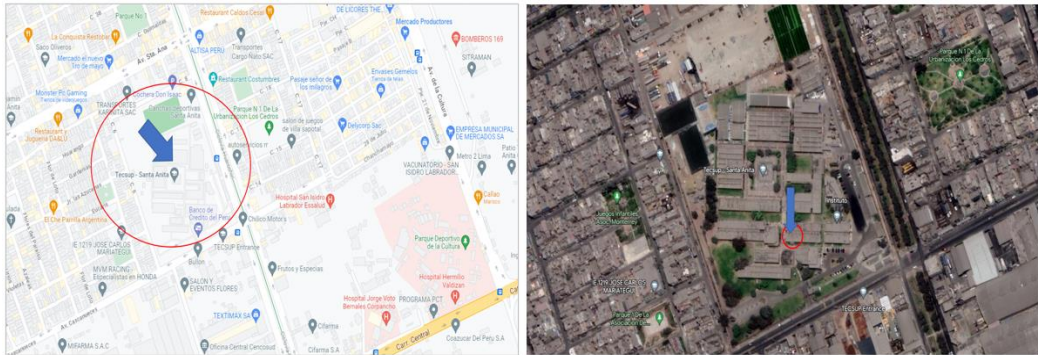


4.4. Lugar de estudio

Una parte de los parámetros fisicoquímicos se midió en el punto de muestreo, a la salida del DAM de la laguna Quiulacocha; el resto de sus parámetros y su tratamiento se realizó en el laboratorio de Tecsup – Lima.

Figura 11

Ubicación de Tecsup en el distrito de Santa Anita, Lima



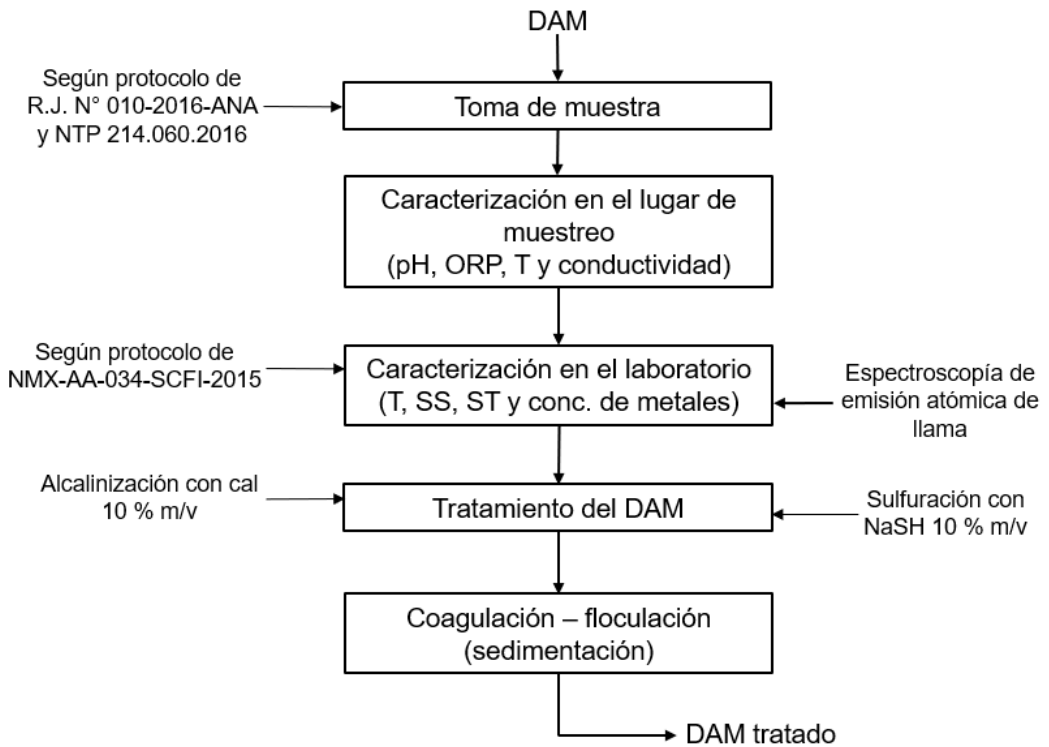
Fuente: Google Maps, 2023.

4.5. Técnicas e instrumentos para la recolección de información

Para la presente investigación, la toma de muestras del DAM se realizó según el Protocolo Nacional para el Monitoreo de la Calidad de los Recursos Hídricos Superficiales (R.J. N° 010-2016-ANA y NTP 214.060 2016).

Figura 12

Secuencia de muestreo, caracterización y tratamiento del DAM



La medición de sólidos suspendidos y sólidos totales se realizó según la norma mexicana NMX-AA-034-SCFI-2015. Y La medición de la concentración de metales se realizó de acuerdo al Estándar Methods APHA y AWWA. Se utilizó equipos para el monitoreo de aguas residuales tales como turbidímetro HACH, multiparámetro HANNA y espectrómetro de absorción atómica PERKINELMER PinAAcle 500. Una vez caracterizado el DAM, se trató mediante alcalinización con una etapa adicional de sulfuración para aumentar la remoción de los metales en el agua.

4.6. Análisis y procesamiento de datos

El diseño experimental y el procesamiento de los datos obtenidos se realizó mediante el software SPSS, se utilizó para encontrar las condiciones de operación óptima, en este caso, para determinar las dosis adecuadas de cal y sulfhidrato de sodio (NaSH), también se realizó el análisis estadístico de los datos para determinar las variaciones de calidad del efluente tratado, curvas de tendencia para el análisis descriptivo para cada metal removido de drenaje ácido de mina.

4.6.1. Parámetros fisicoquímicos del drenaje ácido de mina

Se realizó en el punto de muestreo y en el laboratorio de Tecsup -Lima, cuyos resultados se muestran en la siguiente tabla.

Tabla 6
Parámetros fisicoquímicos iniciales de DAM proveniente de la laguna Quiulacochoa

Parámetros medidos en campo		Parámetros medidos en el laboratorio	
Temperatura (°C)	4	Temperatura (°C)	17
pH	2.32	pH	2.32
Conductividad (mS/cm)	10680	SST (mg/L)	64
ORP (mV)	656	ST (mg/L)	20016

Figura 13
pH y conductividad inicial del DAM



4.6.2. Diseño experimental del tratamiento de drenaje ácido de mina

El diseño de experimentos consiste en determinar cuáles pruebas se deben realizar y de qué manera, para obtener datos que, al ser analizados estadísticamente, proporcionen evidencias objetivas que permitan responder las interrogantes planteadas, y de esta manera clarificar los aspectos inciertos de un proceso, resolver un problema o lograr mejoras (GUTIERREZ PULIDO, y otros, 2008). Para esta investigación, con la finalidad de obtener datos experimentales del tratamiento del drenaje ácido de mina para su respectivo análisis se realizó el diseño factorial 2^K con tres factores, cada uno con dos niveles, y una réplica completa.

Para el primer factor, cal al 10 % m/v, sus niveles fueron 32 mL/L y 40 mL/L, para el segundo factor, sulfhidrato de sodio (NaSH) al 10 % m/v, sus niveles fueron 0.5 mL/L y 1.0 mL/L, y para el tercer factor, gradiente de velocidad, sus niveles fueron 160 RPM y 240 RPM.

$$\text{N}^\circ \text{ Experimentos} = 2^3 = 8$$

Cada experimento (tratamiento) tuvo su réplica, por lo que en total se realizó 16 experimentos, cada uno con un litro de DAM.

Tabla 7

Diseño de tres factores para el tratamiento de DAM

Corrida	Bloque	Cal (mL/L)	NaSH (mL/L)	Gradiente de velocidad (RPM)
1	1	32	0.5	160
2	1	32	0.5	240
3	1	32	1.0	160
4	1	32	1.0	240
5	1	40	0.5	160
6	1	40	0.5	240
7	1	40	1.0	160
8	1	40	1.0	240
9	2	32	0.5	160
10	2	32	0.5	240
11	2	32	1.0	160
12	2	32	1.0	240
13	2	40	0.5	160
14	2	40	0.5	240
15	2	40	1.0	160
16	2	40	1.0	240

Nota: cal es una mezcla de óxido de calcio con agua al 10 % m/v conocido como lechada de cal, en tanto NaSH es una solución al 10 % m/v

Para interpretar mejor los resultados, acerca de la influencia de la cal, sulfhidrato de sodio (NaSH) y el gradiente de velocidad en la precipitación de los metales pesados contenidos en el DAM se elaboró tablas cruzadas para el hierro, cobre, plomo y zinc a partir del diseño factorial 2^K .

Tabla 8

Tabla cruzada del diseño factorial para el tratamiento de DAM

Cal al 10 % (mL/L)	GRADIENTE DE VELOCIDAD			
	160		240	
	NaSH al 10 % (mL/L)			
	0,5	1,0	0,5	1,0
32	111	121	112	122
	111	121	112	122
40	211	221	212	222
	211	221	212	222

4.6.3. Procesamiento de datos y análisis estadístico

El procesamiento de los datos obtenidos del tratamiento del drenaje ácido de mina se realizó mediante el uso del software estadístico SPSS; asimismo para el análisis de los datos obtenidos en la parte experimental se tuvo como referencia los LMP de efluentes minero-metalúrgicos a través del D.S. N° 010-2010-MINAM y el ECA para el agua a través del D.S. N° 004-2017-MINAM.

4.6.4. Determinación de la eficiencia de la remoción de los metales pesados

Después del tratamiento del drenaje ácido de mina mediante alcalinización adicional con una etapa adicional de sulfuración, una muestra del agua clarificada se analizó mediante en un espectrómetro de absorción atómico para determinar la cantidad de hierro, cobre plomo y cinc removido. Con los resultados obtenidos se determinó el porcentaje de remoción para cada uno de los metales.

4.7. Aspectos éticos en investigación

La presente investigación titulada, "TRATAMIENTO CONVENCIONAL CON UNA ETAPA ADICIONAL DE SULFURACIÓN PARA EL DRENAJE ÁCIDO DE MINA DE LA UNIDAD MINERA CERRO DE PASCO DEL

DISTRITO DE SIMÓN BOLÍVAR, PASCO” es auténtica y confiable con respecto a la autoría de otros estudios, con el código de ética de investigación aprobado por RDU N° 260-2019-CU, así como con la directiva N° 004-2022-R, ambas establecidas por la Universidad Nacional del Callao.

V. RESULTADOS

5.1. Resultados descriptivos

5.1.1. Características fisicoquímicas iniciales del drenaje ácido de mina de la laguna de Quiulacocha

Los resultados de la caracterización inicial de la muestra se presentan en la tabla 9.

Tabla 9

Cuadro comparativo de los parámetros iniciales de DAM con las normas ambientales LMP y ECA categoría 3

Parámetro	LPM D.S. N° 010-2010- MINAM		ECA – CATEGORÍA 3 D.S. N° 004-2017-MINAM		Valor inicial
	Límite en cualquier momento	Límite para el promedio anual	Agua para riego	Bebida de animales	
pH	6 – 9	6 – 9	6.5 – 8.4	6.5 – 8.4	2.32
SST (mg/L)	50	25	-	-	64
Conductividad (μ S/cm)	-	-	2500	5000	10680
Fe (mg/L)	2.00	1.60	5.00	**	16.030
Cu (mg/L)	0.50	0.40	0.20	0.50	2.998
Pb (mg/L)	0.20	0.16	0.05	0.05	1.157
Zn (mg/L)	1.50	1.20	2.00	24.0	2.571

Se observa que la concentración de los metales pesados supera ampliamente lo exigido por las normas ambientales peruanas, LMP y ECA categoría 3, agua para riego y bebida de animales.

5.1.2. Resultados del tratamiento del drenaje ácido de mina de la laguna Quiulacocha

El tratamiento del DAM se realizó de acuerdo al diseño factorial 2^k , en primer lugar, se neutralizó (alcalinización) con 32 mL/L y 40 mL/L de lechada de cal al 10 % m/v con agitación constante por 20 minutos, luego

se procedió a sulfurar con 0,5 mL/L y 1,0 mL/L de NaSH al 10 % m/v por 30 minutos; en ambos casos el gradiente de velocidad fue de 160 RPM y 240 RPM, según el diseño factorial.

Figura 14

DAM después de su tratamiento por alcalinización y sulfuración



A continuación, se presentan los resultados obtenidos para los metales hierro, cobre, plomo y cinc considerando a los tres factores que influyen en su tratamiento: cal al 10 % m/v con dosis de 32 mg/L y 40 mg/L, sulfhidrato de sodio (NaSH) al 10 % m/v con dosis de 0.5 mg/L y 1.0 mg/L; y gradiente de velocidad en los niveles de 160 RPM y 240 RPM

Tabla 10

Resultados del tratamiento de DAM por alcalinización y sulfuración para el hierro

Cal al 10 % (mL/L)	GRADIENTE DE VELOCIDAD (rpm)			
	160		240	
	NaSH al 10 % (mL/L)			
	0,5	1,0	0,5	1,0
32	0.257	0.164	0.136	0.163
	0.253	0.165	0.135	0.161
40	0.273	0.284	0.205	0.204
	0.270	0.281	0.207	0.201

Nota. La media de los resultados obtenidos para el hierro es 0.20994 mg/L

Tabla 11

Resultados del tratamiento de DAM por alcalinización y sulfuración para el cobre

Cal al 10 % (mL/L)	GRADIENTE DE VELOCIDAD (rpm)			
	160		240	
	NaSH al 10 % (mL/L)			
	0,5	1,0	0,5	1,0
32	0.002	0.002	0.003	0.003
	0.003	0.002	0.003	0.003
40	0.004	0.005	0.007	0.001
	0.006	0.005	0.005	0.002

Nota. La media de los resultados obtenidos para el cobre es 0.00350 mg/L

Tabla 12

Resultados del tratamiento de DAM por alcalinización y sulfuración para el plomo

Cal al 10 % (mL/L)	GRADIENTE DE VELOCIDAD (rpm)			
	160		240	
	NaSH al 10 % (mL/L)			
	0,5	1,0	0,5	1,0
32	0.001	0.003	0.005	0.003
	0.002	0.004	0.004	0.003
40	0.006	0.007	0.001	0.008
	0.007	0.008	0.001	0.005

Nota. La media de los resultados obtenidos para el plomo es 0.00425 mg/L

Tabla 13

Resultados del tratamiento de DAM por alcalinización y sulfuración para el cinc

Cal al 10 % (mL/L)	GRADIENTE DE VELOCIDAD (rpm)			
	160		240	
	NaSH al 10 % (mL/L)			
	0,5	1,0	0,5	1,0
32	1.366	1.199	1.255	1.495
	1.488	1.212	1.459	1.280
40	0.859	1.002	1.270	1.092
	0.909	1.009	1.256	1.089

Nota. La media de los resultados obtenidos para el cinc es 1.2025 mg/L

Tabla 14

Concentración de los metales después del tratamiento del DAM mediante alcalinización

Muestra	Bloque	Cal (mL/L)	G.V. (RPM)	[Fe] (mg/L)	[Cu] (mg/L)	[Pb] (mg/L)	[Zn] (mg/L)
M01	1	32	160	0.397	0.035	0.650	1.356
M02		40	160	0.305	0.028	0.694	1.497
M03		32	240	0.298	0.031	0.665	1.342
M04		40	240	0.376	0.033	0.698	1.400
RÉPLICA							
M05	2	32	160	0.388	0.038	0.633	1.377
M06		40	160	0.322	0.032	0.672	1.490
M07		32	240	0.301	0.035	0.645	1.388
M08		40	240	0.368	0.029	0.680	1.397

Tabla 15

Promedio de las concentraciones de los metales después del tratamiento del DAM mediante alcalinización

Muestra	Cal (mL/L)	G.V. (RPM)	[Fe] (mg/L)	[Cu] (mg/L)	[Pb] (mg/L)	[Zn] (mg/L)
M01 + M05	32	160	0.3925	0.0365	0.6415	1.3665
M02 + M06	40	160	0.3235	0.0300	0.6830	1.4935
M03 + M07	32	240	0.2995	0.0330	0.6550	1.3650
M04 + M08	40	240	0.3720	0.0310	0.6890	1.3985

Tabla 16

Porcentaje de remoción de los metales después de la alcalinización del drenaje ácido de mina

Muestra	Cal (mL/L)	G.V. (RPM)	Fe (%)	Cu (%)	Pb (%)	Zn (%)
M01 + M05	32	160	97.55	98.78	44.55	46.85
M02 + M06	40	160	97.98	99.00	40.97	41.91
M03 + M07	32	240	98.13	98.90	43.39	46.91
M04 + M08	40	240	97.68	99.97	40.45	45.60

Los resultados obtenidos del tratamiento del drenaje ácido de mina mediante alcalinización con cal al 10 % m/v con niveles de 32 mL/L y 40 mL/L, y gradiente de velocidad con niveles de 160 RPM y 240 RPM. Se aplicó el diseño factorial 2^k , para K igual a dos factores (cal y gradiente de velocidad). Los resultados fueron favorables para los metales Fe, Cu y Zn; la concentración final de dichos metales en el DAM después del

tratamiento se encuentra por debajo de los valores exigidos por las normas ambientales; sin embargo, esto no ocurrió con el plomo tal como se puede observar en la tabla 15. De acuerdo a los LMP para efluentes minero-metalúrgicos debe ser igual o menor a 0.16 mg/L, y de acuerdo al ECA para el agua debe ser igual o menor a 0.05 mg/L.

Para determinar el porcentaje de remoción de los metales se utilizó la siguiente ecuación:

$$\% R = \frac{C_{\text{inicial}} - C_{\text{final}}}{C_{\text{inicial}}} \times 100$$

La concentración inicial de los metales se encuentra en tabla N° 9, y las concentraciones finales, luego de la alcalinización del DAM, se encuentra en la tabla N° 15. Como ya se comentó en el párrafo anterior solo la alcalización del DAM no es suficiente ya que su remoción no ha sido óptima, es decir, no se ha cumplido con el LMP y ECA. En el caso del cinc, el porcentaje de remoción no alto, pero es suficiente para cumplir con las normas ambientales LMP y ECA.

Tabla 17

Resultados del tratamiento del DAM mediante alcalinización y sulfuración

Muestra	Bloque	Cal al 10 % (mL/L)	NaSH al 10 % (mL/L)	Gradiente de velocidad	[Fe] (mg/L)	[Cu] (mg/L)	[Pb] (mg/L)	[Zn] (mg/L)
M01	1	32	0.5	160	0.164	0.002	0.003	1.199
M02		32	0.5	240	0.163	0.003	0.003	1.495
M03		32	1.0	160	0.257	0.002	0.001	1.366
M04		32	1.0	240	0.136	0.003	0.005	1.255
M05		40	0.5	160	0.284	0.004	0.007	1.002
M06		40	0.5	240	0.204	0.007	0.008	1.092
M07		40	1.0	160	0.273	0.005	0.006	0.859
M08		40	1.0	240	0.205	0.001	0.001	1.270
RÉPLICA								
M09	2	32	0.5	160	0.165	0.003	0.004	1.212
M10		32	0.5	240	0.161	0.003	0.003	1.280
M11		32	1.0	160	0.253	0.002	0.002	1.488
M12		32	1.0	240	0.135	0.003	0.004	1.459
M13		40	0.5	160	0.281	0.006	0.008	1.009
M14		40	0.5	240	0.201	0.005	0.005	1.089
M15		40	1.0	160	0.270	0.005	0.007	0.909
M16		40	1.0	240	0.207	0.002	0.001	1.256

Tabla 18

Promedio de las concentraciones de los metales luego del tratamiento mediante alcalinización y sulfuración

Muestra	Cal al 10 % (mL/L)	NaSH al 10 % (mL/L)	G.V (RPM)	[Fe] (mg/L)	[Cu] (mg/L)	[Pb] (mg/L)	[Zn] (mg/L)
M01 + M09	32	0.5	160	0.1645	0.0025	0.0035	1.2055
M02 + M10	32	0.5	240	0.1620	0.0030	0.0030	1.3875
M03 + M11	32	1.0	160	0.2550	0.0020	0.0015	1.4270
M04 + M12	32	1.0	240	0.1355	0.0030	0.0045	1.3570
M05 + M13	40	0.5	160	0.2825	0.0050	0.0075	1.0055
M06 + M14	40	0.5	240	0.2025	0.0060	0.0065	1.0905
M07 + M15	40	1.0	160	0.2715	0.0050	0.0065	0.8840
M08 + M16	40	1.0	240	0.2060	0.0015	0.0010	1.2630

Tabla 19

Porcentaje de remoción de los metales después de alcalinización y sulfuración del DAM

Muestra	Cal al 10 % (mL/L)	NaSH al 10 % (mL/L)	G.V (RPM)	Fe (%)	Cu (%)	Pb (%)	Zn (%)
M01 + M09	32	0.5	160	98.97	99.92	99.69	53.11
M02 + M10	32	0.5	240	98.99	99.90	99.74	46.03
M03 + M11	32	1.0	160	98.41	99.93	99.87	44.50
M04 + M12	32	1.0	240	99.15	99.90	99.61	47.22
M05 + M13	40	0.5	160	98.24	99.83	99.35	60.89
M06 + M14	40	0.5	240	98.74	99.80	99.44	57.58
M07 + M15	40	1.0	160	98.31	99.83	99.44	65.61
M08 + M16	40	1.0	240	98.71	99.95	99.91	50.88

Para el cálculo del porcentaje de remoción luego de la alcalinización y sulfuración, la concentración inicial de los metales se encuentra en tabla N° 9, y las concentraciones finales, luego de la alcalinización del DAM, se encuentra en la tabla N° 18. Luego del tratamiento del DAM mediante alcalinización y sulfuración se obtuvo resultados favorables; la concentración de los metales disueltos en el agua tratada quedó muy por debajo de lo exigido por las normas ambientales, LMP y ECA categoría 3 agua para riego y bebida para animales

La remoción óptima se obtiene con 40 mL de cal y 1.0 mL de NaSH con gradiente de velocidad igual a 160 RPM, 98.31 % para el hierro, 99.83 % para el cobre, 99.44 para el plomo y 65.61 % para el cinc.

Tabla 20

Parámetros fisicoquímicos del DAM con las normas ambientales antes y después de su tratamiento

Parámetro	LPM		ECA – CATEGORÍA 3		Valor Antes del tratamiento	Valor después del tratamiento
	D.S. N° 010-2010-MINAM		D.S. N° 004-2017-MINAM			
	Límite en cualquier momento	Límite para el promedio anual	Agua para riego	Bebida de animales		
pH	6 – 9	6 – 9	6.6-8.5	6.5 – 8.4	2,32	6.7 – 8.8
SST (mg/L)	50	25	-	-	64	4.5
Conductividad (µS/cm)	-	-	2500	5000	10680	67
Fe (mg/L)	2.00	1.60	5.00	*	16.030	0.2715
Cu (mg/L)	0.50	0.40	0.2	0.50	2.998	0.0050
Pb (mg/L)	0.20	0.16	0.05	0.05	1.157	0.0065
Zn (mg/L)	1.50	1.20	2.00	24.00	2.571	0.8840

5.1.3. Procesamiento de los resultados obtenidos del tratamiento del DAM mediante alcalinización y sulfuración

Los resultados obtenidos experimentalmente se procesaron mediante el software estadístico SPSS, y se obtuvieron las medias marginales para los metales hierro, cobre, plomo y cinc con sus respectivas

interacciones; para la presente investigación, los factores son: cal, sulfhidrato de sodio (NaSH) y gradiente de velocidad.

a. Para el hierro

Tabla 21

Medias marginales de la interacción de un factor para el hierro

Un factor		Media	Desv. Error
Cal	32	0.179	0,001
	40	0,241	0.001
NaSH	0,5	0,203	0,001
	1,0	0,217	0,001
Gradiente de velocidad	160	0,243	0,001
	240	0,177	0,001

Tabla 22

Medias marginales de la interacción de dos factores para el hierro

Interacción de dos factores			Media	Desv. Error	
Cal	32	NaSH	0,5	0,163	0,001
	32		1,0	0,195	0,001
	40		0,5	0,243	0,001
	40		1,0	0,239	0,001
	32	Gradiente de velocidad	160	0,210	0,001
	32		240	0,149	0,001
	40		160	0,277	0,001
	40		240	0,204	0,001
NaSH	0,5	Gradiente de velocidad	160	0,224	0,001
			240	0,182	0,001
	1,0		160	0,263	0,001
			240	0,171	0,001

Tabla 23

Medias marginales de la interacción de tres factores para el hierro

Interacción de tres factores			Media	Desv. Error	
Cal	32	0,5	160	0,165	0,001
			240	0,162	0,001
			160	0,255	0,001
		1,0	240	0,135	0,001
			160	0,283	0,001
			240	0,203	0,001
	40	0,5	160	0,271	0,001
			240	0,206	0,001
			160	0,271	0,001
		1,0	240	0,206	0,001
			160	0,271	0,001
			240	0,206	0,001

b. Para el cobre**Tabla 24**

Medias marginales de la interacción de un factor para el cobre

Un factor		Media	Desv. Error
Cal	32	0,003	0,000
	40	0,004	0,000
NaSH	0,5	0,004	0,000
	1,0	0,003	0,000
Gradiente de velocidad	160	0,004	0,000
	240	0,003	0,000

Tabla 25

Medias marginales de la interacción de dos factores para el cobre

Interacción de dos factores			Media	Desv. Error	
Cal	32	0,5	0,003	0,000	
	32	NaSH	1,0	0,003	0,000
	40		0,5	0,006	0,000
	40	1,0	0,003	0,000	
	32	Gradiente de velocidad	160	0,002	0,000
	32		240	0,003	0,000
	40		160	0,005	0,000
	40		240	0,004	0,000
NaSH	0,5	Gradiente de velocidad	160	0,004	0,000
			240	0,004	0,000
	1,0	160	0,004	0,000	
		240	0,002	0,000	

Tabla 26

Medias marginales de la interacción de tres factores para el cobre

Interacción de tres factores			Media	Desv. Error	
Cal	32	0,5	160	0,003	0,000
			240	0,003	0,000
		1,0	160	0,002	0,000
			240	0,003	0,000
	40	0,5	160	0,005	0,000
			240	0,006	0,000
		1,0	160	0,005	0,000
			240	0,002	0,000

c. Para el plomo

Tabla 27

Medias marginales de la interacción de un factor para el plomo

Un factor		Media	Desv. Error
Cal	32	0,003	0,000
	40	0,005	0,000
NaSH	0,5	0,005	0,000
	1,0	0,003	0,000
Gradiente de velocidad	160	0,005	0,000
	240	0,004	0,000

Tabla 28

Medias marginales de la interacción de dos factores para el plomo

Interacción de dos factores			Media	Desv. Error
Cal	32	0,5	0,003	0,000
	32	NaSH	1,0	0,003
	40		0,5	0,007
	40	1,0	0,004	0,000
	32	Gradiente de velocidad	160	0,003
	32		240	0,004
	40		160	0,007
	40		240	0,004
NaSH	0,5	Gradiente de velocidad	160	0,006
			240	0,005
	1,0	160	0,004	0,000
		240	0,003	0,000

Tabla 29

Medias marginales de la interacción de tres factores para el plomo

Interacción de tres factores			Media	Desv. Error	
Cal	NaSH	32	160	0,003	0,001
			240	0,003	0,001
		40	160	0,002	0,001
			240	0,004	0,001
		0,5	160	0,008	0,001
			240	0,007	0,001
	1,0	160	0,007	0,001	
		240	0,001	0,001	

d. Para el cinc**Tabla 30**

Medias marginales de la interacción de un factor para el cinc

Un factor		Media	Desv. Error
Cal	32	1.344	0.029
	40	1.061	0.029
NaSH	0,5	1.172	0,029
	1,0	1.233	0,029
Gradiente de velocidad	160	1.131	0,029
	240	1.275	0,029

Tabla 31

Medias marginales de la interacción de dos factores para el cinc

Interacción de dos factores			Media	Desv. Error
Cal	32	0,5	1.297	0,041
	32	1,0	1.392	0,041
	40	0,5	1.048	0,041
	40	1,0	1.073	0,041
	32	160	1.316	0,041
	32	240	1.372	0,041
	40	160	0.945	0,041
	40	240	1.177	0,041
NaSH	0,5	160	1.106	0,041
		240	1.239	0,041
	1,0	160	1.156	0,041
		240	1.310	0,041

Tabla 32

Medias marginales de la interacción de tres factores para el cinc

Interacción de tres factores			Media	Desv. Error		
Cal	NaSH	0,5	160	1.206	0,057	
			240	1.388	0,057	
		1,0	160	1.427	0,057	
			240	1.357	0,057	
	40	Gradiente de velocidad	0,5	160	1.006	0,057
				240	1.090	0,057
			1,0	160	0.884	0,057
				240	1.263	0,057

5.2. Resultados inferenciales

5.2.1. Prueba de normalidad para las variables independientes

La investigación se desarrolló sobre la base de 16 muestras de DAM, por lo que la prueba de normalidad se realizó mediante el test de Shapiro – Wilk.

a. Para la variable cal

Tabla 33

Prueba de Shapiro – Wilk para la alcalinización del DAM con cal

Respuesta	Cal (mL/L)	Estadístico	gl	Sig.
Fe (mg/L)	32	0.762	8	0.011
	40	0.755	8	0.009
Cu (mg/L)	32	0.641	8	< 0.001
	40	0.922	8	0.450
Pb (mg/L)	32	0.958	8	0.792
	40	0.812	8	0.039
Zn (mg/L)	32	0.875	8	0.168
	40	0.934	8	0.554

Nota: La concentración de cal es 10 % m/v

Tabla 34

Resultados de verificación de la distribución normal de datos mediante la alcalinización con cal

Ho: Los datos tienen una distribución normal Ha: Los datos no tienen una distribución normal Confianza: 95 % Significancia (α): 5 %			
Respuesta	Cal (mL/L)	Discusión	Conclusión
Fe (mg/L)	32	p-valor < 0,05	Se rechaza la Ho, es decir, los datos recopilados no siguen una distribución normal.
	40		
Cu (mg/L)	32	p-valor < 0,05	Se rechaza la Ho, es decir, los datos recopilados no siguen una distribución normal.
	40	p-valor > 0,05	Se acepta la Ho, es decir, los datos recopilados siguen una distribución normal.
Pb (mg/L)	32	p-valor > 0,05	Se acepta la Ho, es decir, los datos recopilados siguen una distribución normal.
	40	p-valor < 0,05	Se rechaza la Ho, es decir, los datos recopilados no siguen una distribución normal.
Zn (mg/L)	32	p-valor > 0,05	Se acepta la Ho, es decir, los datos recopilados siguen una distribución normal.
	40		

Nota: La contrastación de las hipótesis se realizó en base a la tabla 33

b. Para la variable sulfhidrato de sodio, NaSH

Tabla 35

Test de Shapiro – Wilk para la sulfuración del DAM con NaSH

Respuesta	NaSH (mL/L)	Estadístico	gl	Sig.
Fe (mg/L)	0.5	0.769	8	0.013
	1.0	0.846	8	0.087
Cu (mg/L)	0.5	0.919	8	0.425
	1.0	0.872	8	0.156
Pb (mg/L)	0.5	0.825	8	0.053
	1.0	0.867	8	0.141
Zn (mg/L)	0.5	0.906	8	0.324
	1.0	0.867	8	0.141

Nota: La concentración de la solución de NaSH es 10 % m/v

Tabla 36

Resultado de verificación de la normalidad de los datos mediante la sulfuración del DAM con NaSH

		H ₀ : Los datos tienen una distribución normal	
		H _b : Los datos no tienen una distribución normal	
		Confianza: 95 %	Significancia (α): 5 %
Respuesta	NaSH (mL/L)	Discusión	Conclusión
Fe (mg/L)	0.5	p-valor < 0,05	Se rechaza la H ₀ , es decir, los datos recopilados no siguen una distribución normal.
	1.0	p-valor > 0,05	Se acepta la H ₀ , es decir, los datos recopilados siguen una distribución normal.
Cu (mg/L)	0.5	p-valor > 0,05	Se acepta la H ₀ , es decir, los datos recopilados siguen una distribución normal.
	1.0		
Pb (mg/L)	0.5	p-valor > 0,05	Se acepta la H ₀ , es decir, los datos recopilados siguen una distribución normal.
	1.0		
Zn (mg/L)	0.5	p-valor > 0,05	Se acepta la H ₀ , es decir, los datos recopilados siguen una distribución normal.

Nota: La contrastación de las hipótesis se realizó en base a la tabla 35

c. Para la variable gradiente de velocidad

Tabla 37

Test de Shapiro – Wilk para el gradiente de velocidad

Respuesta	Gradiente de velocidad	Estadístico	gl	Sig.
Fe	160	0.742	8	0.007
(mg/L)	240	0.819	8	0.045
Cu	160	0.873	8	0.162
(mg/L)	240	0.878	8	0.181
Pb	160	0.926	8	0.476
(mg/L)	240	0.931	8	0.521
Zn	160	0.941	8	0.616
(mg/L)	240	0.891	8	0.237

Nota: El gradiente de velocidad (GV) está expresado en RPM

Tabla 38

Resultados de verificación de la normalidad de datos con el gradiente de velocidad

H ₀ : Los datos tienen una distribución normal H _c : Los datos no tienen una distribución normal Confianza: 95 % Significancia (α): 5 %			
Respuesta	GV	Discusión	Conclusión
Fe	160	p-valor < 0,05	Se rechaza la H ₀ , es decir, los datos recopilados no siguen una distribución normal.
(mg/L)	240		
Cu	160	p-valor > 0,05	Se acepta la H ₀ , es decir, los datos recopilados siguen una distribución normal.
(mg/L)	240		
Pb	160	p-valor > 0,05	Se acepta la H ₀ , es decir, los datos recopilados siguen una distribución normal.
(mg/L)	240		
Zn	160	p-valor > 0,05	Se acepta la H ₀ , es decir, los datos recopilados siguen una distribución normal.
(mg/L)	240		

Nota: La contrastación de las hipótesis se realizó en base a la tabla 37.

5.2.2. Prueba de normalidad para las variables dependientes

Para el análisis de los resultados se tiene en cuenta los siguiente:

- La unidad de análisis en 1L de drenaje ácido de mina

- Variable dependiente (respuesta): son los metales pesados disueltos (Fe, Cu, Pb y Zn), que quedan en el DAM después de su tratamiento.
- Factor de control: Solución de cal al 10 % m/v, solución de sulfhidrato de sodio (NaSH) al 10 % m/v y gradiente de velocidad.
- Niveles de factor: cada factor tiene dos niveles (baja y alta); cal (32 mL/L y 40 mL/L), NaSH (0.5 mL/L y 1.0 mL/L) y gradiente de velocidad (160 RPM y 240 RPM)
- Análisis de varianza (ANOVA) para cada una de las variables respuesta.

a. Variable hierro

Tabla 39
ANOVA para la variable hierro

Origen	SC	gl	MC	F	Sig.
Cal	0.015	1	0.015	4548.698	< 0.001
NaSH	0.001	1	0.001	240.925	< 0.001
G.V.	0.018	1	0.018	5400.472	< 0.001
Cal-NaSH	0.001	1	0.001	385.830	< 0.001
Cal-G.V.	0.000	1	0.000	41.679	< 0.001
NaSH-G.V.	0.003	1	0.003	792.925	< 0.001
Cal-NaSH-G.V.	0.004	1	0.004	1305.075	< 0.001
Error	2.650E-5	8	3.312E-6		
Total, corregido	0.042	15			

Hipótesis A

H₀: No existe diferencia significativa en los promedios de hierro disuelto en el DAM tratado debido a la aplicación de los factores Cal a los niveles 32 mL y 40 mL, NaSH a los niveles 0.5 mL y 1.0 mL, y Gradiente de velocidad a los niveles 160 RPM y 240 RPM.

H_a: Si existe diferencia significativa en los promedios de hierro disuelto en el DAM tratado debido a la aplicación de los factores Cal a los niveles 32 mL y 40 mL, NaSH a los niveles 0.5 mL y 1.0 mL, y Gradiente de velocidad a los niveles 160 RPM y 240 RPM.

Nivel de significación: 5%

Estadístico de prueba: F de Fisher para un Análisis de varianza de un experimento tri factorial.

ANOVA: Tabla 39

Discusión: La discusión se hizo en primer término a los tres factores solamente, luego la interacción de dos factores y por último la interacción de los tres factores a la vez.

Factor cal

H₀: No existe diferencia significativa en los promedios de hierro disuelto en el DAM debido a la aplicación de los dos niveles de cal (32 mL y 40 mL).

H_a: Si existe diferencia significativa en los promedios de hierro disuelto en el DAM tratado debido a la aplicación de los dos niveles de cal (32 mL y 40 mL).

Discusión

Como el p-valor o Sig. es menor a 0.05 (Tabla 39) se rechaza la hipótesis nula (**H₀**) y se acepta la hipótesis alterna (**H_a**), lo cual implica que, si existe diferencia significativa entre los promedios de hierro disuelto en el DAM tratado debido a la aplicación de los dos niveles de cal (32 mL y 40 mL).

Conclusión

Con un nivel de significancia del 5 %, los datos recopilados evidencian de que, si existe diferencia significativa en los promedios de hierro disuelto en el DAM tratado debido a la aplicación de los dos niveles de cal (32 mL y 40 mL). El promedio de hierro disuelto en el DAM tratado para 32 mL es 0.179 mg/L y para 40 mL es 0.241 mg/L. Ver tabla 21.

Factor NaSH

H₀: No existe diferencia significativa en los promedios de hierro disuelto en el DAM debido a la aplicación de los dos niveles de NaSH (0.5 mL y 1.0 mL).

H_a: Si existe diferencia significativa en los promedios de hierro disuelto en el DAM tratado debido a la aplicación de los dos niveles de NaSH (0.5 mL y 1.0 mL).

Discusión

Como el p-valor o Sig. es menor a 0.05 (Tabla 39) se rechaza la hipótesis nula (**H₀**) y se acepta la hipótesis alterna (**H_a**), lo cual implica que, si existe diferencia significativa entre los promedios de hierro disuelto en el DAM tratado debido a la aplicación de los dos niveles de NaSH (0.5 mL y 1.0 mL).

Conclusión

Con un nivel de significancia del 5 %, los datos recopilados evidencian de que, si existe diferencia significativa entre los promedios de hierro disuelto en el DAM tratado debido a la aplicación de los dos niveles de NaSH (0.5 mL y 1.0 mL). El promedio de hierro disuelto en el DAM tratado para 0.5 mL es 0.203 mg/L y para 1.0 mL es 0.217 mg/L. Ver tabla 21.

Factor Gradiente de Velocidad

H₀: No existe diferencia significativa en los promedios de hierro disuelto en el DAM debido a la aplicación de los dos niveles de gradiente de velocidad (160 RPM y 240 RPM).

H_a: Si existe diferencia significativa en los promedios de hierro disuelto en el DAM tratado debido a la aplicación de los dos niveles de gradiente de velocidad (160 RPM y 240 RPM).

Discusión

Como el p-valor o Sig. es menor a 0.05 (Tabla 39) se rechaza la hipótesis nula (**H₀**) y se acepta la hipótesis alterna (**H_a**), lo cual implica que, si existe

diferencia significativa entre los promedios de hierro disuelto en el DAM tratado debido a la aplicación de los dos niveles de gradiente de velocidad (160 RPM y 240 RPM).

Conclusión

Con un nivel de significancia del 5 %, los datos recopilados evidencian de que, si existe diferencia significativa entre los promedios de hierro disuelto en el DAM tratado debido a la aplicación de los dos niveles de gradiente de velocidad (160 RPM y 240 RPM). El promedio de hierro disuelto en el DAM tratado para 160 RPM es 0.243 mg/L y para 240 RPM es 0.117 mg/L. Ver tabla 21.

Factor interacción cal – NaSH

H₀: No existe diferencia significativa en los promedios de hierro disuelto en el DAM debido a la aplicación de los dos niveles de cal (32 mL y 40 mL), y los dos niveles de NaSH (0.5 mL y 1.0 mL).

H_a: Si existe diferencia significativa en los promedios de hierro disuelto en el DAM tratado debido a la aplicación de los dos niveles de cal (32 mL y 40 mL), y los dos niveles de NaSH (0.5 mL y 1.0 mL).

Discusión

Como el p-valor o Sig. es menor a 0.05 (Tabla 39) se rechaza la hipótesis nula (**H₀**) y se acepta la hipótesis alterna (**H_a**), lo cual implica que, si existe diferencia significativa entre los promedios de hierro disuelto en el DAM tratado debido a la interacción de los dos niveles de cal (32 mL y 40 mL), y de sulfhidrato de sodio (0.5 mL/L y 1.0 mL/L).

Conclusión

Con un nivel de significancia del 5 %, los datos recopilados evidencian de que, si existe diferencia significativa entre los promedios de hierro disuelto en el DAM tratado debido a la interacción de los dos niveles de cal (32 mL y 40 mL), y de NaSH (0.5 mL y 1.0 mL). El promedio de hierro disuelto en el DAM tratado para 32 mL/L de cal y 0.5 mL de NaSH es 0.163 mg/L; para 32 mL de cal y 1.0 mL de NaSH es 0.195 mg/L; para 40 mL de cal y 0.5 mL

de sulfhidrato de sodio es 0.243 mg; para 40 mL de cal y 1.0 mL de NaSH es 0.239 mg/L. Ver tabla 22.

Factor interacción cal – Gradiente de Velocidad

H₀: No existe diferencia significativa en los promedios de hierro disuelto en el DAM debido a la aplicación de los dos niveles de cal (32 mL y 40 mL), y los dos niveles de gradiente de velocidad (160 RPM y 240 RPM).

H_a: Si existe diferencia significativa en los promedios de hierro disuelto en el DAM debido a la aplicación de los dos niveles de cal (32 mL y 40 mL), y los dos niveles de gradiente de velocidad (160 RPM y 240 RPM).

Discusión

Como el p-valor o Sig. es menor a 0.05 (Tabla 39) se rechaza la hipótesis nula (**H₀**) y se acepta la hipótesis alterna (**H_a**), lo cual implica que, si existe diferencia significativa entre los promedios de hierro disuelto en el DAM tratado debido a la interacción de los dos niveles de cal (32 mL y 40 mL), y del gradiente de velocidad (160 RPM y 240 RPM).

Conclusión

Con un nivel de significancia del 5 %, los datos recopilados evidencian de que, si existe diferencia significativa entre los promedios de hierro disuelto en el DAM tratado debido a la interacción de los dos niveles de cal (32 mL y 40 mL), y del gradiente de velocidad (160 RPM y 240 RPM). El promedio de hierro disuelto en el DAM tratado para 32 mL de cal y 160 RPM de gradiente de velocidad es 0.210 mg/L; para 32 mL de cal y 240 RPM es 0.149 mg/L; para 40 mL de cal y 160 RPM es 0.277 mg/L; para 40 mL y 240 RPM es 0.204 mg/L. Ver tabla 22.

Factor interacción NaSH – Gradiente de Velocidad

H₀: No existe diferencia significativa en los promedios de hierro disuelto en el DAM debido a la aplicación de los dos niveles de NaSH (0.5 mL y 1.0 mL), y los dos niveles de gradiente de velocidad (160 RPM y 240 RPM).

H_a: Si existe diferencia significativa en los promedios de hierro disuelto en el DAM debido a la aplicación de los dos niveles de NaSH (0.5 mL y 1.0 mL), y los dos niveles de gradiente de velocidad (160 RPM y 240 RPM).

Discusión

Como el p-valor o Sig. es menor a 0.05 (Tabla 39) se rechaza la hipótesis nula (**H₀**) y se acepta la hipótesis alterna (**H_a**), lo cual implica que, si existe diferencia significativa entre los promedios de hierro disuelto en el DAM tratado debido a la interacción de los dos niveles de NaSH (0.5 mL y 1.0 mL), y del gradiente de velocidad (160 RPM y 240 RPM).

Conclusión

Con un nivel de significancia del 5 %, los datos recopilados evidencian de que, si existe diferencia significativa entre los promedios de hierro disuelto en el DAM tratado debido a la interacción de los dos niveles de NaSH (0.5 mL y 1.0 mL), y del gradiente de velocidad (160 RPM y 240 RPM). El promedio de hierro disuelto en el DAM tratado para 0.5 mL de NaSH y 160 RPM es 0.224 mg/L; para 0.5 mL de NaSH y 240 RPM es 0.182 mg/L; para 1.0 mL de NaSH y 160 RPM es 0.263 mg/L; para 1.0 mL de NaSH y 240 RPM es 0.171 mg/L. Ver tabla 22.

Factor interacción Cal – NaSH – Gradiente de Velocidad

H₀: No existe diferencia significativa en los promedios de hierro disuelto en el DAM debido a la aplicación de los dos niveles de cal (32 mL y 40 mL), los dos niveles de NaSH (0.5 mL y 1.0 mL), y los dos niveles de gradiente de velocidad (160 RPM y 240 RPM).

H_a: Si existe diferencia significativa en los promedios de hierro disuelto en el DAM debido a la aplicación de los dos niveles de cal (32 mL y 40 mL), los dos niveles de NaSH (0.5 mL y 1.0 mL), y los dos niveles de gradiente de velocidad (160 RPM y 240 RPM).

Discusión

Como el p-valor o Sig. es menor a 0.05 (Tabla 39) se rechaza la hipótesis nula (**H₀**) y se acepta la hipótesis alterna (**H_a**), lo cual implica que, si existe

diferencia significativa entre los promedios de hierro disuelto en el DAM tratado debido a la interacción de los dos niveles de cal (32 mL y 40 mL), los dos niveles de NaSH (0.5 mL y 1.0 mL), y del gradiente de velocidad (160 RPM y 240 RPM).

Conclusión

Con un nivel de significancia del 5 %, los datos recopilados evidencian de que, si existe diferencia significativa entre los promedios de hierro disuelto en el DAM tratado debido a la interacción de los dos niveles de cal (32 mL y 40 mL), los dos niveles de NaSH (0.5 mL y 1.0 mL), y del gradiente de velocidad (160 RPM y 240 RPM). Los promedios de hierro disuelto en el DAM tratado como consecuencia de las interacciones de los tres factores, cal, sulfhidrato de sodio y gradiente de velocidad. Ver tabla 23.

b. Variable cobre

Tabla 40
ANOVA para la variable cobre

Origen	SC	gl	MC	F	Sig.
Cal	1.225E-5	1	1.225E-5	19.600	.002
NaSH	6.250E-6	1	6.250E-6	10.000	.013
G. V.	2.500E-7	1	2.500E-7	.400	.545
Cal-NaSH	4.000E-6	1	4.000E-6	6.400	.035
Cal-G.V.	4.000E-6	1	4.000E-6	6.400	.035
NaSH-G.V.	4.000E-6	1	4.000E-6	6.400	.035
Cal-NaSH-G.V.	6.250E-6	1	6.250E-6	10.000	.013
Error	5.000E-6	8	6.250E-7		
Total, corregido	4.200E-5	15			

Hipótesis B

H₀: No existe diferencia significativa en los promedios de cobre disuelto en el DAM tratado debido a la aplicación de los factores Cal a los niveles 32 mL/L y 40 mL/L, NaSH a los niveles 0.5 mL/L y 1.0 mL/L, y Gradiente de velocidad a los niveles 160 RPM y 240 RPM.

H_b: Si existe diferencia significativa en los promedios de cobre disuelto en el DAM tratado debido a la aplicación de los factores Cal a los niveles 32 mL/L y 40 mL/L, NaSH a los niveles 0.5 mL/L y 1.0 mL/L, y Gradiente de velocidad a los niveles 160 RPM y 240 RPM.

Nivel de significación: 5%

Estadístico de prueba: F de Fisher para un Análisis de varianza de un experimento tri factorial.

ANOVA: tabla 40

Discusión: La discusión se hizo tomando en primer término los tres factores solamente, luego la interacción de dos factores y por último la interacción de los tres factores a la vez.

Hipótesis B

Factor: cal

H₀: No existe diferencia significativa en los promedios de cobre disuelto en el DAM debido a la aplicación de los dos niveles de cal (32 mL y 40 mL).

H_b: Si existe diferencia significativa en los promedios de cobre disuelto en el DAM tratado debido a la aplicación de los dos niveles de cal (32 mL y 40 mL).

Discusión

Como el p-valor o Sig. es menor a 0.05 (tabla 40), se rechaza la hipótesis nula (**H₀**) y se acepta la hipótesis alterna (**H_b**), lo cual implica que, si existe diferencia significativa entre los promedios de cobre disuelto en el DAM tratado debido a la aplicación de los dos niveles de cal (32 mL y 40 mL).

Conclusión

Con un nivel de significancia del 5 %, los datos recopilados evidencian de que, si existe diferencia significativa entre los promedios de cobre disuelto en el DAM tratado debido a la aplicación de los dos niveles de cal (32 mL y 40 mL). El promedio de cobre disuelto en el DAM tratado para 32 mL es 0.003 mg/L y para 40 mL es 0.004 mg/L. Ver tabla 24.

Factor: NaSH

H₀: No existe diferencia significativa en los promedios de cobre disuelto en el DAM debido a la aplicación de los dos niveles de NaSH (0.5 mL/L y 1.0 mL/L).

H_b: Si existe diferencia significativa en los promedios de cobre disuelto en el DAM tratado debido a la aplicación de los dos niveles de NaSH (0.5 mL/L y 1.0 mL/L).

Discusión

Como el p-valor o Sig. es menor a 0.05 (tabla 40) se rechaza la hipótesis nula (**H₀**) y se acepta la hipótesis alterna (**H_b**), lo cual implica que, si existe diferencia significativa entre los promedios de cobre disuelto en el DAM tratado debido a la aplicación de los dos niveles de NaSH (0.5 mL y 1.0 mL).

Conclusión

Con un nivel de significancia del 5 %, los datos recopilados evidencian de que, si existe diferencia significativa entre los promedios de cobre disuelto en el DAM tratado debido a la aplicación de los dos niveles de NaSH (0.5 mL y 1.0 mL). El promedio de cobre disuelto en el DAM tratado para 0.5 mL es 0.004 mg/L y para 1.0 mL es 0.003 mg/L. Ver tabla 24.

Factor: Gradiente de Velocidad

H₀: No existe diferencia significativa en los promedios de cobre disuelto en el DAM debido a la aplicación de los dos niveles de gradiente de velocidad (160 RPM y 240 RPM).

H_b: Si existe diferencia significativa en los promedios de cobre disuelto en el DAM tratado debido a la aplicación de los dos niveles de gradiente de velocidad (160 RPM y 240 RPM).

Discusión Como el p-valor o Sig. es mayor a 0.05 (tabla 40) se acepta la hipótesis nula (**H₀**) y se rechaza la hipótesis alterna (**H_b**), lo cual implica que, no existe diferencia significativa entre los promedios de cobre disuelto en

el DAM tratado debido a la aplicación de los dos niveles de gradiente de velocidad (160 RPM y 240 RPM).

Conclusión

Con un nivel de significancia del 5 %, los datos recopilados evidencian de que, no existe diferencia significativa entre los promedios de cobre disuelto en el DAM tratado debido a la aplicación de los dos niveles de gradiente de velocidad (160 RPM y 240 RPM). El promedio de cobre disuelto en el DAM tratado para 160 RPM es 0.004 mg/mL y para 240 RPM es 0.003 mg/mL. Ver tabla 24.

Factor: interacción cal – NaSH

H₀: No existe diferencia significativa en los promedios de cobre disuelto en el DAM debido a la aplicación de los dos niveles de cal (32 mL y 40 mL), y los dos niveles de NaSH (0.5 mL y 1.0 mL).

H_b: Si existe diferencia significativa en los promedios de cobre disuelto en el DAM tratado debido a la aplicación de los dos niveles de cal (32 mL y 40 mL), y los dos niveles de NaSH (0.5 mL y 1.0 mL).

Discusión

Como el p-valor o Sig. es menor a 0.05 (tabla 40), se rechaza la hipótesis nula (**H₀**) y se acepta la hipótesis alterna (**H_b**), lo cual implica que, si existe diferencia significativa entre los promedios de cobre disuelto en el DAM tratado debido a la interacción de los dos niveles de cal (32 mL y 40 mL), y de NaSH (0.5 mL y 1.0 mL).

Conclusión

Con un nivel de significancia del 5 %, los datos recopilados evidencian de que, si existe diferencia significativa entre los promedios de cobre disuelto en el DAM tratado debido a la interacción de los dos niveles de cal (32 mL y 40 mL), y de NaSH (0.5 mL y 1.0 mL). El promedio de cobre disuelto en el DAM tratado para 32 mL de cal y 0.5 mL de NaSH es 0.003 mg/L; para 32 mL de cal y 1.0 mL de NaSH es 0.003 mg/L; para 40 mL de cal y 0.5 de

NaSH es 0.006 mg/L; para 40 mL y 1.0 mL de NaSH es 0.003 mg/L. Ver tabla 25.

Factor interacción cal – Gradiente de Velocidad

H₀: No existe diferencia significativa en los promedios de cobre disuelto en el DAM debido a la aplicación de los dos niveles de cal (32 mL y 40 mL), y los dos niveles de gradiente de velocidad (160 RPM y 240 RPM).

H_b: Si existe diferencia significativa en los promedios de cobre disuelto en el DAM debido a la aplicación de los dos niveles de cal (32 mL y 40 mL), y los dos niveles de gradiente de velocidad (160 RPM y 240 RPM).

Discusión

Como el p-valor o Sig. es menor a 0.05 (tabla 40), se rechaza la hipótesis nula (**H₀**) y se acepta la hipótesis alterna (**H_b**), lo cual implica que, si existe diferencia significativa entre los promedios de cobre disuelto en el DAM tratado debido a la interacción de los dos niveles de cal (32 mL y 40 mL), y del gradiente de velocidad (160 RPM y 240 RPM).

Conclusión

Con un nivel de significancia del 5 %, los datos recopilados evidencian de que, si existe diferencia significativa entre los promedios de cobre disuelto en el DAM tratado debido a la interacción de los dos niveles de cal (32 mL y 40 mL), y del gradiente de velocidad (160 RPM y 240 RPM). El promedio de cobre disuelto en el DAM tratado para 32 mL de cal y 160 RPM de gradiente de velocidad es 0.002 mg/L; para 32 mL de cal y 240 RPM es 0.003 mg/L; para 40 mL de cal y 160 RPM es 0.005 mg/L; para 40 mL y 240 RPM es 0.002 mg/L. Ver tabla 25.

Factor interacción NaSH – Gradiente de Velocidad

H₀: No existe diferencia significativa en los promedios de cobre disuelto en el DAM debido a la aplicación de los dos niveles de NaSH (0.5 mL y 1.0 mL), y los dos niveles de gradiente de velocidad (160 RPM y 240 RPM).

H_b: Si existe diferencia significativa en los promedios de cobre disuelto en el DAM debido a la aplicación de los dos niveles de NaSH (0.5 mL y 1.0 mL), y los dos niveles de gradiente de velocidad (160 RPM y 240 RPM).

Discusión

Como el p-valor o Sig. es menor a 0.05 (tabla 40), se rechaza la hipótesis nula (**H₀**) y se acepta la hipótesis alterna (**H_b**), lo cual implica que, si existe diferencia significativa entre los promedios de cobre disuelto en el DAM tratado debido a la interacción de los dos niveles de NaSH (0.5 mL y 1.0 mL), y del gradiente de velocidad (160 RPM y 240 RPM).

Conclusión

Con un nivel de significancia del 5 %, los datos recopilados evidencian de que, si existe diferencia significativa entre los promedios de cobre disuelto en el DAM tratado debido a la interacción de los dos niveles de NaSH (0.5 mL y 1.0 mL), y del gradiente de velocidad (160 RPM y 240 RPM). El promedio de cobre disuelto en el DAM tratado para 0.5 mL de NaSH y 160 RPM es 0.004 mg/L; para 0.5 mL de NaSH y 240 RPM es 0.004 mg/L; para 1.0 mL de NaSH y 160 RPM es 0.004 mg/L; para 1.0 mL de NaSH y 240 RPM es 0.002 mg/L. Ver tabla 25.

Factor interacción Cal – NaSH – Gradiente de Velocidad

H₀: No existe diferencia significativa en los promedios de cobre disuelto en el DAM debido a la aplicación de los dos niveles de cal (32 mL y 40 mL), los dos niveles de NaSH (0.5 mL y 1.0 mL), y los dos niveles de gradiente de velocidad (160 RPM y 240 RPM).

H_b: Si existe diferencia significativa en los promedios de cobre disuelto en el DAM debido a la aplicación de los dos niveles de cal (32 mL y 40 mL), los dos niveles de NaSH (0.5 mL y 1.0 mL), y los dos niveles de gradiente de velocidad (160 RPM y 240 RPM).

Discusión

Como el p-valor o Sig. es menor a 0.05 (tabla 40), se rechaza la hipótesis nula (**H₀**) y se acepta la hipótesis alterna (**H_b**), lo cual implica que, si existe

diferencia significativa entre los promedios de cobre disuelto en el DAM tratado debido a la interacción de los dos niveles de cal (32 mL y 40 mL), los dos niveles de NaSH (0.5 mL y 1.0 mL), y del gradiente de velocidad (160 RPM y 240 RPM).

Conclusión

Con un nivel de significancia del 5 %, los datos recopilados evidencian de que, si existe diferencia significativa entre los promedios de cobre disuelto en el DAM tratado debido a la interacción de los dos niveles de cal (32 mL y 40 mL), los dos niveles de NaSH (0.5 mL y 1.0 mL), y del gradiente de velocidad (160 RPM y 240 RPM). Los promedios de cobre disuelto en el DAM tratado como consecuencia de las interacciones de los tres factores, cal, NaSH y gradiente de velocidad, se pueden observar en la tabla 26.

c. Variable plomo

Tabla 41
ANOVA para la variable plomo

Origen	SC	gl	MC	F	Sig.
Cal	2.025E-5	1	2.025E-5	23.143	0.001
NaSH	1.225E-5	1	1.225E-5	14.000	0.006
G.V.	4.000E-6	1	4.000E-6	4.571	0.065
Cal-NaSH	9.000E-6	1	4.000E-6	10.286	0.012
Cal-G.V.	2.025E-5	1	2.025E-5	23.143	0.001
NaSH-G.V.	2.500E-7	1	2.500E-7	0.286	0.608
Cal-NaSH-G.V.	1.600E-5	1	1.600E-5	18.286	0.003
Error	7.000E-6	8	8.750E-7		
Total, corregido	8.900E-5	15			

Hipótesis C

H₀: No existe diferencia significativa en los promedios de plomo disuelto en el DAM tratado debido a la aplicación de los dos niveles de Cal (32 mL y 40

mL), de los dos niveles de NaSH (0.5 mL y 1.0 mL), y los dos niveles de gradiente de velocidad (160 RPM y 240 RPM).

H_c: No existe diferencia significativa en los promedios de plomo disuelto en el DAM tratado debido a la aplicación de los dos niveles de Cal (32 mL y 40 mL), de los dos niveles de NaSH (0.5 mL y 1.0 mL), y los dos niveles de gradiente de velocidad (160 RPM y 240 RPM).

Nivel de significación: 5%

Estadístico de prueba: F de Fisher para un Análisis de varianza de un experimento tri factorial.

ANOVA: Tabla 41

Discusión: La discusión se hizo tomando en primer término a los tres factores solamente, luego la interacción de dos factores y por último la interacción de los tres factores.

Factor cal

H₀: No existe diferencia significativa en los promedios de plomo disuelto en el DAM debido a la aplicación de los dos niveles de cal (32 mL y 40 mL).

H_c: Si existe diferencia significativa en los promedios de plomo disuelto en el DAM tratado debido a la aplicación de los dos niveles de cal (32 mL y 40 mL).

Discusión

Como el p-valor o Sig. es menor a 0.05 (tabla 41), se rechaza la hipótesis nula (**H₀**) y se acepta la hipótesis alterna (**H_c**), lo cual implica que, si existe diferencia significativa entre los promedios de plomo disuelto en el DAM tratado debido a la aplicación de los dos niveles de cal (32 mL y 40 mL).

Conclusión

Con un nivel de significancia del 5 %, los datos recopilados evidencian de que, si existe diferencia significativa entre los promedios de plomo disuelto en el DAM tratado debido a la aplicación de los dos niveles de cal (32 mL y

40 mL). El promedio de plomo disuelto en el DAM tratado para 32 mL es 0.003 mg/L y para 40 mL es 0.005 mg/L. Ver tabla 27.

Factor NaSH

H₀: No existe diferencia significativa en los promedios de plomo disuelto en el DAM debido a la aplicación de los dos niveles de NaSH (0.5 mL y 1.0 mL).

H_c: Si existe diferencia significativa en los promedios de plomo disuelto en el DAM tratado debido a la aplicación de los dos niveles de NaSH (0.5 mL y 1.0 mL),

Discusión

Como el p-valor o Sig. es menor a 0.05 (tabla 41), se rechaza la hipótesis nula (**H₀**) y se acepta la hipótesis alterna (**H_c**), lo cual implica que, si existe diferencia significativa entre los promedios de plomo disuelto en el DAM tratado debido a la aplicación de los dos niveles de NaSH (0.5 mL y 1.0 mL).

Conclusión

Con un nivel de significancia del 5 %, los datos recopilados evidencian de que, si existe diferencia significativa entre los promedios de plomo disuelto en el DAM tratado debido a la aplicación de los dos niveles de NaSH (0.5 mL y 1.0 mL). El promedio de plomo disuelto en el DAM tratado para 0.5 mL es 0.005 mg/L y para 1.0 mL es 0.003. Ver tabla 27.

Factor Gradiente de Velocidad

H₀: No existe diferencia significativa en los promedios de plomo disuelto en el DAM debido a la aplicación de los dos niveles de gradiente de velocidad (160 RPM y 240 RPM).

H_c: Si existe diferencia significativa en los promedios de plomo disuelto en el DAM tratado debido a la aplicación de los dos niveles de gradiente de velocidad (160 RPM y 240 RPM).

Discusión

Como el p-valor o Sig. es mayor a 0.05 (tabla 41), se acepta la hipótesis nula (**H₀**) y se rechaza la hipótesis alterna (**H_c**), lo cual implica que, no existe diferencia significativa entre los promedios de plomo disuelto en el DAM tratado debido a la aplicación de los dos niveles de gradiente de velocidad (160 RPM y 240 RPM).

Conclusión

Con un nivel de significancia del 5 %, los datos recopilados evidencian de que, no existe diferencia significativa entre los promedios de plomo disuelto en el DAM tratado debido a la aplicación de los dos niveles de gradiente de velocidad (160 RPM y 240 RPM). El promedio de plomo disuelto en el DAM tratado para 160 RPM es 0.005 mg/L y para 240 RPM es 0.004 mg/L. Ver tabla 27.

Factor interacción cal – NaSH

H₀: No existe diferencia significativa en los promedios de plomo disuelto en el DAM debido a la aplicación de los dos niveles de cal (32 mL y 40 mL), y los dos niveles de NaSH (0.5 mL y 1.0 mL)

H_c: Si existe diferencia significativa en los promedios de plomo disuelto en el DAM tratado debido a la aplicación de los dos niveles de cal (32 mL y 40 mL), y los dos niveles de NaSH (0.5 mL y 1.0 mL).

Discusión

Como el p-valor o Sig. es menor a 0.05 (tabla 41), se rechaza la hipótesis nula (**H₀**) y se acepta la hipótesis alterna (**H_c**), lo cual implica que, si existe diferencia significativa entre los promedios de plomo disuelto en el DAM tratado debido a la interacción de los dos niveles de cal (32 mL y 40 mL), y de NaSH (0.5 mL y 1.0 mL).

Conclusión

Con un nivel de significancia del 5 %, los datos recopilados evidencian de que, si existe diferencia significativa entre los promedios de plomo disuelto

en el DAM tratado debido a la interacción de los dos niveles de cal (32 mL y 40 mL), y de NaSH (0.5 mL y 1.0 mL). El promedio de plomo disuelto en el DAM tratado para 32 mL de cal y 0.5 mL de NaSH es 0.003 mg/L; para 32 mL de cal y 1.0 mL de NaSH es 0.003 mg/L; para 40 mL de cal y 0.5 mL de NaSH es 0.007 mg/L; para 40 mL y 1.0 mL de NaSH es 0.004 mg/L. Ver tabla 28.

Factor interacción cal – Gradiente de Velocidad

H₀: No existe diferencia significativa en los promedios de plomo disuelto en el DAM debido a la aplicación de los dos niveles de cal (32 mL y 40 mL), y los dos niveles de gradiente de velocidad (160 RPM y 240 RPM).

H_c: Si existe diferencia significativa en los promedios de plomo disuelto en el DAM debido a la aplicación de los dos niveles de cal (32 mL y 40 mL), y los dos niveles de gradiente de velocidad (160 RPM y 240 RPM).

Discusión

Como el p-valor o Sig. es menor a 0.05 (tabla 41), se rechaza la hipótesis nula (**H₀**) y se acepta la hipótesis alterna (**H_c**), lo cual implica que, si existe diferencia significativa entre los promedios de plomo disuelto en el DAM tratado debido a la interacción de los dos niveles de cal (32 mL y 40 mL), y del gradiente de velocidad (160 RPM y 240 RPM).

Conclusión

Con un nivel de significancia del 5 %, los datos recopilados evidencian de que, si existe diferencia significativa entre los promedios de plomo disuelto en el DAM tratado debido a la interacción de los dos niveles de cal (32 mL y 40 mL), y del gradiente de velocidad (160 RPM y 240 RPM). El promedio de plomo disuelto en el DAM tratado para 32 mL de cal y 160 RPM de gradiente de velocidad es 0.003 mg/L; para 32 mL de cal y 240 RPM es 0.004 mg/L; para 40 mL de cal y 160 RPM es 0.007 mg/L; para 40 mL y 240 RPM es 0.004 mg/L. Ver tabla 28.

Interacción NaSH – Gradiente de Velocidad

H₀: No existe diferencia significativa en los promedios de plomo disuelto en el DAM debido a la aplicación de los dos niveles de NaSH (0.5 mL y 1.0 mL), y los dos niveles de gradiente de velocidad (160 RPM y 240 RPM).

H_c: Si existe diferencia significativa en los promedios de plomo disuelto en el DAM debido a la aplicación de los dos niveles de NaSH (0.5 mL y 1.0 mL), y los dos niveles de gradiente de velocidad (160 RPM y 240 RPM).

Discusión

Como el p-valor o Sig. es mayor a 0.05 (tabla 41), se acepta la hipótesis nula (**H₀**) y se rechaza la hipótesis alterna (**H_c**), lo cual implica que, no existe diferencia significativa entre los promedios de plomo disuelto en el DAM tratado debido a la interacción de los dos niveles de NaSH (0.5 mL y 1.0 mL), y del gradiente de velocidad (160 RPM y 240 RPM).

Conclusión

Con un nivel de significancia del 5 %, los datos recopilados evidencian de que, no existe diferencia significativa entre los promedios de plomo disuelto en el DAM tratado debido a la interacción de los dos niveles de NaSH (0.5 mL y 1.0 mL), y del gradiente de velocidad (160 RPM y 240 RPM). El promedio de plomo disuelto en el DAM tratado para 0.5 mL de NaSH y 160 RPM es 0.006 mg/L; para 0.5 mL de NaSH y 240 RPM es 0.005 mg/L; para 1.0 mL de NaSH y 160 RPM es 0.004 mg/L, y para 1.0 mL de NaSH y 240 RPM es 0.003 mg/L. Ver tabla 28.

Interacción Cal – NaSH – Gradiente de Velocidad

H₀: No existe diferencia significativa en los promedios de plomo disuelto en el DAM debido a la aplicación de los dos niveles de cal (32 mL y 40 mL), los dos niveles de NaSH (0.5 mL y 1.0 mL), y los dos niveles de gradiente de velocidad (160 RPM y 240 RPM).

H_c: Si existe diferencia significativa en los promedios de plomo disuelto en el DAM debido a la aplicación de los dos niveles de cal (32 mL y 40 mL),

los dos niveles de NaSH (0.5 mL y 1.0 mL), y los dos niveles de gradiente de velocidad (160 RPM y 240 RPM).

Discusión

Como el p-valor o Sig. es menor a 0.05 (tabla 41) se rechaza la hipótesis nula (H_0) y se acepta la hipótesis alterna (H_c), lo cual implica que, si existe diferencia significativa entre los promedios de plomo disuelto en el DAM tratado debido a la interacción de los dos niveles de cal (32 mL y 40 mL), los dos niveles de NaSH (0.5 mL y 1.0 mL), y del gradiente de velocidad (160 RPM y 240 RPM).

Conclusión

Con un nivel de significancia del 5 %, los datos recopilados evidencian de que, si existe diferencia significativa entre los promedios de plomo disuelto en el DAM tratado debido a la interacción de los dos niveles de cal (32 mL y 40 mL), los dos niveles de NaSH (0.5 mL y 1.0 mL), y del gradiente de velocidad (160 RPM y 240 RPM). Los promedios de plomo disuelto en el DAM tratado como consecuencia de las interacciones de los tres factores, cal, NaSH y gradiente de velocidad, se pueden observar en la tabla 29.

d. Variable cinc

Tabla 42
ANOVA para la variable cinc

Origen	SC	gl	MC	F	Sig.
Cal	0.321	1	0.321	48.688	< 0.001
NaSH	0.015	1	0.015	2.217	0.175
G.V.	0.083	1	0.083	12.562	0.08
Cal-NaSH	0.005	1	0.005	0.742	0.414
Cal-G.V.	0.031	1	0.031	4.691	0.062
NaSH-G.V.	0.000	1	0.000	0.067	0.863
Cal-NaSH-G.V.	0.075	1	0.075	11.287	0.010
Error	0.053	8	0.007		
Total, corregido	0.583	15			

Hipótesis D

H₀: No existe diferencia significativa en los promedios de cinc disuelto en el DAM tratado debido a la aplicación de los dos niveles cal (32 mL y 40 mL), los dos niveles de NaSH (0.5 mL y 1.0 mL), y los dos niveles de gradiente de velocidad (160 RPM y 240 RPM).

H_a: Si existe diferencia significativa en los promedios de cinc disuelto en el DAM tratado debido a la aplicación de los dos niveles cal (32 mL y 40 mL), los dos niveles de NaSH (0.5 mL y 1.0 mL), y los dos niveles de gradiente de velocidad (160 RPM y 240 RPM).

Nivel de significación: 5%

Estadístico de prueba: F de Fisher para un Análisis de varianza de un experimento tri factorial.

ANOVA: Tabla 42

Discusión: La discusión se hizo tomando en primer término a los tres factores solamente, luego la interacción de dos factores y por último la interacción de los tres factores a la vez.

Factor cal

H₀: No existe diferencia significativa en los promedios de cinc disuelto en el DAM debido a la aplicación de los dos niveles de cal (32 mL y 40 mL)

H_a: Si existe diferencia significativa en los promedios de cinc disuelto en el DAM tratado debido a la aplicación de los dos niveles de cal (32 mL y 40 mL).

Discusión

Como el p-valor o Sig. es menor a 0.05 (tabla 42) se rechaza la hipótesis nula (**H₀**) y se acepta la hipótesis alterna (**H_a**), lo cual implica que, si existe diferencia significativa entre los promedios de cinc disuelto en el DAM tratado debido a la aplicación de los dos niveles de cal (32 mL y 40 mL).

Conclusión

Con un nivel de significancia del 5 %, los datos recopilados evidencian de que, si existe diferencia significativa entre los promedios de cinc disuelto en el DAM tratado debido a la aplicación de los dos niveles de cal (32 mL y 40 mL). El promedio de cinc disuelto en el DAM tratado para 32 mL es 1.344 mg/L y para 40 mL es 1.061 mg/L. Ver tabla 30.

Factor NaSH

H₀: No existe diferencia significativa en los promedios de cinc disuelto en el DAM debido a la aplicación de los dos niveles de NaSH (0.5 mL y 1.0 mL).

H_a: Si existe diferencia significativa en los promedios de cinc disuelto en el DAM tratado debido a la aplicación de los dos niveles de NaSH (0.5 mL y 1.0 mL).

Discusión

Como el p-valor o Sig. es mayor a 0.05 (tabla 42), se acepta la hipótesis nula (**H₀**) y se rechaza la hipótesis alterna (**H_a**), lo cual implica que, no existe diferencia significativa entre los promedios de cinc disuelto en el DAM tratado debido a la aplicación de los dos niveles de NaSH (0.5 mL y 1.0 mL).

Conclusión

Con un nivel de significancia del 5 %, los datos recopilados evidencian de que, no existe diferencia significativa entre los promedios de cinc disuelto en el DAM tratado debido a la aplicación de los dos niveles de NaSH (0.5 mL y 1.0 mL). El promedio de cinc disuelto en el DAM tratado para 0.5 mL es 1.172 mg/L, y para 1.0 mL es 1.233 mg/L. Ver tabla 30.

Factor Gradiente de Velocidad

H₀: No existe diferencia significativa en los promedios de cinc disuelto en el DAM debido a la aplicación de los dos niveles de gradiente de velocidad (160 RPM y 240 RPM).

H_a: Si existe diferencia significativa en los promedios de cinc disuelto en el DAM tratado debido a la aplicación de los dos niveles de gradiente de velocidad (160 RPM y 240 RPM).

Discusión

Como el p-valor o Sig. es mayor a 0.05 (tabla 42), se rechaza la hipótesis nula (**H₀**) y se acepta la hipótesis alterna (**H_a**), lo cual implica que, si existe diferencia significativa entre los promedios de cinc disuelto en el DAM tratado debido a la aplicación de los dos niveles de gradiente de velocidad (160 RPM y 240 RPM).

Conclusión

Con un nivel de significancia del 5 %, los datos recopilados evidencian de que, si existe diferencia significativa entre los promedios de cinc disuelto en el DAM tratado debido a la aplicación de los dos niveles de gradiente de velocidad (160 RPM y 240 RPM). El promedio de cinc disuelto en el DAM tratado para 160 RPM es 1.131 mg/L, y para 240 RPM es 1.274 mg/L. Ver tabla 30.

Factor: interacción cal – NaSH

H₀: No existe diferencia significativa en los promedios de cinc disuelto en el DAM debido a la aplicación de los dos niveles de cal (32 mL y 40 mL), y los dos niveles de NaSH (0.5 mL y 1.0 mL).

H_a: Si existe diferencia significativa en los promedios de plomo cinc en el DAM tratado debido a la aplicación de los dos niveles de cal (32 mL y 40 mL), y los dos niveles de NaSH (0.5 mL y 1.0 mL).

Discusión

Como el p-valor o Sig. es mayor a 0.05 (tabla 42), se acepta la hipótesis nula (**H₀**) y se rechaza la hipótesis alterna (**H_a**), lo cual implica que, no existe diferencia significativa entre los promedios de cinc disuelto en el DAM tratado debido a la interacción de los dos niveles de cal (32 mL y 40 mL), y de NaSH (0.5 mL y 1.0 mL).

Conclusión

Con un nivel de significancia del 5 %, los datos recopilados evidencian de que, no existe diferencia significativa entre los promedios de cinc disuelto en el DAM tratado debido a la interacción de los dos niveles de cal (32 mL y 40 mL), y de NaSH (0.5 mL y 1.0 mL). El promedio de cinc disuelto en el DAM tratado para 32 mL de cal y 0.5 mL de NaSH es 1.297 mg/L; para 32 mL de cal y 1.0 mL de NaSH es 1.392 mg/L; para 40 mL de cal y 0.5 de NaSH es 1.048 mg/L; para 40 mL y 1.0 mL de NaSH es 1.073 mg/L. Ver tabla 31.

Interacción cal – Gradiente de Velocidad

H₀: No existe diferencia significativa en los promedios de cinc disuelto en el DAM debido a la aplicación de los dos niveles de cal (32 mL y 40 mL), y los dos niveles de gradiente de velocidad (160 RPM y 240 RPM).

H_a: Si existe diferencia significativa en los promedios de cinc disuelto en el DAM debido a la aplicación de los dos niveles de cal (32 mL y 40 mL), y los dos niveles de gradiente de velocidad (160 RPM y 240 RPM).

Discusión

Como el p-valor o Sig. es mayor a 0.05 (tabla 42), se acepta la hipótesis nula (**H₀**) y se rechaza la hipótesis alterna (**H_a**), lo cual implica que, no existe diferencia significativa entre los promedios de cinc disuelto en el DAM tratado debido a la interacción de los dos niveles de cal (32 mL y 40 mL), y del gradiente de velocidad (160 RPM y 240 RPM).

Conclusión

Con un nivel de significancia del 5 %, los datos recopilados evidencian de que, no existe diferencia significativa entre los promedios de cinc disuelto en el DAM tratado debido a la interacción de los dos niveles de cal (32 mL y 40 mL), y del gradiente de velocidad (160 RPM y 240 RPM). El promedio de cinc disuelto en el DAM tratado para 32 mL de cal y 160 RPM de gradiente de velocidad es 1.316 mg/L; para 32 mL de cal y 240 RPM es

1.372 mg/L; para 40 mL de cal y 160 RPM es 0.945 mg/L; para 40 mL y 240 RPM es 1.177 mg/L. Ver tabla 31.

Factor: interacción NaSH – Gradiente de Velocidad

H₀: No existe diferencia significativa en los promedios de cinc disuelto en el DAM debido a la aplicación de los dos niveles de NaSH (0.5 mL y 1.0 mL), y los dos niveles de gradiente de velocidad (160 RPM y 240 RPM).

H_a: Si existe diferencia significativa en los promedios de cinc disuelto en el DAM debido a la aplicación de los dos niveles de NaSH (0.5 mL y 1.0 mL), y los dos niveles de gradiente de velocidad (160 RPM y 240 RPM).

Discusión

Como el p-valor o Sig. es mayor a 0.05 (tabla 42), se acepta la hipótesis nula (**H₀**) y se rechaza la hipótesis alterna (**H_a**), lo cual implica que, no existe diferencia significativa entre los promedios de cinc disuelto en el DAM tratado debido a la interacción de los dos niveles de NaSH (0.5 mL y 1.0 mL), y del gradiente de velocidad (160 RPM y 240 RPM).

Conclusión

Con un nivel de significancia del 5 %, los datos recopilados evidencian de que, no existe diferencia significativa entre los promedios de cinc disuelto en el DAM tratado debido a la interacción de los dos niveles de NaSH (0.5 mL y 1.0 mL), y del gradiente de velocidad (160 RPM y 240 RPM). El promedio de cinc disuelto en el DAM tratado para 0.5 mL de NaSH y 160 RPM es 1.106 mg/L; para 0.5 mL de NaSH y 240 RPM es 1.239 mg/L; para 1.0 mL de NaSH y 160 RPM es 1.156 mg/L; para 1.0 mL de NaSH y 240 RPM es 1.310 mg/L. Ver tabla 31.

Factor interacción Cal – NaSH – Gradiente de Velocidad

H₀: No existe diferencia significativa en los promedios de cinc disuelto en el DAM debido a la aplicación de los dos niveles de cal (32 mL y 40 mL), los dos niveles de NaSH (0.5 mL y 1.0 mL), y los dos niveles de gradiente de velocidad (160 RPM y 240 RPM).

H_a: Si existe diferencia significativa en los promedios de cinc disuelto en el DAM debido a la aplicación de los dos niveles de cal (32 mL y 40 mL), los dos niveles de NaSH (0.5 mL y 1.0 mL), y los dos niveles de gradiente de velocidad (160 RPM y 240 RPM).

Discusión

Como el p-valor o Sig. es menor a 0.05 (tabla 42) se rechaza la hipótesis nula (**H₀**) y se acepta la hipótesis alterna (**H_a**), lo cual implica que, si existe diferencia significativa entre los promedios de cinc disuelto en el DAM tratado debido a la interacción de los dos niveles de cal (32 mL y 40 mL), los dos niveles de NaSH (0.5 mL y 1.0 mL), y del gradiente de velocidad (160 RPM y 240 RPM).

Conclusión

Con un nivel de significancia del 5 %, los datos recopilados evidencian de que, si existe diferencia significativa entre los promedios de cinc disuelto en el DAM tratado debido a la interacción de los dos niveles de cal (32 mL y 40 mL), los dos niveles de NaSH (0.5 mL y 1.0 mL), y del gradiente de velocidad (160 RPM y 240 RPM). Los promedios de cinc disuelto en el DAM tratado como consecuencia de las interacciones de los tres factores, cal, NaSH y gradiente de velocidad, tal como se pueden observar en la tabla 32.

5.2.3. Prueba t para las variables dependientes

Se realizó con el software SPSS para el hierro, cobre, plomo y cinc.

Tabla 43
Prueba de t student para el hierro

Valor de prueba = 0.20994						
	t	gl	Significación		95 % de intervalo de confianza de la diferencia	
			p de un factor	p de dos factores	Inferior	Superior
Fe (mg/L)	0.000	15	0.500	1.000	- 0.02825	0.02824

Tabla 44

Prueba de t student para el cobre

Valor de prueba = 0.00350						
	t	gl	Significación		95 % de intervalo de confianza de la diferencia	
			p de un factor	p de dos factores	Inferior	Superior
Cu (mg/L)	0.000	15	0.500	1.000	- 0.00089	0.00089

Tabla 45

Prueba de t student para el plomo

Valor de prueba = 0.00425						
	t	gl	Significación		95 % de intervalo de confianza de la diferencia	
			p de un factor	p de dos factores	Inferior	Superior
Pb (mg/L)	0.000	15	0.500	1.000	- 0.00130	0.00130

Tabla 46

Prueba de t student para el cinc

Valor de prueba = 1.20250						
	T	gl	Significación		95 % de intervalo de confianza de la diferencia	
			p de un factor	p de dos factores	Inferior	Superior
Cu (mg/L)	0.000	15	0.500	1.000	- 0.10503	0.10503

VI. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

6.1. Contrastación y demostración de las hipótesis con los resultados

Para la contrastación de las hipótesis, se comparó las medias de las concentraciones de los metales hierro, cobre, plomo y cinc presentes en el DAM después de su tratamiento (tabla 47) con las normas ambientales; además, considerando que los compromisos ambientales de las mineras son más exigentes, pues no solo deben cumplir con los LMP, sino también con los ECA categoría 3 agua para riego y bebida de animales, en consecuencia, para la comparación se tomó el valor más bajo de una de las normas. Asimismo, se analizó la significancia de la media marginal para cada metal mediante la prueba de “t student”. Si el nivel de significancia o valor p es menor que 0.05 (α), se rechaza la hipótesis nula.

Tabla 47

Media de los metales en el DAM después de su tratamiento por alcalinización y sulfuración

Conc. (mg/L)	N	Mínimo	Máximo	Media	Desviación
Fe	16	0.135	0.284	0.20994	0.053008
Cu	16	0.001	0.007	0.00350	0.001673
Pb	16	0.001	0.008	0.00425	0.002436
Zn	16	0.859	1.495	1.20250	0.197103

6.1.1. Hipótesis general

H_g: El tratamiento convencional con una etapa adicional de sulfuración aumenta significativamente la remoción de los metales pesados del drenaje ácido de mina de la unidad minera Cerro de Pasco del distrito de Simón Bolívar, Pasco.

H₀: El tratamiento convencional con una etapa adicional de sulfuración no aumenta significativamente la remoción de los metales pesados del drenaje

ácido de mina de la unidad minera Cerro de Pasco del distrito de Simón Bolívar, Pasco.

A. Contrastación para el hierro

Valor de acuerdo a la norma (LMP): 1.6 mg/L

Promedio: 0.20994 mg/L (tabla 47)

Nivel de significancia: 0.05

t student: 0.000 (tabla 43)

Discusión:

El valor deseado para el caso del DAM tratado es 1.6 mg/L. La significación es 0.000, este valor se contrasta con el valor α (0.05); si el nivel de significancia o p-valor es mayor que 0.05 no se rechaza la hipótesis nula, y si es menor que 0.05 se rechaza la hipótesis nula. En este caso el nivel de significancia (0.000) es menor que 0.05, por lo que se rechaza la hipótesis nula y se acepta la hipótesis alterna.

Conclusión:

Con un nivel de significancia de 0.05, la media 0.20994 mg/L que es la media de los resultados obtenidos en el tratamiento del DAM está por debajo del valor de la norma que es igual a 1.6 mg/L, esto quiere decir, que todos los valores para el hierro residual luego del tratamiento mediante alcalinización y sulfuración se encuentran por debajo del LMP y del ECA categoría 3 agua para riego y bebida de animales.

B. Contrastación para el cobre

Valor de acuerdo a la norma (ECA): 0.2 mg/L

Promedio: 0.00350 mg/L (tabla 47)

Nivel de significancia: 0.05

t student: 0.000 (tabla 44)

Discusión:

El valor deseado, para el caso del DAM tratado es 0.2 mg/L. En este caso el nivel de significancia (0.000) es menor que 0.05, por lo que se rechaza la hipótesis nula y se acepta la hipótesis alterna.

Conclusión:

Con un nivel de significancia de 0.05, la media 0.00350 mg/L que es la media de los resultados obtenidos en el tratamiento del DAM está por debajo del valor de la norma que es igual a 0.2 mg/L, esto quiere decir, que todos los valores del cobre residual luego del tratamiento mediante alcalinización y sulfuración se encuentran por debajo del LMP y del ECA categoría 3 agua para riego y bebida para animales.

C. Contrastación para el plomo

Valor de acuerdo a la norma (ECA): 0.05 mg/L

Promedio: 0.00425 mg/L (tabla 47)

Nivel de significancia: 0.05

t student: 0.000 (tabla 45)

Discusión:

El valor deseado, para el caso del DAM tratado es 0.05 mg/L. En este caso el nivel de significancia (0.000) es menor que 0.05, por lo que se rechaza la hipótesis nula y se acepta la hipótesis alterna.

Conclusión:

Con un nivel de significancia de 0.05, la media 0.00425 mg/L que es la media de los resultados obtenidos en el tratamiento del DAM está por debajo del valor de la norma que es igual a 0.05 mg/L, esto quiere decir, que todos los valores del plomo residual luego del tratamiento mediante alcalinización y sulfuración se encuentran por debajo del LMP y del ECA categoría 3 agua para riego y bebida para animales.

D. Contrastación para el cinc

De acuerdo a la norma (LMP), el valor deseado es 1.5 mg/L

Promedio = 1.20250 mg/L (tabla 47)

Nivel de significancia = 0.05

t = 0.000 (tabla 46)

Discusión:

El valor deseado, para el caso del DAM tratado es 1.5 mg/L. En este caso el nivel de significancia (0.000) es menor que 0.05, por lo que se rechaza la hipótesis nula y se acepta la hipótesis alterna.

Conclusión:

Con un nivel de significancia de 0.05, la media 1.20250 mg/L que es la media de los resultados obtenidos en el tratamiento del DAM está por debajo del valor de la norma que es igual a 0.05 mg/L, esto quiere decir, que todos los valores del cinc residual luego del tratamiento mediante alcalinización y sulfuración se encuentran por debajo del LMP y del ECA categoría 3 agua para riego y bebida para animales.

En conclusión, el tratamiento convencional con una etapa adicional de sulfuración del drenaje ácido de mina aumenta significativamente la remoción de los cuatro metales Fe, Cu, Pb y Zn, y por lo tanto cumplen con las normas ambientales D.S. N° 010 – 2010 – MINAM y D.S. N° 004 – 2017 MINAM categoría 3 agua para riego y bebida para animales.

6.1.2. Hipótesis específica

H₁: La dosis de cal en la etapa de alcalinización aumenta significativamente la remoción de los metales del drenaje ácido de mina de la unidad minera Cerro de Pasco del distrito de Simón Bolívar, Pasco.

H₀₁: La dosis de cal en la etapa de alcalinización no aumenta significativamente la remoción de los metales del drenaje ácido de mina de la unidad minera Cerro de Pasco del distrito de Simón Bolívar, Pasco.

De acuerdo a los resultados obtenidos, las dosis de cal con sus niveles 32 mL/L y 40 mL/L, en el proceso de alcalinización del drenaje ácido de mina, aumenta significativamente la remoción de los metales; esto se demuestra con un nivel de significancia de 5 % que, entre los datos recopilados, si existe diferencia significativa en los promedios de los metales residuales cuyos valores se encuentran por debajo de lo exigido por las normas ambientales LMP y ECA para agua categoría 3. Por lo tanto, se rechaza la hipótesis nula y se acepta la hipótesis alterna.

H₂: La dosis de sulfhidrato de sodio, NaSH, en la etapa de sulfuración aumenta significativamente la remoción de los metales del drenaje ácido de mina de la unidad minera Cerro de Pasco del distrito de Simón Bolívar, Pasco.

H₀₂: La dosis de sulfhidrato de sodio, NaSH, en la etapa de sulfuración no aumenta significativamente la remoción de los metales del drenaje ácido de mina de la unidad minera Cerro de Pasco del distrito de Simón Bolívar, Pasco.

De acuerdo a los resultados obtenidos, las dosis de sulfhidrato de sodio (NaSH) con sus niveles 0.5 mL/L y 1.0 mL/L, en el proceso de sulfuración, etapa que sigue a la alcalinización del drenaje ácido de mina, aumenta significativamente la remoción de los metales; esto se demuestra con un nivel de significancia de 5 % que, entre los datos recopilados, si existe diferencia significativa en los promedios de los metales residuales cuyos valores se encuentran por debajo de lo exigido por las normas ambientales LMP y ECA para agua categoría 3. Por lo tanto, se rechaza la hipótesis nula y se acepta la hipótesis alterna.

H₃: El gradiente de velocidad en la etapa de sulfuración aumenta significativamente la remoción de los metales del drenaje ácido de mina de la unidad minera Cerro de Pasco del distrito de Simón Bolívar, Pasco.

H₀₃: El gradiente de velocidad en la etapa de sulfuración no aumenta significativamente la remoción de los metales del drenaje ácido de mina de la unidad minera Cerro de Pasco del distrito de Simón Bolívar, Pasco.

De acuerdo a los resultados obtenidos, el gradiente de velocidad con sus niveles 160 RPM y 240 RPM, en el proceso de alcalinización y sulfuración del drenaje ácido de mina, aumenta significativamente la remoción de los metales; esto se demuestra con un nivel de significancia de 5 % que, entre los datos recopilados, si existe diferencia significativa en los promedios de los metales residuales cuyos valores se encuentran por debajo de lo exigido por las normas ambientales LMP y ECA para agua categoría 3. Por lo tanto, se rechaza la hipótesis nula y se acepta la hipótesis alterna.

6.2. Contrastación de los resultados con otros estudios similares

En la presente investigación titulada “Tratamiento convencional con una etapa adicional de sulfuración para el drenaje ácido de mina de la unidad minera Cerro de Pasco del distrito de Simón Bolívar, Pasco”, se trató el drenaje ácido de mina mediante alcalinización convencional (neutralización) con cal seguido de un proceso de sulfuración con sulfhidrato de sodio (NaSH), controlando en ambos casos el gradiente de velocidad. Se analizó la interacción de los factores cal, NaSH y gradiente de velocidad, cada uno, con sus respectivos niveles, 32 mL/L y 40 mL/L para cal, 0.5 mL/L y 1.0 mL/L para el sulfhidrato de sodio (NaSH), y 160 RPM y 240 RPM para el gradiente de velocidad. Los resultados tuvieron medias de 0.20994 mg/L para el hierro (tabla 43); 0.00350 mg/L para el cobre (tabla 44), 0.00425 mg/L para el plomo (tabla 45) y 1.20250 mg/L para el cinc (tabla 46); y, con remoción de 98.31 % para el hierro, 99.83 % para el cobre, 99.44 % de plomo y 64.64 % para el cinc (ver tabla 19).

La contrastación de los resultados en la presente investigación se realizó tomando como referencia investigaciones similares que se citan en los antecedentes internacionales y nacionales. Así tenemos:

- Rivera y otros (2020) trataron el DAM con carbonatos pedogénicos y lograron una remoción de 100 % para de Fe y Cu; en tanto la remoción del cinc fue por debajo de los límites permisibles, por lo que se concluye que nuestros resultados para Fe y Cu son similares tal como se puede observar en la tabla 19.

- Galván Usma (2016), utilizando métodos pasivos para el tratamiento del DAM (humedales) logró remover satisfactoriamente al plomo y Cinc; no especifica cual fue el porcentaje de remoción, por lo que se concluye que en nuestros resultados para Pb y Zn hay coincidencias cualitativas.
- Patiño Tipacti (2022), mediante tratamiento convencional del DAM con cal en un rango de pH de 6 a 9 logró remover hierro y aluminio disueltos hasta por debajo de los LMP, no especifica el porcentaje de remoción de los metales, por lo que se concluye hay que coincidencia cualitativa en nuestros resultados para el hierro; en la presente investigación, la remoción del hierro fue del 98.31 % (ver tabla 19).
- Rodríguez Vásquez (2018) mediante el tratamiento de drenaje ácido de mina con dolomita logró reducir la concentración de Cu, de 42.270 ppm a 2.075 ppm y del Zn, desde 202.465 ppm hasta 9.090 ppm; lo que equivale a una remoción de 95.09 % para el Cu y de 95.51 % para el Zn; por lo que se concluye que nuestros resultados para el Cu son similares, y para el Zn, hay mayor remoción en el trabajo desarrollado por Rodríguez Vásquez (ver tabla 19).

6.3. Responsabilidad ética

La presente investigación titulada “TRATAMIENTO CONVENCIONAL CON UNA ETAPA ADICIONAL DE SULFURACIÓN PARA EL DRENAJE ÁCIDO DE MINA DE LA UNIDAD MINERA CERRO DE PASCO DEL DISTRITO DE SIMÓN BOLÍVAR, PASCO” es autentica en su fondo y forma; se desarrolló de manera íntegra durante todo el proceso de recolección de información, parte experimental y procesamiento de información analizando la problemática planteada. Además, está sujeto a la normativa y a los principios ético que han sido establecidos por la Universidad Nacional del Callao. Toda información que se encuentra en la presente investigación es de mi autoría, y las que no lo son, se encuentran correctamente referenciados. Como autor de la investigación me responsabilizo por la información emitida en la presente tesis, estando de acuerdo con el

Reglamento del Código de ética de la investigación de la UNAC, Resolución de Consejo Universitario N°260-2019 CU, donde se señala los principios éticos como norma de comportamiento constitucional; por ello como tesista soy responsable de los procesos y procedimientos de diseño y desarrollo de mi investigación.

VII. CONCLUSIONES

Los resultados obtenidos en el tratamiento convencional del drenaje ácido de mina con cal al 10 % m/v y su posterior sulfuración con sulfhidrato de sodio (NaSH) al 10 % m/v muestran una alta remoción de los metales hierro (98.31 %), cobre (99.83 %) y plomo (99.44 %). En el caso de cinc se alcanzó a remover 65.61 %. En todos los casos las concentraciones de los metales residuales del DAM tratado se encuentran por debajo de lo exigido por las normas ambientales, D.S. N° 010-2010-MINAM y D.S. N° 004-2017-MINAM categoría 3 agua para riego y bebida de animales; por lo que se concluye que el método aplicado en el tratamiento del DAM ha sido eficiente.

Se concluye que la dosis de cal al 10 % m/v adecuada en la etapa de alcalinización es 40 mL/L, con la cual se obtiene el mayor porcentaje de remoción de los metales hierro, cobre, plomo y cinc, tal como se puede observar en las tablas 18 y 19.

La reducción de la cantidad de metales pesados (Fe, Cu, Pb y Zn) del drenaje ácido de mina en la etapa de sulfuración se logró con una dosis de sulfhidrato de sodio (NaSH) al 10 % m/v igual a 1.0 mL/L (ver tabla 18 y 19).

Se concluye que el gradiente de velocidad influye en la remoción de los metales debido a que una adecuada agitación de la mezcla permite una mejor distribución de los reactivos químicos durante el tratamiento del DAM. La remoción eficiente de los metales pesados se logró a 160 RPM.

VIII. RECOMENDACIONES

Tratar las aguas de la laguna de Quiulacocha que discurren hacia el río San Juan para prevenir su impacto negativo en el ambiente y la población de su área de influencia. El tratamiento debe estar cargo de las compañías mineras que generan las aguas ácidas.

Monitorear permanentemente las aguas del río San Juan; en esta tarea se debe involucrar a las partes interesadas, la población, el estado a través del MINAM, ANA, OEFA, GOBIERNO REGIONAL y las empresas responsables de la contaminación del agua priorizando los intereses de la población en el diseño e implementación de los programas de monitoreo y capacitación de los pobladores del distrito de Simón Bolívar.

En la presente investigación se empleó como variables de control, los volúmenes de las soluciones de cal y sulfhidrato de sodio de concentraciones conocidas a un determinado RPM; por lo que se recomienda evaluar el tiempo de agitación tanto en la etapa de alcalinización y sulfuración para ver su influencia en la precipitación de los metales, principalmente, la del cinc.

Se recomienda realizar nuevos trabajos de investigación sobre la contaminación de las aguas del río San Juan por drenajes ácido de mina con la finalidad de ofrecer a la población del distrito de Simón Bolívar mejores alternativas de solución que resuelvan los problemas de salud y economía (agricultura y ganadería) que se generan por contaminación con aguas ácidas.

IX. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ADUVIRI, Osvaldo. 2006. *Drenaje ácido de mina generación y tratamiento.* Madrid : Instituto Geológico y Minero de España Dirección de Recursos Minerales y Geoambiente, 2006.

Anuario minero 2021. **HOYOS, diego. 2021.** 1, Lima : Ministerio de Energía y Minas, 2021, Vol. 1.

AYALA CARCEDO, F.J. y VADILLO , L. 2004. *Manual de restauración de terrenos y evaluación de impactos ambientales en minería.* Madrid : Bellisco Ediciones, 2004.

BOLETIN COREA. 2018. Presentación de Informe Final del Proyecto de “Fortalecimiento de la Gestión para la Remediación de Pasivos Ambientales Mineros en el Perú”. 2018, 34.

BROUGHTON, Linda Summers y BONELLI, Julio. 1995. *Guía ambiental para el manejo del drenaje ácido de mina.* Lima : Ministerio de Energía y Minas, 1995.

CABADAS-BAEZ, Héctor Víctor, LANDA-ARREGUÍN, Jorge Federico y SEDOV, Sergey. 2016. *Carbonatos secundarios en las calcretas del noreste de la península de Yucatán: formas e implicaciones en la pedogénesis de geosistemas cársticos.* México : Universidad Autónoma de México, 2016.

CÁNEPA DE VARGAS, Lidia, MALDONADO, Victor y BARRENECHEA, Ada. 2004. *Tratamiento de agua para consumo humano, Tomo I: plantas de filtración rápida.* Lima : CEPIS, 2004.

CONAGUA y MEKOROT. 2014. *San Luis Rio Colorado, Estado de Sonora. Tratamiento de Efluentes con el Suelo del Acuífero: Recomendaciones de Mejora.* México : Development and Enterprise Ltd. , 2014.

DE VARGAS, Lidia. 2004. *Tratamiento de agua para consumo humano, plantas de filtración rápida. Tomo I.* Lima : CEPIS, 2004.

DELGADO DE LA TORRE, Rosario. 2008. *Probabilidad y estadística para Ciencias e Ingeniería.* Madrid : Delta Publicacione, 2008. 84-96477-74-6.

DENEGRI-MUÑOZ, Jerry y IANNACONE, José. 2020. Tratamiento de drenaje ácido de minas mediante humedales artificiales. *Biotempo*. [En línea] 04 de 08 de 2020. [Citado el: 15 de 10 de 2022.] <https://revistas.urp.edu.pe/index.php/Biotempo/article/view/3349/4105>. 2519-5697.

ESPINOZA RODRÍGUEZ, M.A., HIDALGO MILLÁN, A. y DELGADO DELGADO, R. 2016. *Diseño de un sistema de tratamiento para el drenaje ácido de mina basado en el proceso de lodos de alta densidad (HDS)*. Mérida : Ingeniería, Revista Académica de la FI-UADY, pp. 64-75, 2016.

ESPINOZA, Miguel, y otros. 2010. *Cinética de oxidación de la pirita, subproducto ácido del drenaje de la mina La Guitarra*. Mexico : Ingenierías, 2010. 1405-0676.

GALVÁN USMA, José Luis. 2016. *Evaluación de sistemas de humedales construidos para la disminución de la concentración de metales pesados generados por los drenajes ácidos de minería*. Pereira, Colombia : Universidad Tecnológica de Pereira, 2016.

GUERREROS LAZO, José Luis. 2021. *Estudio de neutralización dinámica de drenaje ácido de mina con pulpa de relave fino de planta concentradora*. 2021.

GUTIERREZ PULIDO, Humberto y DE LA VARA SALAZAR, Román. 2008. *Análisis y diseño de experimentos*. México D.F. : McGraw-Hill Interamericana, 2008. 978-970-10-6526-6.

HERNÁNDES, Roberto, FERNÁNDEZ , Carlos y BAPTISTA, Pilar. 2014. *Metodología de la investigación*. México : Mc Graw Hill, 2014. 978-1-4562-2396-0.

INDECI. 2021. Instituto Nacional de Defensa Civil. [En línea] 24 de Abril de 2021. [Citado el: 23 de Octubre de 2022.] <https://www.indeci.gob.pe/wp-content/uploads/2021/04/REPORTE-DE-PELIGRO-INMINENTE-N%C2%BA-098-24ABR2021-POR-DESEMBALSE-EN-EL-DISTRITO-DE-SIMON-BOLIVAR-PASCO-4.pdf>.

JENNINGS, E.R., NEUMAN, D.R. y BLICKER, P.S. 2008. *Acid Mine Drainage and Effects on Fish Health and Ecology: A Review.* Anchorage, Alaska : Reclamation Research Group, LLC, Bozeman, Montana, 2008.

LÓPEZ PAMO, E., ADUVIRI, O. y BARETTINO, D. 2002. *Tratamientos pasivos de drenajes ácidos de mina: estado actual y perspectivas de futuro.* Madrid : Boletín Geológico y Minero, 2002. 0366-0176.

LÓPEZ, Alfonso. 2016. *Pruebas de tratamiento de drenaje ácido de mina en un sistema continuo de celdas con rocas filitas y caliza.* México : Universidad Autónoma de México, 2016.

LOTTEMOSER, B.G. 2010. *Mine Wastes: Characterization, treatment and environmental.* NEW YORK : Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2010.

MANAHAN, Stanley E. 2007. *Introducción a la Química Ambiental.* México : Reverté, 2007. 968-6708-60-X.

MEDINA, Ricardo. 2018. *Diseño y operatividad de la planta de neutralización de aguas ácidas de mina Paragsha.* Arequipa : UNSA, 2018.

MIGUEL, Aguasanta. 2014. *Estudio de la contaminación por drenaje ácidos de mina de las aguas superficiales en la cuenca del río Odiel (SO ESPAÑA).* Huelva : Universidad de Huelva, 2014. 978-84-16061-03-7.

Moran, R. 2001. *"Algunos ejemplos en Estados Unidos y Canadá: aproximaciones al costo económico de impactos ambientales en la minería".* Santiago : CIPMA, 2001. Vol. XIV.

MURR, L.E. 1980. *Theory and practice of copper sulphide leaching in dump and in-situ.* s.l. : Minerals Science Engineering,, 1980.

ÑAUPAS PAITAN, Humberto, y otros. 2018. *Metodología de la investigación Cuantitativa - Cualitativa y Redacción de la Tesis.* Bogotá : Ediciones de la U, 2018. 978-958-762-876-0.

ORÉ, Salvador. 2015. *Recuperación de los metales pesados presentes en el drenaje ácido de mina mediante la precipitación selectiva para su posterior utilización.* Huancayo : UNCP, 2015.

PANDURO, Diego. 2019. *Estudio del tratamiento de aguas ácidas provenientes de los niveles (socavones) de una compañía minera.* Arequipa : UNSA, 2019.

PATIÑO TIPACTI, Julio César. 2022. *Sistema de tratamiento activo mediante neutralización con óxido de calcio en solución, para la remoción de concentraciones de hierro y aluminio del drenaje ácido de mina de la unidad minera Arasi, Ocuwiri-Puno, 2019.* Callao, Perú : Universidad Nacional del Callao, 2022.

Predicción y estudio de drenaje ácido de mina sobre mineral de escombrera.

SENESE, Ana, NEGRELLI, Mirta y HIDALGO, N. 2021. 18, Antioquia : Revista colombiana de materiales, 2021. 2256-1013.

RAMOS MARTÍNEZ, Jonás Ananías. 2018. *Mejora de la calidad de aguas del río San Juan aplicando el proceso HDS en el distrito de Rancas, Pasco.* Pasco, Perú : Universidad nacional Daniel Alcides Carrión, 2018.

RIVERA, María Uria, y otros. 2020. *Carbonatos pedogénicos para el tratamiento del drenaje ácido de mina (DAM). Experimentos de laboratorio.* México : Instituto de Geología, Universidad Autónoma de México, 2020.

RODRÍGUEZ VÁSQUEZ, Carmen María. 2018. *Diseño de planta de tratamiento de aguas ácidas de mina con alto contenido de manganeso y zinc.* Lima, Perú : Universidad Nacional de Ingeniería, 2018.

RODRÍGUEZ, Diego, y otros. 2020. *De residuo a recurso: cambiando a paradigmas para las intervenciones mas inteligentes para la gestión de aguas residuales en América Latina y el Caribe.* Washington, DC : Bando Interamericano de Reconstrucción y Fomento/Banco Mundial, 2020.

RUIZ SALAZAR, Joel Alberto. 2018. *Tratamiento de aguas ácidas con dolomita para disminuir la concentración de Cu y Zn en efluentes de la planta concentradora*

Victoria en la provincia de Yauli - La Oroya. Huancayo, Perú : Universidad del Centro del Perú, 2018.

RUIZ, Nicolás y CHAPARRO, Jairo. 2018. *Evaluación a escala de laboratorio del gradiente de acidez de drenaje ácido de mina, mediante el uso de columnas de caliza como sistema pasivo de neutralización.* Boyacá, Colombia : Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia, 2018.

SANCHEZ, Arturo. 2011. *Conceptos básicos de gestión ambiental y desarrollo sustentable.* México : S y G editores, 2011.

SEVERICHE, Carlos, CASTILLO, Marlon y ACEVEDO, Leonor. 2013. *Manual de métodos analíticos para la determinación de parámetros fisicoquímicos básicos en el agua.* Cartagena de Indisa, Colombia. : s.n., 2013.

SIGLER, Hans, y otros. 2015. *Diseño de una planta piloto para el tratamiento pasivo de drenaje ácido de mina.* Huelva : Tecnoaqua, 2015.

SORIANO FIGUEROA, Roger. 2018. *Evaluación de la eficiencia en neutralización y remoción de metales pesados (Fe, Cu, Pb, Zn) del drenaje ácido de mina con lodos de baja densidad a nivel planta piloto de CÍA Minera Huancapeti - 2016.* Huaraz, Ancash : Universidad Nacional Santiago Antunez de Mayolo, 2018.

SOURCE. 2018. *Estudios en poblaciones afectadas por metales pesados en Pasco.* Lima : Sonimágenes del Perú SCRL, 2018.

TILLEY, Elizabeth, y otros. 2015. *Compendio de sistemas y tecnologías de saneamiento.* Dübendorf, Switzerland : Instituto Federal Suizo para la Ciencia y la Tecnología Acuática, 2015. 978-3-906484-67-9.

VEGA LUNA, E. 2015. *Un llamado a la remediación.* Lima, Perú : Defensoría del pueblo, 2015.

VESILIND, Aarne, MORGAN, Susan y HEINE, Lauren. 2013. *Introducción a la ingeniería ambiental.* México : Cengage Learning Editores, 2013.

VILLACHICA, Carlos, LLAMOSAS, Jaime y VILLACHICA, Joyce. 2005. *"Tecnología nacional comprobada para el tratamiento de efluentes ácidos minero".*

Tomado del IV congreso Internacional de Medio Ambiente en Minería y Metalurgia, 13 a 16 de julio de 2005. Lima : SMALLVILL SAC - CONSULCONT S.A.C., 2005.

ANEXOS

Anexo N° 1: Matriz de consistencia

TRATAMIENTO CONVENCIONAL CON UNA ETAPA ADICIONAL DE SULFURACIÓN PARA EL DRENAJE ÁCIDO DE MINA DE LA UNIDAD MINERA CERRO DE PASCO DEL DISTRITO DE SIMÓN BOLÍVAR, PASCO-2022						
TÍTULO DE LA INVESTIGACIÓN						
PROBLEMA	OBJETIVOS	HIPÓTESIS DE INVESTIGACIÓN	OPERACIONALIZACIÓN DE VARIABLES			MÉTODO A EMPLEAR
			VARIABLES	INDICADORES	ÍNDICE	
<p>GENERAL</p> <p>¿Cómo será el tratamiento convencional con una etapa adicional de sulfuración para el drenaje ácido de mina de la unidad minera Cerro de Pasco del distrito de Simón Bolívar, Pasco-2022?</p>	<p>GENERAL</p> <p>Evaluar el tratamiento convencional con una etapa adicional de sulfuración para drenaje ácido de mina de la unidad minera Cerro de Pasco del distrito de Simón Bolívar, Pasco - 2022.</p>	<p>GENERAL</p> <p>El tratamiento convencional con una etapa adicional de sulfuración aumenta significativamente la remoción de los metales pesados del drenaje ácido de mina de la unidad minera Cerro de Pasco del distrito de Simón Bolívar, Pasco - 2022.</p>	<p>Independiente, X:</p> <p>Tratamiento convencional del drenaje ácido de mina con una etapa de sulfuración.</p>	<p>X₁: Dosis de solución de cal</p> <p>X₂: Dosis de solución sulfhidrato de sodio</p> <p>X₃: Gradiente de velocidad</p>	<p>X₁ = mg/L</p> <p>X₂ = mg/L</p> <p>X₃ = s⁻¹</p>	<p>APHA-AWWA-WPCF Métodos normalizados para el análisis de aguas residuales</p>
<p>ESPECÍFICA</p> <p>¿Cuál será la dosis de cal en la etapa de alcalinización para la remoción de los metales del drenaje ácido de mina de la unidad minera Cerro de Pasco del distrito de Simón Bolívar, Pasco - 2022?</p> <p>¿Cuál será la dosis de sulfhidrato de sodio (NaSH) en la etapa de sulfuración para la remoción de los metales del drenaje ácido de mina de la unidad minera Cerro de Pasco del distrito de Simón Bolívar, Pasco - 2022?</p> <p>¿Cuál será el gradiente de velocidad en la etapa de sulfuración para la remoción de los metales del drenaje ácido de mina de la unidad minera Cerro de Pasco del distrito de Simón Bolívar, Pasco - 2022?</p>	<p>ESPECÍFICA</p> <p>Determinar la dosis de cal en la etapa de alcalinización para la remoción de los metales del drenaje ácido de mina de la unidad minera Cerro de Pasco del distrito de Simón Bolívar, Pasco - 2022.</p> <p>Determinar la dosis de sulfhidrato de sodio (NaSH) en la etapa de sulfuración para la remoción de los metales del drenaje ácido de mina de la unidad minera Cerro de Pasco del distrito de Simón Bolívar, Pasco - 2022.</p> <p>Determinar el gradiente de velocidad en la etapa de sulfuración para la remoción de los metales del drenaje ácido de mina de la unidad minera Cerro de Pasco del distrito de Simón Bolívar, Pasco - 2022.</p>	<p>ESPECÍFICA</p> <p>La dosis de cal en la etapa de alcalinización aumenta significativamente la remoción de los metales del drenaje ácido de mina de la unidad minera Cerro de Pasco del distrito de Simón Bolívar, Pasco-2022.</p> <p>La dosis de sulfhidrato de sodio, NaSH, en la etapa de sulfuración aumenta significativamente la remoción de los metales del drenaje ácido de mina de la unidad minera Cerro de Pasco del distrito de Simón Bolívar, Pasco-2022.</p> <p>El gradiente de velocidad en la etapa de sulfuración aumenta significativamente la remoción de los metales del drenaje ácido de mina de la unidad minera Cerro de Pasco del distrito de Simón Bolívar, Pasco-2022.</p>	<p>Dependiente, Y:</p> <p>Calidad del drenaje ácido de mina para su disposición final.</p>	<p>Y₁: Concentración de los metales pesados</p> <p>Y₂: Eficiencia de la remoción de metales</p>	<p>Y₁ = mg/L</p> <p>Y₂ = % de remoción</p>	<p>APHA-AWWA-WPCF Métodos normalizados para el análisis de aguas residuales</p>

Anexo N° 2: Validación de instrumento de recolección de datos

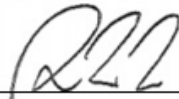
SOLICITUD DE VALIDACIÓN

Sr. Mtro. Huguez Enrique Ames Ramírez

De mi mayor consideración, la presente tiene por finalidad solicitar a usted determinar la validez de contenido del instrumento de recolección de datos que será aplicado en el proyecto de investigación titulado "TRATAMIENTO CONVENCIONAL CON UNA ETAPA ADICIONAL DE SULFURACIÓN PARA EL DRENAJE ÁCIDO DE MINA DE LA UNIDAD MINERA CERRO DE PASCO DEL DISTRITO DE SIMÓN BOLÍVAR, PASCO"

Su valiosa ayuda y experiencia consistirá en la evaluación de la pertinencia del instrumento que acompaño a esta solicitud.

Atentamente,



Sergio Rojas Rimachi

HOJA DE CRITERIOS PARA LA EVALUACIÓN DE JUICIO DE EXPERTOS

Marque según corresponda con un (✓) si está de acuerdo y con una (X) los ítems considerados en el instrumento.

CRITERIO	OPINIÓN	EVALUACIÓN
1. Claridad	Está formulado con lenguaje apropiado	✓
2. Objetividad	Está expresado en magnitudes y unidades observables	✓
3. Actualidad	Adecuado para la organización de datos	✓
4. Organización	Existe una organización lógica	✓
5. Suficiencia	Comprende los aspectos en cantidad y calidad	✓
6. Intencionalidad	Adecuado para valorar los datos de investigación	✓
7. Consistencia	Basado en aspectos teóricos y científicos	✓
8. Coherencia	Entre las dimensiones y los indicadores	✓
9. Metodología	La estrategia responde al propósito de la investigación	✓
10. Pertinencia	Es útil y adecuado para la investigación	✓

CONSTANCIA DE VALIDACIÓN

Por medio de la presente hago constar que he revisado y validado el instrumento de recolección de datos de laboratorio elaborado por el Ing. Sergio Rojas Rimachi con DNI 07361322, aspirante al título de maestro en Gestión Ambiental para el Desarrollo sostenible; el cual será utilizado para recabar datos de laboratorio para el desarrollo de la tesis titulada "TRATAMIENTO CONVENCIONAL CON UNA ETAPA ADICIONAL DE SULFURACIÓN PARA EL DRENAJE ÁCIDO DE MINA DE LA UNIDAD MINERA CERRO DE PASCO DEL DISTRITO DE SIMÓN BOLÍVAR, PASCO"

OPINIÓN DE APLICABILIDAD		
Instrumento: RECOLECCIÓN DE DATOS DE LABORATORIO	Aplicable	[<input checked="" type="checkbox"/>]
	Aplicable después de corregir	[<input type="checkbox"/>]
	No aplicable	[<input type="checkbox"/>]

Apellidos y nombre del experto: Ames Ramírez Huguez Enrique

DNI: 40143058

Especialidad del experto: Tratamiento de aguas residuales domésticas e industriales



Huguez Enrique Ames Ramírez

SOLICITUD DE VALIDACIÓN

Sr. Mg. Ing. Roosevelt Teófilo Cántaro Sotelo

De mi mayor consideración, la presente tiene por finalidad solicitar a usted determinar la validez de contenido del instrumento de recolección de datos que será aplicado en el proyecto de investigación titulado "TRATAMIENTO CONVENCIONAL CON UNA ETAPA ADICIONAL DE SULFURACIÓN PARA EL DRENAJE ÁCIDO DE MINA DE LA UNIDAD MINERA CERRO DE PASCO DEL DISTRITO DE SIMÓN BOLÍVAR, PASCO"

Su valiosa ayuda y experiencia consistirá en la evaluación de la pertinencia del instrumento que acompaño a esta solicitud.

Atentamente,



Sergio Rojas Rimachi

HOJA DE CRITERIOS PARA LA EVALUACIÓN DE JUICIO DE EXPERTOS

Marque según corresponda con un (✓) si está de acuerdo y con una (X) los ítems considerados en el instrumento.

CRITERIO	OPINIÓN	EVALUACIÓN
1. Claridad	Está formulado con lenguaje apropiado	✓
2. Objetividad	Está expresado en magnitudes y unidades observables	✓
3. Actualidad	Adecuado para la organización de datos	✓
4. Organización	Existe una organización lógica	✓
5. Suficiencia	Comprende los aspectos en cantidad y calidad	✓
6. Intencionalidad	Adecuado para valorar los datos de investigación	✓
7. Consistencia	Basado en aspectos teóricos y científicos	✓
8. Coherencia	Entre las dimensiones y los indicadores	✓
9. Metodología	La estrategia responde al propósito de la investigación	✓
10. Pertinencia	Es útil y adecuado para la investigación	✓

CONSTANCIA DE VALIDACIÓN

Por medio de la presente hago constar que he revisado y validado el instrumento de recolección de datos de laboratorio elaborado por el Ing. Sergio Rojas Rimachi con DNI 07361322, aspirante al título de maestro en Gestión Ambiental para el Desarrollo sostenible; el cual será utilizado para recabar datos de laboratorio para el desarrollo de la tesis titulada "TRATAMIENTO CONVENCIONAL CON UNA ETAPA ADICIONAL DE SULFURACIÓN PARA EL DRENAJE ÁCIDO DE MINA DE LA UNIDAD MINERA CERRO DE PASCO DEL DISTRITO DE SIMÓN BOLÍVAR, PASCO"

OPINIÓN DE APLICABILIDAD	
Instrumento: RECOLECCIÓN DE DATOS DE LABORATORIO	Aplicable <input checked="" type="checkbox"/>
	Aplicable después de corregir <input type="checkbox"/>
	No aplicable <input type="checkbox"/>

Apellidos y nombre del experto: Cántaro Sotelo Roosevelt Teófilo

DNI: 41928632

Especialidad del experto: Tratamiento de aguas residuales domésticas e industriales



Roosevelt Teófilo Cántaro Sotelo

SOLICITUD DE VALIDACIÓN

Sr. Mtro. Luis Huere Anaya

De mi mayor consideración, la presente tiene por finalidad solicitar a usted determinar la validez de contenido del instrumento de recolección de datos que será aplicado en el proyecto de investigación titulado "TRATAMIENTO CONVENCIONAL CON UNA ETAPA ADICIONAL DE SULFURACIÓN PARA EL DRENAJE ÁCIDO DE MINA DE LA UNIDAD MINERA CERRO DE PASCO DEL DISTRITO DE SIMÓN BOLÍVAR, PASCO"

Su valiosa ayuda y experiencia consistirá en la evaluación de la pertinencia del instrumento que acompaño a esta solicitud.

Atentamente,



Sergio Rojas Rimachi

HOJA DE CRITERIOS PARA LA EVALUACIÓN DE JUICIO DE EXPERTOS

Marque según corresponda con un (✓) si está de acuerdo y con una (X) los ítems considerados en el instrumento.

CRITERIO	OPINIÓN	EVALUACIÓN
1. Claridad	Está formulado con lenguaje apropiado	✓
2. Objetividad	Está expresado en magnitudes y unidades observables	✓
3. Actualidad	Adecuado para la organización de datos	✓
4. Organización	Existe una organización lógica	✓
5. Suficiencia	Comprende los aspectos en cantidad y calidad	✓
6. Intencionalidad	Adecuado para valorar los datos de investigación	✓
7. Consistencia	Basado en aspectos teóricos y científicos	✓
8. Coherencia	Entre las dimensiones y los indicadores	✓
9. Metodología	La estrategia responde al propósito de la investigación	✓
10. Pertinencia	Es útil y adecuado para la investigación	✓

CONSTANCIA DE VALIDACIÓN

Por medio de la presente hago constar que he revisado y validado el instrumento de recolección de datos de laboratorio elaborado por el Ing. Sergio Rojas Rimachi con DNI 07361322, aspirante al título de maestro en Gestión Ambiental para el Desarrollo sostenible; el cual será utilizado para recabar datos de laboratorio para el desarrollo de la tesis titulada "TRATAMIENTO CONVENCIONAL CON UNA ETAPA ADICIONAL DE SULFURACIÓN PARA EL DRENAJE ÁCIDO DE MINA DE LA UNIDAD MINERA CERRO DE PASCO DEL DISTRITO DE SIMÓN BOLÍVAR, PASCO"

OPINIÓN DE APLICABILIDAD		
Instrumento: RECOLECCIÓN DE DATOS DE LABORATORIO	Aplicable	<input checked="" type="checkbox"/>
	Aplicable después de corregir	<input type="checkbox"/>
	No aplicable	<input type="checkbox"/>

Apellidos y nombre del experto: Huere Anaya Luis

DNI: 097909873

Especialidad del experto: Tratamiento de aguas residuales domésticas e industriales



Luis Huere Anaya

Anexo N° 3: Constancia de uso de laboratorio

AÑO DE LA UNIDAD, LA PAZ Y EL DESARROLLO

Lima, 09 de agosto de 2023

SOLICITO: CONSTANCIA DE USO DEL LABORATORIO QUÍMICO

Sr.: Ing. Jorge Castillo Migone

JEFE DEL PROGRAMA ACADÉMICO DE MINERÍA Y PROCESOS QUÍMICOS-METALÚRGICOS

Estimado Ingeniero, actualmente estoy desarrollando mi tesis de grado de maestría, En la Universidad Nacional del Callao, titulado “TRATAMIENTO CONVENCIONAL CON UNA ESTAPA ADICIONAL DE SULFURACIÓN PARA EL DRENAJE ÁCIDO DE MINA DE LA UNIDAD MINERA CERRO DE PASCO DEL DISTRITO DE SIMÓN BOLÍVAR, PASCO” motivo por el cual le solicito una constancia de USO DEL LABORATORIO DE QUÍMICA, en la hice el análisis y tratamiento de muestras de DRENAJE ÁCIDO DE MINA con la finalidad de obtener datos de las características fisicoquímicas y dosis de los reactivos químicos para su tratamiento.

Esperando contar con su valioso apoyo, me despido muy cordialmente de usted.

Atentamente,


Sergio Rojas Rimachi
DNI: 07361322



**INSTITUTO DE EDUCACIÓN SUPERIOR EN PERÚ
TECSUP N° 1
Av. Cascanueces 2221 Santa Anita – Lima**

CONSTANCIA

**EL JEFE DEL DEPARTAMENTO DE MINERÍA Y PROCESOS QUÍMICO -
METALÚRGICO DEL INSTITUTO TECSUP N° 1 SEDE LIMA, QUE SUSCRIBE:**

HACE CONSTAR:

Que don **SERGIO ROJAS RIMACHI**, con DNI N° 07361322, realizó pruebas experimentales como Docente en nuestro ambiente de Laboratorio Químico del Instituto TECSUP N° 1 sede Lima, para utilizarlos como tratamiento de datos en su trabajo de investigación titulado: "TRATAMIENTO CONVENCIONAL CON UNA ETAPA ADICIONAL DE SULFURACIÓN PARA EL DRENAJE ÁCIDO DE MINA DE LA UNIDAD MINERA CERRO DE PASCO DEL DISTRITO DE SIMÓN BOLÍVAR, PASCO", para obtener el grado de Magister en Gestión Ambiental para el desarrollo sostenible en la Universidad Nacional del Callao.

Se expide la presente solicitud del interesado, para los fines que estime conveniente.

Santa Anita, 11 de agosto del 2023

Jorge Víctor Castillo Migone

Jefe de Minería y Procesos Químicos-Metalúrgicos

Anexo N° 4: Recolección de datos de análisis y tratamiento del DAM

RECOLECCIÓN DE DATOS DE LABORATORIO
Laboratorio de Análisis Químico e Instrumental - Tecsup

Proyecto	Tratamiento convencional con una etapa adicional de sulfuración para el drenaje ácido de mina de la unidad minera Cerro de Pasco del distrito de Simón Bolívar, Pasco - 2022
Tipo de muestra	Drenaje ácido de mina
Procedencia	Laguna de Quiulacocha, Simón Bolívar, Pasco
Fecha de análisis	03/06/23 – 07/06/23
Responsable	Sergio Rojas R.

Características fisicoquímicas iniciales	Parámetros medidos en campo		Parámetros medidos en laboratorio	
	Temp. (°C)	4	Temp. (°C)	17
	pH	2,32	pH	2,32
	Conduct. (µS/cm)	10680	SST (mg/L)	64
	ORP (mV)	656	ST (mg/L)	20016

	Fe	Cu	Pb	Zn
Conc. inicial de metales (mg/L)	16.030	2.998	1.157	2.571

ALCALINIZACIÓN CON CAL 10 % m/v							
Muestra	Vol	Cal (mL/L)	RPM	Fe (mg/L)	Cu (mg/L)	Pb (mg/L)	Zn (mg/L)
M-01	1L	32	160	0.397	0.035	0.650	1.356
M-02	1L	40	160	0.305	0.028	0.694	1.497
M-03	1L	32	240	0.298	0.031	0.665	1.342
M-04	1L	40	240	0.376	0.033	0.698	1.400
ALCALINIZACIÓN CON CAL 10 % m/v (RÉPLICA)							
M-05	1L	32	160	0.388	0.038	0.633	1.377
M-06	1L	40	160	0.322	0.032	0.672	1.490
M-07	1L	32	240	0.301	0.035	0.645	1.388
M-08	1L	40	240	0.368	0,029	0.680	1.397

RECOLECCIÓN DE DATOS DE LABORATORIO
Laboratorio de Análisis Químico e Instrumental - Tecsup

Proyecto	Tratamiento convencional con una etapa adicional de sulfuración para el drenaje ácido de mina de la unidad minera Cerro de Pasco del distrito de Simón Bolívar, Pasco - 2022
Tipo de muestra	Drenaje ácido de mina
Procedencia	Laguna de Quiulacocha, Simón Bolívar, Pasco
Fecha de análisis	03/06/23 – 07/06/23
Responsable	Sergio Rojas R.

Características fisicoquímicas iniciales	Parámetros medidos en campo		Parámetros medidos en laboratorio	
	Temp. (°C)	4	Temp. (°C)	17
	pH	2,32	pH	2,32
	Conduct. (µS/cm)	10680	SST (mg/L)	64
	ORP (mV)	656	ST (mg/L)	20016

	Fe	Cu	Pb	Zn
Conc. inicial de metales (mg/L)	16.030	2.998	1.157	2.571

ALCALINIZACIÓN CON CAL 10 % m/v Y SULFURACIÓN CON NaSH 10 m/v								
Muestra	Vol	Cal (mL/L)	NaSH (mL/L)	RPM	Fe (mg/L)	Cu (mg/L)	Pb (mg/L)	Zn (mg/L)
M-01	1L	32	0.5	160	0.164	0.002	0.003	0.199
M-02	1L	32	0.5	240	0.163	0.003	0.003	1.495
M-03	1L	32	1.0	160	0.257	0.002	0.001	1.366
M-04	1L	32	1.0	240	0.136	0.003	0.005	1.255
M-05	1L	40	0.5	160	0.284	0.004	0.007	1.002
M-06	1L	40	0.5	240	0.204	0.007	0.008	1.092
M-07	1L	40	1.0	160	0.273	0.005	0.006	0.859
M-08	1L	40	1.0	240	0.205	0.001	0.001	1.270
ALCALINIZACIÓN CON CAL 10 % m/v Y SULFURACIÓN CON NaSH 10 % m/v (RÉPLICA)								
M-09	1L	32	0.5	160	0.165	0.003	0.004	1.212
M-10	1L	32	0.5	240	0.161	0.003	0.003	1.280
M-11	1L	32	1.0	160	0.253	0.002	0.002	1.488
M-12	1L	32	1.0	240	0.135	0.003	0.004	1.459
M-13	1L	40	0.5	160	0.281	0.006	0.008	1.009
M-14	1L	40	0.5	240	0.201	0.005	0.005	1.089
M-15	1L	40	1.0	160	0.270	0.005	0.007	0.909
M-16	1L	40	1.0	240	0.207	0.002	0.001	1.256

Anexo N° 5: Normativa ambiental de efluentes minero-metalúrgicos

Límites Máximos Permisibles para la descarga de efluentes líquidos de actividades minero-metalúrgicas. D.S. N° 010-2010-MINAM

Parámetro	Unidad	Límite en cualquier momento	Límite para el promedio anual
pH		6 – 9	6 – 9
Sólidos totales en suspensión	mg/L	50	25
Aceites y grasas	mg/L	20	16
Cianuro total	mg/L	1	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	1.6
Plomo total	mg/L	0.2	0.16
Mercurio total	mg/L	0.002	0.0016
Zinc total	mg/L	1.5	1.2

Estándar de calidad ambiental para el agua categoría 3: riego de vegetales y bebida de animales. D.S. N° 004-2017-MINAM

Parámetros físicos, químicos e inorgánicos	Unidad de medida	D1: Riego de vegetales		D2: Bebida para animales
		Agua para riego no restringido (C)	Agua para riego restringido	Bebida para animales
Oxígeno disuelto (valor mínimo)	mg/L	≥ 4		≥ 5
Potencial de hidrógeno (pH)		6.5 – 8.5		6.5 – 8.4
Temperatura	°C	Δ 3		Δ 3
Hierro	mg/L	5		**
Cobre	mg/L	0.2		0.5
Plomo	mg/L	0.05		0.05
Zinc	mg/L	2		24

Nota: La tabla contiene solo a los parámetros medidos en la investigación

Anexo N° 6: Base de datos

Diseño factorial 2^K para el tratamiento del drenaje ácido de mina

*Sin título4 [ConjuntoDatos0] - IBM SPSS Statistics Editor de datos

Archivo Editar Ver Datos Transformar Analizar Gráficos Utilidades Ampliaciones Ventana Ayuda

	Nombre	Tipo	Anchura	Decimales	Etiqueta	Valores	Perdidos	Columnas	Alineación	Medida	Rol
1	Cal	Númérico	8	0	Cal al 10 % m/v	{1, 32}...	Ninguna	8	Derecha	Escala	Entrada
2	Sulfhidrato	Númérico	8	1	NaSH al 10 % ...	{1.0, 0.5}...	Ninguna	8	Derecha	Escala	Entrada
3	Gradiente	Númérico	8	0	Gradiente de V...	{1, 160}...	Ninguna	8	Derecha	Escala	Entrada
4	Hierro	Númérico	8	3	Fe (mg/L)	Ninguna	Ninguna	8	Derecha	Escala	Entrada
5	Cobre	Númérico	8	3	Cu (mg/L)	Ninguna	Ninguna	8	Derecha	Escala	Entrada
6	Plomo	Númérico	8	3	Pb (mg/L)	Ninguna	Ninguna	8	Derecha	Escala	Entrada
7	Cinc	Númérico	8	3	Zn (mg/L)	Ninguna	Ninguna	8	Derecha	Escala	Entrada
8											
9											
10											
11											

Resultados del tratamiento del drenaje ácido de mina por alcalinización y sulfuración

*Sin título4 [ConjuntoDatos0] - IBM SPSS Statistics Editor de datos

Archivo Editar Ver Datos Transformar Analizar Gráficos Utilidades Ampliaciones Ventana Ayuda

10 :	Cal	Sulfhidrato	Gradiente	Hierro	Cobre	Plomo	Cinc	var	var	var	var	var
1	32	0.5	160	.164	.002	.003	1.199					
2	32	0.5	240	.163	.003	.003	1.495					
3	32	1.0	160	.257	.002	.001	1.366					
4	32	1.0	240	.136	.003	.005	1.255					
5	40	0.5	160	.284	.004	.007	1.002					
6	40	0.5	240	.204	.007	.008	1.092					
7	40	1.0	160	.273	.005	.006	.859					
8	40	1.0	240	.205	.001	.001	1.270					
9	32	0.5	160	.165	.003	.004	1.212					
10	32	0.5	240	.161	.003	.003	1.280					
11	32	1.0	160	.253	.002	.002	1.488					
12	32	1.0	240	.135	.003	.004	1.459					
13	40	0.5	160	.281	.006	.008	1.009					
14	40	0.5	240	.201	.005	.005	1.089					
15	40	1.0	160	.270	.005	.007	.909					
16	40	1.0	240	.207	.002	.001	1.256					
17												

Anexo N° 7: Instrumentos para la medición de parámetros fisicoquímicos del agua

Manual de multiparámetro Hanna


HI98194, HI98195, HI98196

Medidor multiparámetro para pH/
mV, ORP, CE, TDS, Resistividad,
Salinidad, σ Agua de mar, oxígeno
disuelto, presión atmosférica y
temperatura.



The image shows a Hanna HI98194 multiparameter water quality analyzer. It consists of a handheld display unit and a probe. The display unit is grey and black, with a color LCD screen showing various parameters: 199.3 mV/pH, 1.00 pH, 220.6 µS/cm, 2.9 mg/L DO, 2.2 ppm O₂, 96 µS/cm, 1.00 mg/L, 0.10 mg/L, 0.00 mg/L, 0.0 mg/L, 25.0 °C. The probe is black and cylindrical, with a silver tip. The Hanna logo is visible on the display unit.

MANUAL DE INSTRUCCIONES



HANNA
instruments

Nota: Manual de instrucciones y de calibración. El equipo se calibra cada vez que se van a realizar medidas de pH con buffers de 4.01, 7.01 y 10.01, acuerdo al manual.

Certificado de calibración de la balanza analítica





LABORATORIO DE CALIBRACIÓN ACREDITADO POR EL
ORGANISMO PERUANO DE ACREDITACIÓN INACAL-DA
CON REFERENCIA N° 15.615



INACAL
DA - Dept.
Acreditación

CERTIFICADO DE CALIBRACIÓN LCM-A-090-2022
CON VALOR OFICIAL
SEGÚN CÉDULA DE NOTIFICACIÓN N° 124-2021-INACAL/DA

N° de Eq.: 220948
PÁGINA: 1 de 4
Fecha de Emisión:
2022.04.11

- 1.- CLIENTE : **TECUSP N° 1**
- 2.- DIRECCIÓN : Av. Cascamceces N° 2221 - Santa Anita
- 3.- PROCEDIMIENTO DE CALIBRACIÓN : INDECOPI - SNM PC-011 (4ª Edición Abril 2010).
Procedimiento de Calibración de Balanzas de Funcionamiento No Automático Clase I y Clase II.
- 4.- MÉTODO DE CALIBRACIÓN : Comparación de las indicaciones de la balanza contra cargas aplicadas de valor conocido (pesas patrón).

5.- PATRONES DE REFERENCIA Y TRABAJO (V300 1.6 x 3.7)

Trasabilidad metrológica (V300 1.6)	Nombre del patrón	Código del patrón	Certificado de Calibración
DM INACAL - PERU	Juego de Pesas 1 mg a 200 g.	MM 001/2	PE21-C-1582
DM INACAL - PERU	Pesa de 100 g	MM 001/2	PE22A-C-0073

Las pesas patrón utilizadas durante la calibración de la balanza, tienen asegurada su trazabilidad metrológica a los patrones de la Dirección de Metrología del INACAL (DM INACAL).

- 6.- INSTRUMENTO CALIBRADO:

BALANZA	
Marca : METTLER TOLEDO	Capacidad Máxima (Max) : 220 g
Modelo : AB205-S	Resolución (d) : 0.01 mg / 0.1 mg
Serie : 1125453666	División de Verificación (e) : 1 mg / 1 mg (**)
Código : BAL-04	Clase de Exactitud : 1 (***)
- 7.- CONDICIONES DE REFERENCIA (V300 4.11) :

Lugar de Calibración : Laboratorio de Química Tecsup N° 1

Condiciones ambientales durante la calibración :

	Inicio	Final
Temperatura Ambiental	28.5 °C	29.1 °C
Humedad Relativa	49.7 %	49.2 %
- 8.- FECHA DE CALIBRACIÓN : 2022-04-01

JEFE DEL LABORATORIO DE CALIBRACIÓN



JEFERSON
CORTIJA CANCI
METROLOGIA (PERU)
REG. 10710 - 181875

RESPONSABLE DE DIVISION



Martin Cuevas Mallma



Jr. Pomabamba N° 774 - Breña Telf: 4246152 / 3301720 / 6523200 Fax: 6523213 (102) Ventas : Anexo (101)
metrologia@reles.com.pe ventas@reles.com.pe www.reles.com.pe

Nota: Balanza analítica digital, Marca: METTLER TOLEDO, Modelo: AB205-S, Serie: 1125453666.

Anexo N° 8: Imágenes de las operaciones y procesos del tratamiento del DAM

