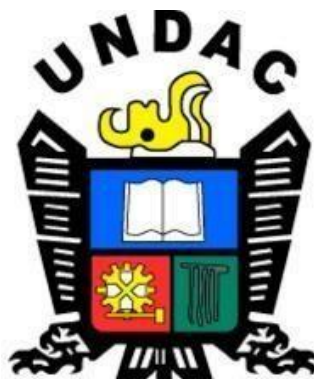


UNIVERSIDAD NACIONAL DANIEL ALCIDES CARRIÓN

FACULTAD DE INGENIERÍA

ESCUELA DE FORMACIÓN PROFESIONAL DE INGENIERÍA

METALÚRGICA



T E S I S

**Optimización del consumo de Cal para la precipitación del Manganese en la planta
de tratamiento de agua residual industrial de la unidad minera Andaychagua -Yauli**

- Junín – 2024

Para optar el título profesional de:

Ingeniero Metalurgista

Autores:

Bach. Leydith Danitza BERNARDO COTRINA

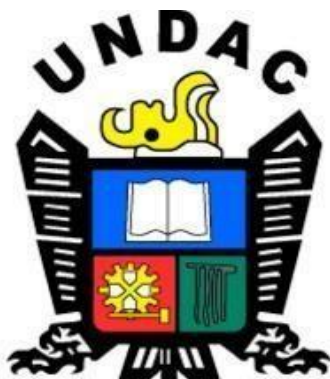
Bach. Sheyla Ines PINTO FERNANDEZ

Asesor:

Dr. Eusebio ROQUE HUAMÁN

Cerro de Pasco – Perú – 2025

UNIVERSIDAD NACIONAL DANIEL ALCIDES CARRIÓN
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE FORMACIÓN PROFESIONAL DE INGENIERÍA
METALÚRGICA



T E S I S

**Optimización del consumo de Cal para la precipitación del Manganese en la planta
de tratamiento de agua residual industrial de la unidad Sustentada y aprobada ante
los miembros del jurado:**

Dr. Marco Antonio SURICHAQUI HIDALGO
PRESIDENTE

Dr. Cayo PALACIOS ESPÍRITU
MIEMBRO

Dr. Ramiro SIUCE BONIFACIO
MIEMBRO



Universidad Nacional Daniel Alcides Carrión

Facultad de Ingeniería

Unidad de Investigación

INFORME DE ORIGINALIDAD N° 300-2025-UNDAC/UIFI

La Unidad de Investigación de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional Daniel Alcides Carrión en mérito al artículo 23° del Reglamento General de Grados Académicos y Títulos Profesionales aprobado en Consejo Universitario del 21 de abril del 2022, La Tesis ha sido evaluado por el software antiplagio Turnitin Similarity, que a continuación se detalla:

Tesis:

Optimización del Consumo de Cal para la Precipitación del Manganeseo en la Planta de Tratamiento de Agua Residual Industrial de la Unidad Minera Andaychagua -

Yauli - Junín – 2024

Apellidos y nombres de los tesisistas

Bach. Leydith Danitza, Bernardo Cotrina

Bach. Sheyla Ines, Pinto Fernandez

Apellidos y nombres del Asesor:

Dr. Eusebio Roque Huamán

Escuela de Formación Profesional

Ingeniería Metalúrgica

Índice de Similitud

24 %

APROBADO

Se informa el Reporte de evaluación del software similitud para los fines pertinentes:

Cerro de Pasco, 8 de julio del 2025



Firmado digitalmente por PALOMINO
ISIDRO Ruben Egozar PAU
201548000465 e08
Motivo: Soy el autor del documento
Fecha: 06.07.2025 20:07:36 -05:00

DEDICATORIA

A nuestro Divino creador por derramar sus bendiciones sobre nosotras y llenarnos de su fuerza para vencer los obstáculos.

A nuestros padres por su amor incondicional, apoyo constante y enseñarnos el valor del esfuerzo.

A nuestros mentores, quienes con su paciencia y enseñanzas nos despertaron deseo de seguir aprendiendo.

AGRADECIMIENTO

Este trabajo debe ser reconocido como una labor conjunta realizada con nuestro asesor de tesis, Dr. Eusebio Roque Huamán por su apoyo incondicional a quien le debemos gran parte de nuestro aprendizaje durante el desarrollo de este proyecto,

A nuestros padres, por estar presentes en cada etapa de nuestro desarrollo profesional, impulsándonos a lograr cada meta propuesta.

A nuestros colaboradores por el apoyo y confianza brindada para poder llevar a cabo este trabajo de investigación.

RESUMEN

Esta investigación se realizó con objetivo de reducir el consumo de cal mediante la optimización de esta para la precipitación del manganeso (Mn) y demás metales pesados, obteniendo el rango de pH adecuado para la separación solido-líquido, y sobre todo determinar la influencia del tiempo de alcalinización y clarificación en la precipitación del manganeso en la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales (PTAR) de la unidad minera Andaychagua – Yauli – Junín – 2024. Para los objetivos del presente estudio se empleó la investigación de tipo experimental, el diseño utilizado para evaluar las concentraciones para el tratamiento del manganeso del agua de mina fue el diseño factorial 2^k , con un tamaño de muestra de 860 litros, realizando procedimientos experimentales como preparación de reactivos y ejecución de pruebas metalúrgicas de laboratorio. Los análisis químicos y las pruebas metalúrgicas para el tratamiento de las aguas residuales de la unidad minera Andaychagua, se realizó en un laboratorio certificado de la ciudad de Lima denominado CERTIMIN – Área de Metalurgia, donde se recepcionaron las muestras representativas de mina, los cuales fueron muestreados en campo. Se realizaron en una serie de pruebas en diferentes etapas, empezando por la alcalinización realizadas al compósito (solución conformada por muestras individuales), cuyos consumos de cal evaluadas fueron: 0,02; 0,03; 0,04 y 0,05 g/l, los cuales llegaron a pHs de: 9,7; 10,0; 10,2 y 10,5 respectivamente; obteniendo contenidos finales de manganeso en el orden de: 0.251, 0.211, 0.105 y 0.014 mg/l Mn, respectivamente, y a medida que se incrementa el pH, el manganeso tiende a removerse hasta un 99% Mn.

Palabra clave: Agua ácida de mina, optimización del consumo de cal, compósito.

ABSTRACT

This research was conducted with the aim of reducing lime consumption by optimizing it for the precipitation of manganese and other heavy metals, determining the appropriate pH range for solid-liquid separation, and, most importantly, assessing the influence of alkalization and clarification time on the precipitation of manganese (Mn) at the Andaychagua Mining Unit Wastewater Treatment Plant (PTAR) - Yauli – Junín – 2024.

For the objectives of this study, experimental research was employed, using a 2^K factorial design to evaluate concentrations for the treatment of manganese in mine water.

Chemical analysis and metallurgical tests for the treatment of wastewater from the Andaychagua mining unit, was carried out in a certified laboratory in Lima called CERTIMIN – Metallurgy Area, where representative mine samples were received, having been previously sampled in the field. A series of tests were performed in different stages, starting with the alkalization of the composite (a solution formed by individual samples), with the evaluated lime consumption levels being 0,02; 0,03; 0,04; and 0,05 g/l. These achieved pH levels of 9,7; 10,0; 10,2; and 10,5; respectively. Final manganese concentrations were obtained in the order of 0,251; 0,211; 0,105; and 0,014 mg/l Mn, respectively. As the pH increased, manganese was removed by up to 99% Mn.

Keywords: Acid mine water, lime consumption optimization, composite.

INTRODUCCIÓN

Según estudios recientes, el consumo excesivo de cal en los procesos de tratamiento de aguas residuales puede provocar la formación de lodos en exceso, alteración de pH del agua tratada, problemas de incrustaciones y obstrucciones en las tuberías, equipos y tanques de una PTAR e impacto ambiental en el sector minero como sucede en la unidad minera Andaychagua – Yauli – Junín – 2024

La presencia de manganeso en aguas residuales generadas por actividades mineras es un problema ambiental de creciente preocupación, y el consumo excesivo de cal para la precipitación de estos contaminantes también puede afectar la eficiencia del proceso. Por ello, optimizar el uso de cal y determinar el pH ideal para la remoción de manganeso es fundamental para mejorar la eficacia de los tratamientos en plantas de aguas residuales. Este estudio tiene como objetivo evaluar la optimización del consumo de cal para el tratamiento de manganeso en el proceso de precipitación, identificar el rango de pH adecuado para la separación sólido-líquido y analizar la influencia del tiempo de alcalinización y clarificación en estos procesos.

Se realizaron pruebas metalúrgicas para determinar el comportamiento de la remoción de manganeso bajo distintos niveles de alcalinización. Con estos resultados, se busca ofrecer una alternativa eficiente para la mejora de los procesos en la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales (PTAR) de la unidad minera Andaychagua. En la siguiente investigación de laboratorio se realizó el análisis y evaluación de pruebas experimentales para remover el manganeso a fin de descargar el agua según ECA Categoría 3 (riego de vegetales y bebidas de animales) según Decreto Supremo N°004-2017-MINAM.

INDICE

DEDICATORIA

AGRADECIMIENTO

RESUMEN

ABSTRACT

INTRODUCCIÓN

INDICE

CAPITULO I

PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN

1.1. Identificación y determinación del problema.....	1
1.1.1. Identificación del problema.....	1
1.1.2. Determinación del problema	8
1.2. Delimitación de la investigación.....	8
1.2.1. Delimitación teórica	8
1.2.2. Delimitación espacial	9
1.2.3. Delimitación temporal.....	9
1.3. Formulación del problema	9
1.3.1. Problema principal	9
1.3.2. Problemas específicos	10

1.4. Formulación de objetivos	10
1.4.1. Objetivo general	10
1.4.2. Objetivos específicos	10
1.5. Justificación de la investigación	11
1.6. Limitaciones de la investigación.....	12

CAPITULO II

MARCO TEÓRICO

2.1. Antecedentes de estudio.....	13
2.1.1. Antecedentes internacionales	13
2.1.2. Antecedentes nacionales	16
2.1.3. Antecedentes locales	20
2.2. Bases teóricas-científicas	22
2.2.1. Drenaje de agua ácida de mina.....	22
2.2.2. Mecanismos de formación de aguas ácidas	22
2.2.3. El manganeso	23
2.2.4. Remoción de manganeso en aguas residuales.....	24
2.2.5. Técnicas de remoción de manganeso	25

2.2.6. Métodos para remoción de metales pesados más usados:.....	26
2.2.7. Diseños experimentales.....	31
2.2.8. Optimización mediante diseños experimentales	32
2.3. Definición de términos básicos	33
2.4. Formulación de hipótesis	37
2.4.1. Hipótesis general	37
2.4.2. Hipótesis específicas	37
2.5. Identificación de variables	38
2.6. Definición operacional de variables e indicadores	38
2.6.1. Operacionalización de la variable independiente:.....	38
2.6.2. Operacionalización de la variable dependiente:.....	38

CAPITULO III

METODOLOGÍA Y TÉCNICAS DE INVESTIGACIÓN

3.1. Tipo de investigación.	40
3.2. Nivel de investigación.....	40
3.3. Métodos de investigación.....	40
3.4. Diseño de investigación.	41

3.4.1. Diseño Factorial – Neutralización.....	41
3.4.2. Diseño Factorial – Neutralización más Oxidación.....	42
3.4.3. Diseño Factorial – Optimización	42
3.5. Población y muestra.	43
3.5.1. Población.....	43
3.5.2. Muestra.....	43
3.5.3. Caracterización química de muestras individuales	45
3.6. Técnicas e instrumentos de recolección de datos.....	50
3.6.1. Técnicas de recolección de datos	51
3.6.2. Instrumentos de recolección de datos	52
3.7. Técnicas de procesamiento y análisis de datos	58
3.7.1. Técnicas de procesamiento de datos	58
3.8. Tratamiento estadístico.	67
3.9. Selección, validación y confiabilidad de los instrumentos de investigación	57
3.8.1. Selección	57
3.8.2. Validación	57
3.8.3. Confiabilidad.....	57

3.10. Orientación ética filosófica y epistémica	73
---	----

CAPITULO IV

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1. Descripción del trabajo	75
4.2. Presentación, análisis e interpretación de resultados	76
4.2.1. Presentación de resultados	76
4.2.2. Análisis e interpretación de resultados	77
4.3. Prueba de Hipótesis.....	79
4.4. Discusión de resultados.....	81
4.4.1. Condiciones del pH y su influencia en la precipitación del manganeso	81
4.4.2. Efectos del consumo de cal	82
4.4.3. Cinética de precipitación.....	82
4.4.4. Consideración de factores químicos como el arsénico y hierro	83
4.4.5. Evaluación de la eficiencia.....	83

CONCLUSIONES

RECOMENDACIONES

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANEXOS

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Análisis químicos de muestras contaminadas de Andaychagua.	2
Tabla 2. Resumen de consumo de reactivos de la PTAR - Andaychagua.	8
Tabla 3. Técnicas para la remoción de Mn^{2+} en aguas residuales.....	26
Tabla 4. Reactivos más usados en etapas de alcalinización.....	27
Tabla 5. Tabla de operacionalización de variables	39
Tabla 6. Diseño experimental - Alcalinización con cal.	41
Tabla 7. Diseño experimental – Alcalinización más oxidación.....	42
Tabla 8. Diseño experimental – Optimización de pH y tiempo.....	43
Tabla 9. Muestras Ingresadas a Laboratorio Metalúrgico.....	44
Tabla 10. Resultados de Análisis Químico de muestras individuales Vs LMP.....	46
Tabla 11. Parámetros ECA-3 Vs Resultados Relave Fresco y Mina NV570.	47
Tabla 12. Flujos proporcionados por Andaychagua – Compósito.....	48
Tabla 13. Resultados de Análisis Físicos-Químicos – Compósito.	48
Tabla 14. Resultados de Análisis Químico por ICP – Compósito.....	49
Tabla 15. Parámetros ECA-3 Vs Resultados de Compósito.....	50
Tabla 16. Etapa de Alcalinización a pH 9,7-10,5 – Compósito.....	59
Tabla 17. Etapa de Clarificación a pH 9,7-10,5 – Compósito.	59
Tabla 18. Parámetros ECA-3 Vs Resultados HLC-T05, T06, T07.....	60
Tabla 19. Etapa de Alcalinización–Oxidación a pH 10.3 – Compósito.	61
Tabla 20 Etapa de Clarificación después de Alc.+Aire – Compósito.....	62
Tabla 21. <i>Parámetros ECA-3 Vs Resultados HLC-T04, T08, T09</i>	63
Tabla 22. Etapa de Neutralización y Oxidación (Optimización).	64
Tabla 23. Etapa de Clarificación (Optimización).	65
Tabla 24. Contenido de As y Mn en las Pruebas de Optimización.....	66
Tabla 25. Resultados de diseño experimental - Neutralización con cal.....	76

Tabla 26.	Resultados de diseño experimental – Neutralización más oxidación.	76
Tabla 27.	Resultados de diseño experimental – Optimización.	77
Tabla 28	Consumo de cal en la PTAR – Andaychagua (Determinación del problema).....	78
Tabla 29.	Costo de cal según la investigación aplicada.	78

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Ubicación de los componentes de la unidad minera Andaychagua.....	6
Figura 2: Esquema de proceso - Andaychagua.	7
Figura 3: Hoja de piso de la toma de muestra in situ.	51
Figura 4: Hoja de piso para la conformación del compósito.	52
Figura 5 Cal de 80% CaO.....	53
Figura 6: Vasos de precipitación de 1 litro.	54
Figura 7: Probetas para medir alícuotas necesarias.....	54
Figura 8: Medición de muestras de agua de mina.....	55
Figura 9: pH metro.	55
Figura 10: Turbidímetro.	56
Figura 11: Balanza Analítica.....	57

ÍNDICE DE GRAFICAS

Gráfica 1: Gráfica de interacción de la cal para el Mn y As – Neutralización.	68
Gráfica 2: Gráfica de interacción de pH para el Mn y As – Neutralización.	69
Gráfica 3: Gráfica de efectos principales para el Mn – Neutralización más Oxidación. ...	70
Gráfica 4: Gráfica de efectos principales para el As – Neutralización más Oxidación.	71
Gráfica 5: Gráfica de efectos principales para el manganeso – Optimización.	72
Gráfica 6: Gráfica de efectos principales para el arsénico – Optimización.	73
Gráfica 7: Gráfica de distribución probabilística – Optimización.	80

ÍNDICE DE FOTOGRAFÍAS

Fotografía 1: Distribución T Student.	89
Fotografía 2: Instrumento de Recolección de datos: Plan de pruebas metalúrgicas	90
Fotografía 3: Recepción de muestras individuales de Andaychagua.....	91
Fotografía 4: Muestras Individuales para Análisis Químicos.....	91
Fotografía 5: Formación de compósito.	92
Fotografía 6: Toma de alícuotas del compósito.	92
Fotografía 7: Preparación de lechada de cal.	93
Fotografía 8: Medición de parámetros como pH.	93
Fotografía 9: Dosificación de lechada de cal.	94
Fotografía 10: Ejecución de pruebas de neutralización	94
Fotografía 11: Ejecución de pruebas de neutralización más oxidación.	95
Fotografía 12: Clarificación de la solución tratada.	95
Fotografía 13: Medición de turbidez de la solución clarificada.	96
Fotografía 14: Muestras tratadas para análisis químico.....	96

CAPITULO I

PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN

1.1. Identificación y determinación del problema

1.1.1. Identificación del problema

El problema principal identificado es la contaminación de las aguas superficiales y subterráneas debido a los drenajes ácidos generados en actividades mineras, especialmente en la unidad minera Andaychagua. A pesar de contar con un sistema de tratamiento de aguas residuales que opera las 24 horas del día, basado en la dosificación de lechada de cal, floculante y dióxido de carbono (CO₂), los resultados históricos y análisis químicos han demostrado la presencia persistente de altos niveles de metales pesados como arsénico (As), cadmio (Cd), cobre (Cu), hierro (Fe), plomo (Pb), zinc (Zn) y, especialmente, manganeso (Mn).

Aunque los sistemas de tratamiento permiten reducir estos contaminantes a niveles por debajo de los límites máximos permisibles (LMP) según Decreto Supremo N°010-2010-MINAM, existen preocupaciones en cuanto a su eficiencia, sostenibilidad económica y capacidad para tratar los caudales de aguas ácidas de manera óptima, especialmente cuando se tiene en cuenta el uso de cal hasta alcanzar

pH alcalino y el aire para la oxidación.

En las alternativas de precipitación como hidróxidos (cal), los ensayos de laboratorio alcanzaron las calidades objetivo para la precipitación de metales por debajo de los LMP, sin embargo, el análisis económico y los valores históricos validaron la opción de abatimiento de contaminantes para la mezcla mediante el uso de cal hasta pH alcalino y uso del aire para oxidar y abatir metales por debajo de los ECA-3 según Decreto Supremo N°004-2017-MINAM. A continuación, se presenta la data histórica de los análisis químicos de las aguas residuales de la unidad minera Andaychagua.

Tabla 1. *Análisis químicos de muestras contaminadas de Andaychagua.*

Parámetro	LMP Promedio anual	EC A-3	Códigos de muestras individuales de Andaychagua Norte (AN)						Composición
			AN03	AN04	AN05	AN06	AN07	AN08	
pH	6 – 9	6,5-8,4	8,28	7,02	7,8	-	6,65	5,85	7,15
Conductividad	-	<2.000	961	1.040	1.030	-	1,160	1,150	1,14
TDS (mg/l)	-	-	-	-	-	-	-	-	834
TSS (mg/l)	25	-	10	16	14	-	70	10	4.500
Al(t) (mg/l)	-	5	0,131	0,161	0,0913	0,467	0,156	0,0729	123
Sb(t) (mg/l)	-	-	0,0134	0,159	0,125	0,676	0,111	0,122	0,191

As(t)	0,08	0,05	0,0289	0,105	0,058	1,56	0,117	0,208	1,58
(mg/l)					7				
Ba(t)	-	0,7	0,0439	0,049	0,045	0,078	0,053	0,037	8,78
(mg/l)				7	9	1	1	1	
Be(t)	-	0,1	<0,00	<0,00	<0,00	<0,00	<0,00	<0,00	0,0463
(mg/l)			25	25	25	25	25	25	
Bi(t)	-	-	<0,00	0,005	<0,00	0,034	0,003	<0,00	0,242
(mg/l)			25	5	25	1	7	25	
B(t)	-	0,5*	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	0,104
(mg/l)		6	0	0	0	0	0	0	
Cd(t)	0,04	0,00	0,0002	0,001	0,000	2,55	0,105	0,000	1,38
(mg/l)		5	8	26	75			41	
Ca(t)	-	200	128	142	142	203	186	263	2.760
(mg/l)									
CN(t)	0,8	-	<0,00	0,014	0,016	<0,00	<0,00	0,011	-
(mg/l)			5			5	5		
Co(t)	-	0,05	<0,00	0,001	0,001	0,007	0,000	0,002	0,59
(mg/l)			050	31	09	75	99	32	
Cu(t)	0,4	0,2	0,0043	0,351	0,156	8,76	0,737	0,019	43,8
(mg/l)			2						
Cr(t)	-	-	<0,00	<0,00	<0,00	0,007	0,003	<0,00	0,282
(mg/l)			25	25	25	5	8	25	
P(t) (mg/l)	-	-	<0,30	<0,30	<0,30	<0,30	<0,30	<0,30	42,4
Fe(t)	-	1	0,256	1,32	0,51	88,3	3,93	0,232	4,90
(mg/l)									
Li(t)	-	2,5	0,0311	0,032	0,032	0,03	0,030	0,028	0,104
(mg/l)				4	5		7	4	
Mg(t)	-	150	23	21,6	22,2	8,13	9,83	7,42	1.010
(mg/l)									
Mn(t)	-	0,2	0,553	0,712	0,653	1,99	0,326	1,05	6,41
(mg/l)									

Mo(t)	-	-	0,0016	0,008	0,008	0,012	0,005	0,018	0,176
(mg/l)			3	82	44	7	49	9	
Ni(t)	-	0,2	<0,00	0,009	0,009	0,011	<0,00	0,002	1,55
(mg/l)			25	7	5	9	25	7	
Ag(t)	-	0,05	0,0012	0,065	0,021	0,787	0,056	0,000	0,286
(mg/l)			9	3	2		6	823	
Pb(t)	0,16	0,05	0,254	6,22	2,12	17,1	1,84	0,008	48,8
(mg/l)								74	
K(t)	-	-	19,4	23,1	23,3	21,2	22,3	46,9	50,9
(mg/l)									
Se(t)	-	0,05	<0,00	<0,00	<0,00	<0,00	<0,00	<0,00	0,0281
(mg/l)			50	50	50	50	50	50	
Na(t)	-	200	19,8	21,7	22,5	21,4	20,6	28,3	27,7
(mg/l)									
Ti(t)	-		<0,01	<0,01	0,014	<0,01	<0,01	<0,01	0,166
(mg/l)			0	0		0	0	0	
Zn(t)	1,2	2	0,113	0,45	0,267	825	49	0,105	7,2
(mg/l)									
SO ₄ ⁼	-	1000	420	487	478	-	521	809	578
(mg/l)									

Además, la presencia de aguas crudas (sin el uso previo de floculantes) y los efluentes provenientes de la relavera Andaychagua representan un desafío adicional. Estos vertimientos que son 1.000 m³/mes, que provienen de las operaciones mineras y de actividades de tratamiento, se descargan en el río Andaychagua, lo que aumenta el riesgo de contaminación si no son tratados adecuadamente.

Para la identificación de los puntos de muestreo (Ver figura 1) se tomaron en cuenta las fuentes que generan los vertimientos al cuerpo receptor (Río Andaychagua), de los cuales las aguas de mina que luego de pasar por un sistema de

tratamiento de floculación-sedimentación dan lugar a un efluente que en un 30% se vierte al río Andaychagua y el resto se reutiliza como agua de proceso. Es así, que las muestras para el presente estudio corresponden a aguas vertidas en su estado anterior a cualquier proceso de tratamiento (aguas crudas), debido a que parte del trabajo consistió en verificar la pertinencia o no de los actuales sistemas de tratamiento instalados, se captó las diferentes muestras individuales sin la adición de floculante.

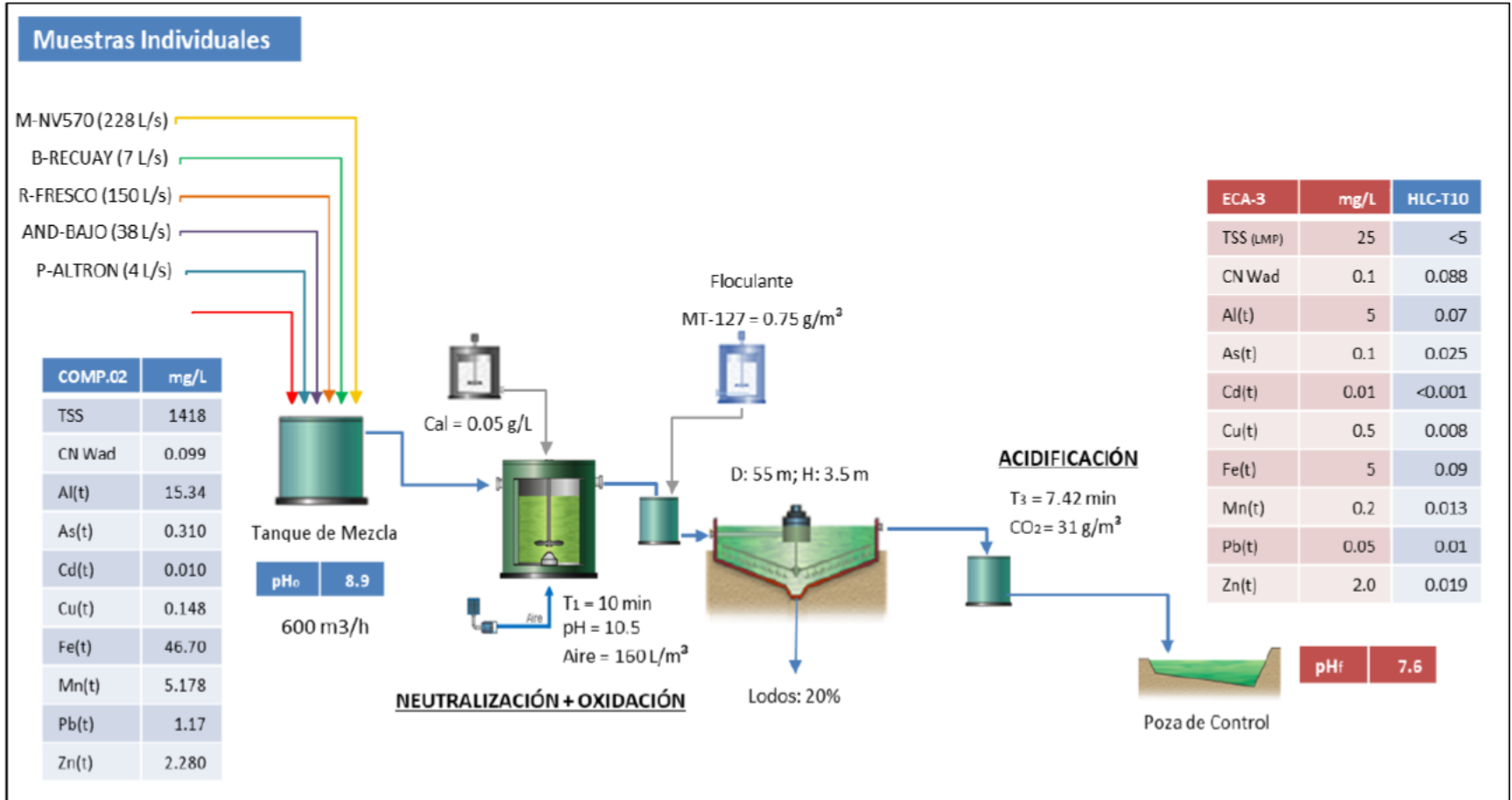
Se consideró el muestreo de puntos internos del proceso proveniente de la recuperación de aguas de las cochas de manganeso, zinc y plomo, que, junto con los relaves generados en la planta concentradora, alimentan la relavera Andaychagua, para ser sometido directamente a tratamiento de efluente para su posterior descarga. Finalmente se muestreó el efluente proveniente del rebose de la relavera que descarga directamente al cuerpo receptor (Río Andaychagua).

Figura 1: Ubicación de los componentes de la unidad minera Andaychagua.



Nota: La figura representa la ubicación geográfica del rio Andaychagua principal receptor de los efluentes.

Figura 2: Esquema de proceso - Andaychagua.



Referencia: Creación propia.

1.1.2. Determinación del problema

Durante el estudio para el tratamiento de aguas ácidas, fueron desarrolladas pruebas metalúrgicas de diseño experimental de neutralización más oxidación y pruebas de optimización, en las que se incluyeron las etapas de alcalinización con el uso de cal, oxidación con aire y clarificación con uso de floculante; orientadas a lograr un efluente final que cumpla con los LMP y estándares de calidad de agua ECA-3 (Mn), sujetos a la optimización del consumo de reactivos.

Luego del ensayo producto de la alcalinización a valores de pH mayores a 10 y 11 puede haber una remoción de los metales pesados, principalmente del manganeso estando por debajo de los ECA-3 (0,2 mg/l Mn).

Para bajar los contenidos de los metales en la PTAR de la unidad minera Andaychagua se deben tomar medidas, tanto preventivas (o pasivas) como activas hacia el río Andaychagua mediante la implantación de métodos de tratamiento de estos efluentes ácidos, como es el uso de un agente neutralizante como la cal y por ende optimizando el consumo de reactivo. (Ver tabla 2).

Tabla 2. *Resumen de consumo de reactivos de la PTAR - Andaychagua.*

Reactivo	Ratio	C. masa	Anual
	Kg/m ³	(ton/mes)	(ton/año)
Cal (69%CaO)	0,1606	160,6	1.927,2
Floculante	7,00	0,007	0,084

1.2. Delimitación de la investigación

1.2.1. Delimitación teórica

Las delimitaciones teóricas para esta investigación son el consumo de cal para llegar a pH deseado y poder precipitar el manganeso y metales contaminantes de los

efluentes líquidos.

Los temas por tratar son:

- Precipitación del manganeso y metales mediante agente neutralizador como la cal.
- Clarificación - sedimentación de manganeso y metales base.
- Optimización del consumo de reactivos.
- Diseños factoriales en alcalinización y clarificación.

1.2.2. Delimitación espacial

En esta investigación la delimitación espacial es:

- País: Perú
- Región: Junín
- Provincia: Yauli
- Distrito: Huay-Huay
- Altitud: 4.477 m.s.n.m.

El desarrollo de las pruebas metalúrgicas fue realizado en las instalaciones del laboratorio de CERTIMIN ubicado en San Juan de Miraflores – Lima.

1.2.3. Delimitación temporal

La delimitación temporal de esta investigación se limitó en la ejecución de diez meses (enero a octubre del 2024).

1.3. Formulación del problema

1.3.1. Problema general

¿Cómo optimizar el consumo de cal en el proceso de precipitación del manganeso en la planta de tratamiento de aguas residuales industriales de la unidad

minera Andaychagua para mejorar la eficiencia en el proceso y poder descargar los efluentes líquidos de actividades minero-metalúrgicas?

1.3.2. Problemas específicos

- ¿Cómo influye el nivel de pH en la precipitación del manganeso en la planta de tratamiento de aguas residuales?
- ¿De qué manera influye el consumo de cal en la precipitación del manganeso en la planta de tratamiento de aguas residuales de la unidad minera Andaychagua?
- ¿Cómo influye el tiempo de alcalinización y la sedimentación en la precipitación del manganeso en la planta de tratamiento de aguas residuales de la unidad minera Andaychagua?

1.4. Formulación de objetivos

1.4.1. Objetivo general

Optimizar el consumo de cal en el proceso de precipitación de manganeso en la planta de tratamiento de aguas residuales industriales de la unidad minera Andaychagua para mejorar la eficiencia del proceso y poder descargar los efluentes líquidos de actividades minero-metalúrgicas.

1.4.2. Objetivos específicos

- Determinar nivel de pH adecuado para la precipitación del manganeso en la planta de tratamiento de agua residual industrial de la unidad minera Andaychagua.
- Identificar la influencia del consumo de cal para la precipitación del manganeso en la planta de tratamiento de agua residual industrial de la

unidad minera Andaychagua.

- Determinar la influencia del tiempo agitación para la alcalinización y sedimentación correcta para la precipitación del manganeso en la planta de tratamiento de agua residual industrial de la unidad minera Andaychagua - Yauli – Junín – 2024.

1.5. Justificación de la investigación

El consumo excesivo de cal en el proceso de tratamiento de aguas residuales implica la formación de lodos en exceso, alteración de pH del agua tratada, problemas de incrustaciones y obstrucciones en las tuberías, equipos y tanques de la PTAR e impacto ambiental. Al optimizar la dosificación de cal, es posible reducir estos impactos sin afectar la eficacia del proceso de remoción de manganeso.

El uso ineficiente de cal no solo perjudica la operatividad de la PTAR, sino que también puede tener efectos negativos en el medio ambiente. La sobredosificación de este producto puede generar residuos innecesarios y alterar las condiciones del agua tratada. Al optimizar el consumo, se minimizarán los impactos ambientales, alineándose con prácticas sostenibles y responsables en la industria minera.

La optimización del consumo de cal implica un análisis detallado del proceso de precipitación de manganeso, permitiendo identificar oportunidades para mejorar la eficiencia operativa. Esto se traduce en un mejor uso de los recursos, una mayor efectividad en el tratamiento y la posibilidad de implementar ajustes estratégicos en la dosificación, con el objetivo de garantizar la calidad del agua tratada.

Es esencial tener en cuenta que, en el marco de esta investigación, se sigue la

normativa del Decreto Supremo N°004-2017-MINAM del ECA (Estándar de Calidad del Agua), que establece estándares de calidad de agua. En particular, se destaca la relación de 0,2 mg/l de Mn para el agua destinada a riego y consumo animal.

1.6. Limitaciones de la investigación

- La posibilidad de realizar pruebas experimentales y ajustes en el consumo de cal podría estar limitada por las condiciones de operación y las prácticas actuales de la planta. Por ejemplo, la intervención para ajustar la dosificación debe realizarse sin afectar la calidad del tratamiento, lo que puede restringir la capacidad de realizar cambios significativos en el proceso.
- Disponibilidad de recursos informativos actualizados que nos sirva de base para ampliar la investigación y tener mejores resultados.
- El acceso a información técnica y operacional específica de la planta podría ser limitado debido a restricciones o confidencialidad en los procedimientos.

CAPITULO II

MARCO TEÓRICO

2.1. Antecedentes de estudio

2.1.1. Antecedentes internacionales

Para Osvaldo Aduvire (2020) en su tesis cuyo título es DRENAJE ACIDO DE MINA GENERACIÓN Y TRATAMIENTO, manifiesta que la cantidad y calidad del drenaje ácido depende de las características fisicoquímicas de los materiales que entran en contacto con los flujos de agua. La movilización de los metales pesados y la clase de productos generados en las reacciones están controladas principalmente por la geoquímica de los residuos y el agua intersticial. Cuando baja el pH la cantidad de metales disueltos suele aumentar. Sin embargo, en determinadas condiciones químicas los metales también pueden moverse en pH neutros o alcalinos. Por tanto, durante la neutralización de efluentes con pH bajos se produce la precipitación de muchos de los metales solubles, pero el drenaje resultante sigue conteniendo metales residuales y productos de reacciones secundarias.

Entonces se llega a la conclusión de que el estado de las aguas ácidas puede cambiar con el tiempo, sobre todo si la capacidad de neutralización del medio se agota. Si se activa la formación de aguas ácidas conviene tomar ciertas medidas preventivas y de control para que los efluentes contaminantes que se generen estén por debajo de los niveles que pueda asimilar el medio natural, sin que se produzcan impactos significativos.

En esta investigación se estudió la remoción del anión sulfato en presencia de Cu (II) y Zn (II) desde soluciones acuosas que simulan un agua ácida residual de mina, empleando mezclas de cal, policloruro de aluminio y silicatos de calcio nano-estructurados. Los experimentos se realizaron en una celda de flotación de aire disuelto (DAF) se logró una buena remoción de sulfato, utilizando diferentes dosificaciones de cal y PAC, alcanzándose concentraciones finales de este anión en las soluciones refinadas, muy por debajo de la norma ambiental vigente y en un tiempo relativamente corto. El mecanismo de remoción de este anión está basado en la formación de etringita. Los resultados confirmaron también que la adición de sólo cal no remueve ion sulfato en un grado suficiente. Se preparó un silicato de calcio nano-estructurados mediante la reacción de una solución de silicato de sodio y Ca(OH)_2 , manteniendo una intensa agitación durante el proceso. Análisis indican que el sólido obtenido es de estructura más bien amorfa, con nano-capas de placas tetraédricas de silicatos de calcio de espesor variable entre 10-20 nm y diámetros entre 80 y 100 nm, presentando una superficie BET variable entre 200 y 300 m^2/g . Los resultados experimentales indicaron que los silicatos de calcio nanoestructurados por si solos, no poseen suficiente capacidad adsorbtiva para remover sulfatos. Sin

embargo, su uso en conjunto con PAC genera precipitados más granulares y fáciles de separar mediante decantación o filtración convencional. Su empleo aseguró una excelente adsorción sobre ellos de los contenidos de Cu (II) y Zn (II), no siendo afectada ésta por la presencia de ion SO_4^{2-} . La adición de silicatos de calcio nanoestructurados permitió reducir la dosificación de cal, obteniéndose un medio básico estable, dado el efecto buffer que generarían los nano-silicatos agregados. Los resultados experimentales de la remoción de sulfato con cal y PAC, se explicó mediante un modelo fisicoquímico basado en las reacciones químicas del proceso y el cual corresponde a un sistema de ecuaciones diferenciales ordinario, que se resolvió eficazmente utilizando el método numérico de Runge-Kutta de cuarto orden.

Según Sandra Katerine Arismendy (2020) en su tesis con nombre PROBLEMÁTICA AMBIENTAL GENERADA POR EL DRENAJE ACIDO DE MINA EN LA EXPLOTACIÓN DE YACIMIENTOS MINEROS EN COLOMBIA, el drenaje ácido de mina es una problemática ambiental que genera una gran preocupación con respecto al impacto adverso de los contaminantes presentes en este tipo de drenaje, en la vida acuática del medio receptor y en la afectación a la calidad de las aguas superficiales y subterráneas, y en como las comunidades expuestas se puedan ver perjudicadas. El drenaje ácido de mina (DAM) se produce a partir de la oxidación de sulfuros metálicos, especialmente los de hierro, (generalmente pirita), en presencia de oxígeno, agua y actividad bacteriana. Este trabajo está enfocado en analizar los impactos ambientales que son provocados por la producción de DAM en cualquier tipo de explotación de yacimientos mineros y descubrir esos procesos y esas fuentes que contribuyen a la generación de DAM. Los resultados obtenidos a

través de la documentación indican que las variables más relevantes en cuanto a la caracterización de las aguas de mina son el pH, los sulfatos y los metales disueltos o totales.

En conclusión, los drenajes de aguas ácidas de minas y los metales asociados a ellas son un problema ambiental y ecológico de primera magnitud, por lo que existe la necesidad de aplicar tecnologías eficaces y de bajo costo de operación y mantenimiento donde se ha encontrado mayores resultados en la aplicación de tratamientos pasivos en comparación al tratamiento convencional. Cada yacimiento minero es un caso particular y sus características son únicas, por lo que para cada uno debe idearse una técnica de disposición final de residuos y un plan de cierre que se adecue a las condiciones especiales de cada proyecto minero. Además, es necesario que una vez realizadas dichas tareas, se implemente un sistema de monitoreo constante y permanente para controlar el sitio y efectuar acciones en caso de que no sean eficientes.

2.1.2. Antecedentes nacionales

Según De la Cruz L, (2019) en su investigación de tesis con título EFECTO DE LA DOSIFICACIÓN DE LECHADA DE CAL EN LA REMOCIÓN DEL MANGANESO DEL AGUA DE MINA DE LA UNIDAD MINERA HUARÓN-2018, en su resumen manifiesta que se ensayó la dosificación de cal para remoción del manganeso, la determinación de la concentración y el pH que se encuentra en el agua de mina. Con los métodos: método científico, inductivo-analítico, de tipo aplicada y nivel explicativo, de diseño preexperimental de grupo único con pretest y posttest. Los resultados en el método usado fueron óptimos, puesto que se logró la

remoción de Mn, dando como resultados de la concentración del manganeso en el agua de mina sin tratar de 19,4748 mg/l y en el efluente tratado fue 0,0833 mg/l. En conclusión: la dosificación de lechada de cal tiene efectos positivos en la remoción del manganeso del agua de mina de la unidad minera Huarón 2018, logrando remover un 99,57% de Manganeso, considerado un pH de 10,5 y dosis de lechada de cal de 3,2 ml.

Para Jiménez H (2017) en su tesis titulada EFICIENCIA EN LA REMOCIÓN DEL TRATAMIENTO DE AGUAS ÁCIDAS DE MINA, MEDIANTE NEUTRALIZACIÓN ACTIVO CON LECHADA DE CAL DE LA UNIDAD MINERA ARASI – PUNO, en el resumen argumenta que el propósito fundamental fue la eficacia en la remoción del tratamiento de aguas ácidas de mina, mediante neutralización con lechada de cal. El método para esta investigación se realizó en cuatro períodos: primero se realizó la medición de caudal y la caracterización del agua ácida, la segunda etapa se realizó los ensayos de laboratorio con la neutralización con lechada de cal, en tercer lugar, la adecuación del tratamiento con lechada y por último la cuarta etapa es el análisis de los parámetros fisicoquímicos e inorgánicos a nivel de campo. Llegando a la conclusión de que los resultados del método utilizado fueron en la remoción de metales pesados en el efluente a nivel campo a un pH de 8,1 arroja resultados de remoción de 99,96%. En conclusión, al neutralizar el drenaje ácido con lechada de cal existe una eficacia de remoción considerable de los parámetros físico químico e inorgánico.

Según (Castillo Ungaro et al., 2022) en la REVISTA DE INVESTIGACIONES ALTOANDINAS EN SU ARTICULO DENOMINADO

USO DE HIPOCLORITO DE SODIO PARA DISMINUIR LA CONCENTRACIÓN DE Mn^{2+} EN AGUAS ÁCIDAS DE MINA PARA EL MEJORAMIENTO DE LA CALIDAD DEL AGUA DEL RÍO YAULI, JUNÍN, PERÚ, detalla que en el mundo gran parte de las fuentes de abastecimiento de agua subterránea y superficial se ve afectada por la presencia de manganeso (Mn^{2+}), uno de los mayores contaminantes que impacta al medio ambiente, el manganeso disuelto en las aguas ácidas produce efectos nocivos ya que genera daños irreparables en los sistemas acuáticos, inhibe el crecimiento de las comunidades vegetales, afecta a la calidad de las aguas superficiales, subterráneas y acuíferos poco profundos. Las labores mineras subterráneas generan aguas ácidas, cuyo pH está entre 2 y 6; pero las compañías mineras no presentan metodologías para su control; por ello el objetivo de la investigación fue proponer el uso de hipoclorito de sodio ($NaClO$) como un agente oxidante que permite la precipitación y separación del manganeso. El agua ácida estudiada tenía pH entre 3,5 a 5,5 y una concentración de Mn^{2+} hasta 250 mg/l. Para cumplir con la normativa vigente se requirió reducir la concentración por debajo de 0,2 mg/l (ECA-2017), los cuales se realizaron pruebas a diferentes pH, concentraciones (%) y consumos de hipoclorito de sodio (mg/l).

En conclusión, el proceso y método utilizado han determinado la eficacia del agente oxidante hipoclorito de sodio. De ello resulta que la concentración y cantidad óptima añadida es de 0,05% y 1,0 mg/l y un pH óptimo en el rango 8,5 a 8,8. Para la remoción química del ion Mn^{2+} y para cumplir con el ECA-2017 es conveniente tratar la mezcla de agua ácida de mina y relave fino con un agente oxidante, el hipoclorito de sodio a pH mayor a 8,5 hasta pH 8,8, con aireación del ambiente y

agitación mecánica de 20 a 30 minutos. La concentración de cal $>70\%$ de CaO y 1.100 g/l de concentración está en el orden de 0,84 g/l de solución neutralizada, dependiendo del pH del agua de mina, que en el presente caso está en el rango de 3,5 – 5,5. Es importante que la cal sea adecuadamente tamizada para minimizar la presencia de granos grandes que limiten la reacción. El hipoclorito de sodio ha demostrado ser una alternativa de bajo costo y alta disponibilidad, eficaz para la remoción del ion Mn^{2+} , y que contribuye a la conservación del ambiente.

En el Perú existe gran número de compañías mineras que tratan las aguas ácidas en plantas de neutralización, como son los casos de Santa Luisa en Ancash, Paragsha en Pasco, Chinalco en Junín, Quiruvilca en la Libertad, Victoria Compañía Minera Volcán en Junín, preocupadas por la conservación del ambiente. Todas ellas reducen la concentración de los metales pesados disueltos (Cu, Pb, Fe, Zn), pero no reducen la concentración del ion manganeso (Loroña-Calderón & Gómez-Lora, 2017). La norma aprobada por D.S. N° 004-2017-MINAM (MINAM, 2017) entró en vigor a finales del año 2021, por tal razón las compañías mineras vienen realizando pruebas experimentales para reducir el manganeso presente en las aguas ácidas, cumplir con la normativa legal y garantizar la conservación de los ecosistemas de agua dulce.

Según (Loroña-Calderón & Gómez-Lora, 2017) en el artículo titulado PROPUESTA DE TRATAMIENTO PARA LA ELIMINACIÓN DEL MANGANESO EN LA PLANTA DE NEUTRALIZACIÓN DE AGUAS ÁCIDAS, VICTORIA-COMPAÑÍA MINERA VOLCAN S. A. A, PERÚ. El manganeso es un contaminante común presente en el agua de mina difícil de eliminar debido a su alta

solubilidad en un amplio rango de pH. En los últimos años, su eliminación representa un desafío importante para la industria minera (Cruz, Lima, Teixeira, Leao, & Silva, 2010); (M.Bamforth, A.C.Manning, Singleton, L.Younger, & L. Jhonson, 2006) (M. Silva, C. Cunha, D. R. Silva, & A. Leao, 2012) (HE, Yang, & HE, 2010). El presente estudio consistió en proponer un tratamiento para la eliminación del manganeso en la planta de neutralización de aguas ácidas de la Compañía Minera Volcan S.A.A. En ese estudio se evaluaron dos alternativas para el tratamiento: la oxidación mediante aireación y el intercambio iónico. De ambas, se optó por la oxidación por aireación, ya que es el método más utilizado en las plantas que tratan drenajes ácidos de mina, debido a su eficiencia en la eliminación del manganeso y su bajo costo operativo y de mantenimiento. Se determinó que la aireación superficial era la opción más adecuada, al ofrecer una mejor eficiencia en la transferencia de oxígeno con un consumo energético reducido, aunque su rendimiento en transferencia de oxígeno es un 21% inferior. En cuanto a los costos, el sistema de aireación superficial con turbina fue más económico, con un valor de 20.990 euros frente a los 37.455,27 euros de los sistemas con difusores, los cuales, además, presentan el inconveniente de obstruirse fácilmente cuando se utilizan en aguas con alta concentración de cal, debido a la formación de carbonato en los orificios.

2.1.3. Antecedentes locales

Según Tucto A, (2019) en su investigación de tesis denominada OPTIMIZACIÓN DEL CONSUMO DEL FLOCULANTE PARA EL TRATAMIENTO DEL ALUMINIO Y MANGANESO DEL AGUA DE MINA UNIDAD MINERA ORCOPAMPA – BUENAVENTURA – AREQUIPA, el

proceso de tratamiento de aguas de mina , cada vez son de gran interés, importancia y preocupación para la sociedad de cómo solucionar y poder reutilizar el recurso hídrico que sufre alteraciones a consecuencia de las actividades antropogénicas y naturales desde fuentes puntuales y no puntuales; en el cual, el parámetro físico-químico de sólidos totales en suspensión (SST) y turbiedad (NTU's) son primordial en su tratamiento, ya que en estos componentes se encuentra la materia orgánica e inorgánica; por otro lado, el consumo de agua es mayor cada día y de gran envergadura frente a la necesidad de su consumo del hombre y de otros seres vivos. En tanto, el tratamiento de aguas residuales es de prioridad y de vital importancia para la sociedad.

Llega a la conclusión que para disminuir la turbidez de las aguas ácidas de la unidad minera Orcopampa, se ha utilizado la lechada cal al 10% agitadas a una revolución de 100 rpm, coagulante el cloruro férrico a 0,05 ml/l y floculante el Magnafloc 1001 a una dosificación de 0,5 ppm a una agitación de revolución de 50 rpm para no romper los flóculos. La turbidez de la muestra inicial fue 250 NTU y la turbidez final para 5 minutos de sedimentación fue 0,45 NTU.

Según Pardave (2020) en su investigación de tesis con nombre EVALUACIÓN DE LA CALIDAD FÍSICA Y QUÍMICA DE AGUAS QUE INFLUYEN DE LAS ACTIVIDADES DE LA UNIDAD MINERA CERRO S.A.C UBICADA EN LOS DISTRITOS DE SIMÓN BOLÍVAR Y YANACANCHA, PROVINCIA DE PASCO 2020, llega a la conclusión de que la calidad del agua en los sistemas naturales y en particular en las aguas superficiales influye en el estado de los ecosistemas, la salud humana, así como en los diferentes posibles usos del

recurso hídrico. La presente investigación pretende determinar las variaciones de la calidad fisicoquímica del agua. Cerro de Pasco como fuente principal intervenida por proyectos mineros que se desarrolla actualmente, por tal motivo se hace necesario analizar los afluentes que hacen parte de los cuerpos hídricos de la zona minera y que por ende también se ven amenazadas en su calidad y disponibilidad. De ese modo, se realizaron monitoreos que nos permiten conocer el efecto de la explotación en los cuerpos hídricos. Posteriormente se analizaron los resultados obtenidos, los cuales se identificó los niveles de concentraciones de algunos metales pesados en el agua como, producto de la formación del proceso conocido como drenaje de los componentes mineros. Partiendo de estos análisis se propusieron las medidas de manejo ambiental con el fin de garantizar la calidad, disponibilidad y la salud de las personas.

2.2. Bases teóricas-científicas

2.2.1. Drenaje de agua ácida de mina

En muchas minas, el agua que se encuentra en contacto con minerales expuestos puede volverse ácida, lo que puede ser perjudicial para el medio ambiente y la infraestructura. El drenaje de aguas ácidas implica el tratamiento de estas aguas para neutralizar la acidez mediante álcalis y prevenir la contaminación.

2.2.2. Mecanismos de formación de aguas ácidas

La formación de aguas ácidas tiene lugar a partir de la oxidación química de los sulfuros, acelerada en muchos casos por la acción bacteriana. Los principales elementos que intervienen son: los sulfuros reactivos, el oxígeno y el agua (vapor o líquida), y como elemento catalizador las bacterias. La velocidad de reacción es una

variable muy importante, pues si el proceso ocurre muy lentamente el efecto sobre el medio puede ser despreciable. Sin embargo, si la generación de aguas ácidas es rápida el problema se agrava, ya que se producirá la contaminación del entorno. Aunque la velocidad de reacción depende de numerosos factores como temperatura, cantidad de sulfuros, granulometría, presencia de agua, aire y bacterias. Ciertas especies mineralógicas son más reactivas que otras; por ejemplo, la marcasita, que tiene la misma fórmula química que la pirita, es muy inestable y puede generar rápidamente aguas ácidas. Los sulfuros de otros metales (plomo, zinc o cobre) son generalmente menos reactivos que los de hierro. En parte, debido a la mayor estabilidad de su estructura cristalina y también porque forman minerales menos solubles que recubren la superficie de los propios sulfuros impidiendo que progrese su oxidación.

2.2.3. El manganeso

El manganeso se encuentra normalmente en el aire, el suelo, el agua y los alimentos. Se pueden encontrar cantidades más altas de manganeso como consecuencia de la liberación durante la manufactura, uso o disposición de productos a base de manganeso. Tal como sucede con otros elementos, el manganeso no puede ser degradado en el ambiente. Solamente puede cambiar de forma o adherirse o desligarse de partículas. La forma química del manganeso y el tipo de suelo determinan la velocidad con que se mueve y la cantidad que permanece en el suelo. En el agua, la mayor parte del manganeso tiende a adherirse a partículas de esta o a depositarse como sedimento. El agente que contiene manganeso que se agrega a la gasolina puede degradarse rápidamente en el ambiente cuando se expone a la luz

natural, liberando así manganeso.

2.2.4. Remoción de manganeso en aguas residuales

La remoción de manganeso en aguas residuales es un proceso crucial para mitigar los efectos adversos del manganeso en el medio ambiente y en la salud pública. A continuación, se presenta un resumen sobre los métodos comunes utilizados para eliminar el manganeso de las aguas residuales:

- **Precipitación química:** En este proceso, se agregan productos químicos como el permanganato de potasio, el hipoclorito de calcio o el dióxido de cloro al agua contaminada con manganeso. Estos productos químicos reaccionan con el manganeso disuelto, formando precipitados que pueden eliminarse mediante filtración u otros métodos de separación sólido-líquido.
- **Oxidación:** El manganeso generalmente se encuentra en forma de manganeso soluble divalente (Mn^{2+}) en el agua. La oxidación convierte el manganeso en su forma insoluble de manganeso tetravalente (MnO_2), que puede eliminarse fácilmente mediante filtración o sedimentación.
- **Filtración:** Los sistemas de filtración, como los filtros de arena verde o los medios de filtración de óxido de manganeso, pueden ser efectivos para eliminar el manganeso precipitado y otros sólidos suspendidos del agua residual.
- **Intercambio iónico:** Los procesos de intercambio iónico utilizan resinas de intercambio iónico para adsorber iones de manganeso presentes en el agua residual. Estas resinas se pueden regenerar periódicamente para su reutilización.
- **Óxido-reducción biológica:** Algunas bacterias son capaces de oxidar el manganeso soluble y convertirlo en manganeso insoluble, que puede eliminarse

por sedimentación o filtración. Este proceso, conocido como oxidación microbiana del manganeso, se puede utilizar en sistemas de tratamiento biológico de aguas residuales.

- Tratamientos avanzados: Técnicas como la electrocoagulación, la ozonización y la fotocátalisis también pueden emplearse para la remoción de manganeso en aguas residuales, ofreciendo niveles de eficiencia y rendimiento superiores en comparación con métodos convencionales.

Es importante seleccionar el método de remoción de manganeso más adecuado según las características específicas del agua residual y las regulaciones ambientales locales. Además, se deben considerar los costos operativos y de mantenimiento asociados con cada técnica de tratamiento.

2.2.5. Técnicas de remoción de manganeso

Entre las técnicas de remoción del manganeso se encuentra la precipitación química, coagulación / floculación, flotación, intercambio iónico, oxidación / filtración, los cuales las ventajas y desventajas se presenta en la tabla 3 y el diagrama de Pourbaix para el sistema Mn - H₂O en la figura 2.

Tabla 3. Técnicas para la remoción de Mn^{2+} en aguas residuales.

Tipo de tratamiento	Ventajas	Desventajas
Precipitación química	• Método ampliamente usado. • Bajo costo de inversión. • Operación simple.	• Costo operacional extra para la disposición final de lodos. • Requiere de un pH alto.
Coagulación / floculación	• Mejora la estabilidad y el asentamiento de lodos.	• Costo operacional extra para la disposición final de lodos.
Flotación	• Bajo costo de operación. • Bajos periodos de retención.	• Alto costo de mantenimiento
Intercambio iónico	• Puede ser usado para sistemas diluidos. • Bajo tiempo de operación. • Bajo costo de operación. • Alta eficiencia energética.	• Solo usado para pequeñas trazas de Mn debido a su obstrucción. • La regeneración de las resinas causa una contaminación secundaria. • No se puede usar a gran escala.
Oxidación / filtración	La mayoría de los sistemas de tratamiento de Fe y Mn emplean este método. • Método de bajo costo.	El agente oxidante es difícil de almacenar y transportar. • Degradación de las partes del sistema debido a la corrosión.

2.2.6. Métodos para remoción de metales pesados más usados:

a) **Método de alcalinización:** Neutralización química, es la adición de sustancias alcalinas para neutralizar la acidez del agua, así como la acidez generada por la hidrólisis y precipitación de metales disueltos por el incremento del pH este proceso podría ser como la etapa de

pretratamiento o acondicionamiento previo a un proceso de precipitación.

Para poder aplicar el método de neutralización en un flujo residual, va a depender de 3 factores:

- El pH exigido,
- El DBO (demanda bioquímica de oxígeno),
- La acidez o alcalinidad del flujo a tratar.

En la tabla 4 se presenta los reactivos más usados en el método de neutralización, que se usa para volver al efluente a pH neutro y poder formar lodos producto de la sedimentación. (De la Cruz Lima, 2019).

Tabla 4. *Reactivos más usados en etapas de alcalinización.*

Nombre Común	Nombre Químico	Fórmula	Neutralización – eficiencia (%)
Caliza	Carbonato de Calcio	$CaCO_3$	30
Cal Hidratada	Hidróxido de Calcio	$Ca(OH)_2$	90
Cal viva	Óxido de Calcio	CaO	90
Ceniza de Soda	Carbonato de Sodio	Na_2CO_3	60
Soda Cáustica	Hidróxido de sodio	$NaOH$	100
Amoniaco	Anhídrido de amoniaco	NH_3	100

b) Método por precipitación química: Precipitación química, es la formación de compuestos insolubles por la adición de reactivos alcalinos. La principal aplicación de este proceso químico se centra en la eliminación de metales pesados (As, Cd, Cr, Pb, Hg, Zn, Mn y entre otros) mediante la formación de hidróxidos y que luego es separado por un

sistema de decantación o sedimentación.

Este proceso tiene tres etapas:

- **Ajuste del pH:** el pH óptimo para la precipitación de los metales pesados es variable que está dentro del rango 9,5 y 12,0 obteniendo resultados buenos de eliminación o reducción de la concentración de los metales pesados.
- **Adición de un agente precipitante:** siendo los más utilizados los hidróxidos, carbonatos y sulfuros, que son más eficaces para la precipitación de metales pesados los carbonatos y sulfuros.
- **Agentes de precipitación para eliminación de iones metálicos pesados floculación:** adición de un reactivo para que los elementos precipitados se unan en forma de flóculos voluminosos y favorezcan en la decantación o sedimentación. Se puede utilizar sales de hierro o aluminio.

La precipitación química con lechada de cal es uno de los medios más efectivos para el tratamiento de efluentes con altas concentraciones de metales. Después de ajustar el pH a condiciones alcalinas o básicas, los iones metálicos disueltos se convierten en compuestos insolubles por reacción químicas con un agente precipitante. Una de las desventajas de este método es el incremento de sólidos disueltos en el efluente y la generación de volúmenes de lodo, que puede contener compuestos tóxicos y ser difícil en su tratamiento y evacuación.

c) **Método coagulación – floculación:** El proceso de coagulación es la

adición de un coagulante que neutraliza las fuerzas que mantienen separados a los coloides, desestabilizándolos, y esto hace que incremente el tamaño de las partículas para que, en seguida, por la floculación de los compuestos inestables, se unan formando flóculos.

- d) Por oxidación química:** Proceso químico por el cual, mediante una reacción entre reactivos y contaminantes, se produce una transferencia electrónica, que origina cambios en el comportamiento químicos de ambos. Los agentes oxidantes mayormente usados para tratar aguas residuales de origen industrial son: cloro, dióxido de cloro, hipoclorito sódico, permanganato potásico, oxígeno y ozono.
- e) Osmosis inversa:** Proceso para separar por difusión controlada a través de membranas, reteniendo partículas hasta 0,0001 mm tamaño, por ello, por su amplia capacidad de retención es uno de los métodos más usados para el tratamiento de aguas potables para consumo humano. (De la Cruz Lima, 2019).
- f) Toxicidad de manganeso (ser humana, animales y plantas):** Los niveles altos de manganeso afectan al comportamiento y causa efectos al sistema nervioso como movimientos lentos y fallas de coordinación. La combinación de estos se conoce como la enfermedad del “manganismo”. Así mismo, en pruebas de laboratorio con animales se ha demostrado que el manganeso puede causar desarrollo de tumores en animales y en las plantas si las concentraciones son altamente tóxicas en el suelo puede causar inflamación de la pared celular, abrasamiento de hojas y puntos

marrones en las hojas de las plantas. (De la Cruz Lima, 2019).

- g) Concepto pH:** Para referirnos al concepto pH primero se realizará un recuento de los conceptos ácido y base que se usaron como referentes teóricos para su conceptualización:
- h)** Los productos que ahora se consideran como ácidos y como bases se conocen desde la antigüedad como así lo ponen de manifiesto algunas recetas prácticas encontradas en papiros de la cultura helenística (en Estocolmo y en Leiden) (Jiménez y De Manuel, 2002). El acercamiento a estas sustancias en primera instancia se hizo mediante las percepciones del sentido del gusto, de esta manera se identificaron y categorizaron las sustancias según la sensación que se daba al estimular las células receptoras del gusto. A pesar de que no se hacía ninguna interpretación de lo que ocurría en los procesos que se describen, en estas recetas sí se utilizaban el vinagre y los zumos de frutas como disolventes de ciertos metales.(Almeciga Adriana, 2013).
- i) Ion hidrógeno como unidad de medida:** Friedenthal recomendó el uso de la concentración del ion hidrógeno para caracterizar soluciones como ácidas, básicas o neutras según la concentración de H^+ igual, superior o inferior a 10^{-7} . Por tanto, propuso que la reacción de un líquido sea referida siempre a la cantidad de iones $[H^+]$ que contenga, aunque se trate de soluciones alcalinas(Almeciga Adriana, 2013).
- j) Escala de pH:** A partir del concepto de pH como el logaritmo negativo de la actividad del ion Hidrógeno se establece una escala con valores de

0 a 14, según el valor de la constante de disociación del agua $1 \times 10^{-14} = [H^+] [OH^-]$. Un pH de 7 corresponde a la neutralidad, la acidez a un pH menor de 7 (mayor actividad del H^+) y la alcalinidad a un pH mayor de 7 (menor actividad del H^+). (Almeciga Adriana, 2013).

2.2.7. Diseños experimentales

Un diseño experimental es un esquema de cómo realizar un experimento, a partir de pruebas metalúrgicas de laboratorio. El objetivo fundamental de los diseños experimentales radica en el determinar si existe una diferencia significativa entre los diferentes tratamientos del experimento y en caso de que la respuesta es afirmativa, cuál sería la magnitud de esta diferencia. Una segunda meta de los diseños experimentales es verificar la existencia de una tendencia derivado del análisis de los datos del experimento. La diferencia principal entre los diseños experimentales radica en la forma en que se agrupan o clasifican las unidades experimentales. En todos los diseños las unidades experimentales se clasifican por tratamientos; pero en algunos, estos se clasifican preferentemente en bloques, filas, parcelas principales y otras modalidades. El análisis de varianza utiliza las medias de dichos agrupamientos, denominadas fuente de variación, para estimar varianzas o más precisamente cuadrados medios. Un cuadrado medio que estima la dispersión entre mediciones de parcelas debidas a causas aleatorias; esta se denomina error experimental. En ausencia de diferencias reales debidas a medias de los tratamientos, bloques u otras fuentes de variación, dichos cuadrados medios serán, en promedio, iguales. (Badii, et al., 2017).

2.2.8. Optimización mediante diseños experimentales

La optimización mediante diseños experimentales es un enfoque sistemático para mejorar procesos, productos o sistemas a través de la realización de experimentos planificados de manera estratégica. En el contexto del tratamiento de aguas residuales o la gestión ambiental, este enfoque puede ser invaluable para encontrar la combinación óptima de variables o condiciones que maximicen la eficiencia del proceso o minimicen el impacto ambiental. Aquí hay una explicación más detallada:

- a) Planificación de Experimentos:** Se diseñan experimentos específicos en los que se manipulan deliberadamente las variables de interés para recopilar datos relevantes. Estos experimentos se diseñan cuidadosamente para obtener la máxima información con el menor número de ensayos posible.
- b) Variables de Interés:** En el tratamiento de aguas residuales, las variables de interés pueden incluir la concentración y tipo de productos químicos utilizados, el tiempo de reacción, el tamaño de los equipos de tratamiento, la temperatura, el pH, entre otros.
- c) Diseños Experimentales:** Se utilizan diferentes tipos de diseños experimentales, como los diseños factoriales, los diseños de superficie de respuesta, los diseños de mezcla y otros, para evaluar el efecto de múltiples variables en el resultado deseado.
- d) Recopilación y Análisis de Datos:** Se recopilan datos cuidadosamente de los experimentos realizados y se analizan estadísticamente para identificar tendencias, relaciones y efectos significativos de las variables estudiadas.

- e) Optimización: Se utilizan técnicas de optimización para determinar la combinación óptima de variables que maximice el rendimiento del proceso o minimice el impacto ambiental. Esto puede implicar el uso de algoritmos de búsqueda, métodos de superficie de respuesta, entre otros.
- f) Validación: Una vez que se identifica una combinación óptima de variables, se valida experimentalmente para confirmar su eficacia y aplicabilidad en condiciones reales.

2.3. Definición de términos básicos

- **Cal**

La cal es un producto empleado en el tratamiento de aguas residuales para precipitar impurezas o como neutralizador de ácidos de efluentes líquidos y gaseosos de la industria. Independientemente del uso de la cal, su proceso de fabricación es común. Se obtiene por la calcinación de la piedra caliza a altas temperaturas (unos 900 °C) en hornos de diferente concepción y explotación, según sea la aplicación que se vaya a dar al material cocido. (MITECO, 2018).

- **Sedimentación**

La sedimentación es, en esencia, un fenómeno netamente físico y constituye uno de los procesos utilizados en el tratamiento del agua para conseguir su clarificación. Está relacionada exclusivamente con las propiedades de caída de las partículas en el agua. Cuando se produce sedimentación de una suspensión de partículas, el resultado final será siempre un fluido clarificado y una suspensión más concentrada.(Maldonado, 2015).

- **Neutralización**

La neutralización es el proceso de ajuste de pH del agua por medio de la adición de un ácido o una base, dependiendo del pH objetivo y de otros requerimientos de proceso. La mayor parte de los efluentes pueden ser neutralizados a un pH de 6 a 9 de forma previa a su vertido. (Ures et al., 2014).

- **Clarificación**

La clarificación del agua tiene por objeto retirar los sólidos suspendidos, sólidos finamente divididos y materiales coloidales, convirtiéndolos en partículas más grandes que se puede remover con mayor facilidad. (Flórez, 2011)

- **Agua residual de mina**

Son drenajes tóxicos en diverso grado para el hombre, la fauna y la vegetación, contienen metales disueltos y constituyentes orgánicos solubles e insolubles, que generalmente proceden de labores mineras, procesos de concentración de minerales, presas de residuos y escombreras de mina. (Aduvire, 1991).

- **Efluentes mineros**

Las operaciones mineras y metalúrgicas pueden generar residuos sólidos, efluentes líquidos y emisiones gaseosas. Los efluentes líquidos muchas veces contienen metales disueltos y sólidos en suspensión que no siempre cumplen los estándares fijados por la autoridad ambiental. (Huertas Jara, s/f).

- **Manganeso**

El manganeso es un metal bastante reactivo. Aunque el metal sólido reacciona lentamente, el polvo metálico reacciona con facilidad y en algunos

casos, muy vigorosamente. (*Manganeso (Mn) Propiedades químicas y efectos sobre la salud y el medio ambiente*, s/f).

- **pH**

En química, el pH es una escala numérica utilizada para especificar la acidez o alcalinidad de una solución acuosa. Es el logaritmo negativo en base 10 de la actividad del ion Hidrógeno.(Pérez, 2016).

- **Remoción**

Cuando quitamos, borramos, eliminamos, obviamos o apartamos algo, lo que estamos haciendo es removerlo. Una remoción, por lo tanto, consiste en llevar una cosa de un lugar hacia otro o en modificar la situación, el estado o la condición de una persona. (*Definición de remoción - Qué es, Significado y Concepto*, s/f).

- **Tiempo de residencia**

La cantidad de tiempo que un líquido permanece en un recipiente. El tiempo de retención asegura que se haya alcanzado el equilibrio entre el líquido y el gas a presión del separador. El tiempo de retención en un separador se determina dividiendo el volumen del líquido dentro del recipiente por la tasa de flujo del líquido. El tiempo de retención varía, normalmente, entre 30 segundos y 3 minutos. Si hay presencia de crudo espumoso, el tiempo de retención podría aumentar cuatro veces su valor normal. (tiempo de residencia | Oilfield Glossary, s/f).

- **Alcalinidad**

Es la medida de la capacidad para neutralizar ácidos. A diferencia del pH,

que indica si una solución es un ácido o una base, la alcalinidad expresa cuánto ácido puede absorber una solución sin cambiar el pH. (¿Por qué medir la alcalinidad en el agua potable? | HANNA® instruments México, s/f).

- **Límites Máximos Permisibles**

Medida de la concentración o del grado de elementos, sustancias o parámetros físicos, químicos y biológicos, que caracterizan al efluente líquido de actividades minero-metalúrgicas, y que al ser excedida causa o puede causar daños a la salud, al bienestar humano y al ambiente. Su cumplimiento es exigible legalmente por el Ministerio del Ambiente y los organismos que conforman el Sistema de Gestión Ambiental. (Paolo & Soberón, 2015).

- **Metales disueltos (d)**

Como su nombre menciona son los metales disueltos en las soluciones, aunque, existe amplia investigación sobre el riesgo de los metales pesados en la salud y el medio ambiente en la literatura. Varios autores han mostrado el riesgo de contaminación por metales pesados en el agua. (Julio Quicaño, 2019).

- **Ataque químico**

Refiere al proceso de utilizar agentes químicos para disolver selectivamente ciertos componentes de un material metálico, revelando así su estructura interna o eliminando impurezas.

- **Muestra**

Es una porción representativa de un objeto, sustancia o fenómeno que se selecciona y se utiliza para su análisis, estudio o evaluación, en este caso muestra son llamadas las aguas para su tratamiento. En diversos campos, como la ciencia,

la medicina, la estadística y la investigación, se utilizan muestras para comprender y generalizar información sobre una población más grande.

2.4. Formulación de hipótesis

2.4.1. Hipótesis general

La optimización del consumo de cal, a través del ajuste preciso del pH y la evaluación de los tiempos de alcalinización y clarificación, permite una remoción eficiente del manganeso y otros metales pesados, lo que contribuye a reducir el impacto ambiental asociado al tratamiento de aguas residuales y poder descargar los efluentes líquidos de actividades minero-metalúrgicas.

2.4.2. Hipótesis específicas

- El ajuste del pH mediante un consumo óptimo de cal permite maximizar la precipitación del manganeso en las aguas residuales de la unidad minera Andaychagua, alcanzando niveles de remoción superiores al 99% Mn.
- El tiempo de alcalinización influye significativamente en la eficiencia de la remoción del manganeso, siendo posible determinar un tiempo óptimo que minimice el consumo de cal y maximice la precipitación de metales pesados.
- La determinación de los parámetros óptimos de pH, consumo de cal, y tiempos de alcalinización y clarificación reduce significativamente la formación de lodos en exceso, no altera el pH del agua tratada, evita incrustaciones y obstrucciones en las tuberías, equipos y tanques de la PTAR de la unidad minera Andaychagua.

2.5. Identificación de variables

- **Variable independiente:** Consumo de cal
- **Variable dependiente:** Precipitación del Manganeseo

2.6. Definición operacional de variables e indicadores

2.6.1. Operacionalización de la variable independiente:

- Consumo de cal: 0,02; 0,03; 0,04 y 0,05 g/l
- pH del agua tratada:
 - ✓ Factor 1: 9,7
 - ✓ Factor 2: 10,0
 - ✓ Factor 3: 10,2
 - ✓ Factor 4: 10,5
- Tiempo durante el cual se permite que la cal actúe para modificar las propiedades químicas del agua.
- Tiempo de clarificación (minutos) destinado a permitir la separación sólido-líquido en las pruebas.

2.6.2. Operacionalización de la variable dependiente:

- Resultado medido tras la precipitación y separación.
- Valores obtenidos: 0,251; 0,211; 0,105 y 0,014 mg/l de Mn.
- Porcentaje de manganeso eliminado del agua, alcanzó hasta el 99% Mn dependiendo del pH y el tiempo de tratamiento.
- Evaluación de la efectividad del proceso de clarificación.

Tabla 5. *Tabla de operacionalización de variables*

Variables	Definición conceptual	Dimensiones o Categorías	Indicador
1.1.1. Variable independiente: Consumo de cal	Cantidad de lechada de cal en volumen (ml) que se administra al agua residual de mina con la finalidad de incrementar su pH. La dosificación puede ser automática o manual	Dosis de cal	Masa de cal por volumen de agua procesada. (mg/L)
Variable dependiente: Precipitación del manganeso	Consiste en la reducción de la concentración del manganeso que se encuentra en el agua residual minero.	Concentración del manganeso	Concentración inicial y final del manganeso (mg/L.)
		Eficiencia de remoción	% Remoción: $\frac{i-f}{f} \times 100$ Dónde: i= concentración de manganeso del agua de mina sin tratamiento en mg/l (inicial) f= concentración de manganeso del agua de mina tratada en mg/L (final)

CAPITULO III

METODOLOGÍA Y TÉCNICAS DE INVESTIGACIÓN

3.1. Tipo de investigación.

Esta investigación es de tipo experimental; porque el objetivo planteado indica optimizar el consumo de cal para la precipitación de metales del agua de mina de la unidad minera Andaychagua – Yauli – Junín, con la manipulación de dos o más variables con sus respectivos niveles.

3.2. Nivel de investigación

De acuerdo con el enfoque, el estudio se ubica en el nivel correlacional, y que busca establecer la relación entre dos o más variables como es el consumo de cal y precipitación de manganeso.

3.3. Métodos de investigación

El método que se realizará en esta investigación es el método experimental haciendo usos de pruebas experimentales a nivel laboratorio con la finalidad de remover el manganeso, puesto que establece la relación entre la variable

independiente y dependiente – diseño factorial 2^k para la precipitación del manganeso y otros metales solubilizados mediante el uso de agente neutralizador como la cal.

3.4. Diseño de investigación.

El diseño de investigación experimental es realizado mediante pruebas de jarras (Jar - Test) en los ambientes del laboratorio de Lima en el distrito de San Juan de Miraflores - Laboratorio CERTIMIN y en función al diseño 2^k , aplicando la repetición de pruebas metalúrgicas. A fin de poder determinar los resultados de cálculos matemáticos y químicos, porque el planteamiento de problema es optimizar la dosificación adecuada de la cal para la precipitación del manganeso, y para medir, analizar, describir y explicar la interrelación de variables.

3.4.1. Diseño Factorial – Neutralización

N = número de pruebas de alcalinización; (Ver tabla 6).

a, b, c = niveles de las variables independientes;

r = número de repeticiones.

Por consiguiente, el número de pruebas será:

$$N = 4 * 1 * 1 = 4$$

Tabla 6. *Diseño experimental - Alcalinización con cal.*

VARIABLES			VARIABLES	
Indicadores Independientes			Indicadores Dependientes	
Cal g/l	pH tratado	Tiempo min	Conc. Mn / As ppm	% Remoción Yi
Ratio 1	9,7	15	X1	Yi1
Ratio 3	10,0	15	X3	Yi3
Ratio 4	10,2	15	X4	Yi4
Ratio 6	10,4	15	X6	Yi6

3.4.2. Diseño Factorial – Neutralización más Oxidación

N = número de pruebas de alcalinización más oxidación; (Ver tabla 7).

a,b,c = niveles de las variables independientes;

r = número de repeticiones.

Por consiguiente, el número de pruebas será:

$$N = 3 * 1 * 1 = 3$$

Tabla 7. *Diseño experimental – Alcalinización más oxidación.*

VARIABLES			VARIABLES	
Indicadores Independientes			Indicadores Dependientes	
Cal + Aire g/l	pH tratado	Tiempo min	Conc. Mn / As ppm	% Remoción Yi
Ratio 2	9,8	15	X2	Yi2
Ratio 5	10,3	15	X5	Yi5
Ratio 6	10,5	15	X7	Yi7

3.4.3. Diseño Factorial – Optimización

N = número de pruebas de optimización; (Ver tabla 8).

a,b,c = niveles de las variables independientes;

r = número de repeticiones.

Por consiguiente, el número de pruebas será:

$$N = 3 * 2 * 1 = 6$$

Tabla 8. *Diseño experimental – Optimización de pH y tiempo.*

VARIABLES			VARIABLES	
Indicadores Independientes			Indicadores Dependientes	
Cal + Aire g/l	pH tratado	Tiempo min	Conc. Mn / As mg/l	% Remoción Yi
Ratio 0	9,5	5	X8	Yi8
Ratio 1	9,7	5	X9	Yi9
Ratio 4	10,2	5	X10	Yi10
Ratio 0	9,5	10	X11	Yi11
Ratio 1	9,7	10	X12	Yi12
Ratio 4	10,2	10	X13	Yi13

3.5. Población y muestra.

3.5.1. Población

La población de este trabajo de investigación son las aguas residuales (Compósito) de la unidad minera Andaychagua -Yauli – Junín, con alto contenido de manganeso.

3.5.2. Muestra

La muestra de la investigación son las diferentes aguas ácidas (Muestras individuales) proveniente de la unidad minera Andaychagua -Yauli - Junín, en base a la data histórica de las muestras, la toma de muestras in situ fue realizado teniendo en cuenta un plan de muestreo que consistió en recolectar muestra durante 5 días cada 12 horas, quedando establecido que la representatividad de las muestras para las pruebas metalúrgicas de investigación. La cantidad de muestras ingresadas se muestran en la siguiente tabla 9:

Tabla 9. Muestras Ingresadas a Laboratorio Metalúrgico.

N°	CÓDIGO DE MUESTRA	DESCRIPCIÓN DE TIPO DE AGUA	CANTIDAD
			litros
1	M-NV570	Agua de la bocamina NV. 570	320
2	P-RELLENO	Agua de la Planta de Relleno	40
3	P-ALTRON	Agua de la Planta Altron	40
4	B-RECUAY	Agua de la bocamina Recuay	40
5	R-FRESCO	Relave Fresco	320
6	AR-ESPEJO	Espejo de la relavera Andaychagua Bajo	100
TOTAL			860

Lo que se procura que la solución compósito sea lo más representativa posible para luego realizar el trabajo estadístico, y se conozca objetivamente las características de la población de estudio (Murray y Larry 2005).

$$n = \frac{Z_{\alpha/2}^2 * N * p * q}{e^2 * (N - 1) + Z_{\alpha/2}^2 * p * q}$$

Donde:

N = Total de la población.

$Z_{\alpha/2}$ = Valor correspondiente a la distribución de Gauss

P = Prevalencia esperada del parámetro a evaluar.

$q = 1 - p$.

e = Precisión. Para nuestro estudio tendremos los siguientes datos:

N = 860

$Z_{\alpha/2} = 1,96$

P = 0,05

q = 0,95

e = 0,05

Por lo tanto, reemplazando todos los datos tenemos:

$$n = \frac{1,962 * 860 * 0,05 * 0,95}{0,052 (860 - 1) + 1,962 * 0,05 * 0,95}$$

$$n = \frac{156,92936}{2,3299676}$$

$n = 67$ (tamaño de la muestra).

A continuación, se presenta los resultados de los análisis químicos de las muestras individuales y el compósito formado.

3.5.3. Caracterización química de muestras individuales

El reporte de resultados de caracterización química de las muestras individuales comparados con los parámetros LMP según Decreto Supremo N°010-2010-MINAM, se presenta en la tabla 9.

Tabla 10. Resultados de Análisis Químico de muestras individuales Vs LMP.

Parámetro	pH	STS	As(t)	Cd(t)	Mn(t)	Cu(t)	Fe(d)	Pb(t)	Zn(t)
Unidades		mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l
LMP	6 - 9	25	0,08	0,04	-	0,4	1,6	0,16	1,2
AR-NV570 AN08	6,1	1.159	0,111	0,018	4,751	0,039	0,01	1,66	6,039
P-RELLE NO AN03	8,8	300	<0,008	<0,001	0,007	0,004	0,03	<0,01	<0,005
P-ALTRO N AN07	7,4	99	<0,008	<0,001	0,045	0,008	0,02	<0,01	0,024
B-RECUAY AN04	7,4	<5	0,016	<0,001	0,008	<0,003	0,01	<0,01	0,947
AR-AND-BAJO AN05	8,4	<5	0,011	<0,001	0,083	<0,003	0,03	<0,01	0,099
R-FRESCO O AN06	5,3	2.248	1,046	0,018	9,345	0,494	0,14	1,19	2,125

ECA-3 Vs Muestras más contaminadas

Los parámetros ECA-3 para la descarga de efluentes líquidos de actividades minero metalúrgicos según Decreto Supremo N°004-2017-MINAM comparados con los resultados de análisis de las muestras individuales como muestras de Relave Fresco y muestras de Mina NV570 que mayor aporte darán para la conformación del compósito, se presenta en la tabla 11.

Tabla 11. *Parámetros ECA-3 Vs Resultados Relave Fresco y Mina NV570.*

Parámetro	Unidad	ECA-3 – D1	Muestras Individuales	
			R-FRESCO	AR-NV570
pH	pH	6,5 – 8,5	5,3	6,1
SO ₄ ⁼	mg/l	1.000	670	600
CN wad	mg/l	0,1	0,157	-
Conductividad	μS/cm	2.500	1.954	1.502
Al(t)	mg/l	5	28,49	10,19
As(t)	mg/l	0,1	1,046	0,111
Ba(t)	mg/l	0,7	0,104	0,141
Be(t)	mg/l	0,1	0,0029	0,0056
B(t)	mg/l	1	0,097	0,045
Cd(t)	mg/l	0,01	0,018	0,018
Cu(t)	mg/l	0,5	0,494	0,039
Co(t)	mg/l	0,05	0,009	0,004
Fe(t)	mg/l	5	90,38	35,83
Li(t)	mg/l	2,5	0,017	0,061
Mg(t)	mg/l	250	21,0	40,97
Mn(t)	mg/l	0,2	9,345	4,751
Hg(t)	mg/l	0,001	-	-
Ni(t)	mg/l	0,2	0,041	0,024
Pb(t)	mg/l	0,05	1,19	1,66
Se(t)	mg/l	0,02	<0,02	<0,02
Zn(t)	mg/l	2,0	2,125	6,039

Los metales de alto contenido de las muestras Relave Fresco y Mina NV570 comparados a los ECA-3, que están por encima de los estándares son: Al, As, Fe, **Mn**, Pb y Zn; y en la muestra AR-Espejo el As y **Mn**.

Formación de compósito

Así mismo, se realizó la preparación de compósito con los flujos proporcionados por la unidad minera Andaychagua, según caudales promedio para la descarga de efluentes, los cuales consistió en la homogenización y toma de alícuotas de muestras individuales para la conformación del compósito (Ver tabla 12).

Tabla 12. *Flujos proporcionados por Andaychagua – Compósito.*

Código de Muestra	Volumen l	Flujo l/s	Distribución %
M-Nv 570	35,4	228	52,9
P-Recuay	1,1	7	1,7
R-Fresco	23,3	150	34,8
And Bajo	5,9	38	8,8
P-Altron	0,6	4	0,9
Pta Relleno	0,6	4	0,9
Tamaño Muestra	67,0	431	100,0

Caracterización química del compósito

Para la conformación del compósito se consideró la filtración de la muestra individual R-Fresco a solicitud de la unidad minera Andaychagua TSS final ≤ 5 mg/l, puesto que la muestra a ser tratada es de Rebose.

El reporte de resultados de caracterización química de la muestra compósito, se presentan en las tablas 13 y 14.

Tabla 13. *Resultados de Análisis Físicos-Químicos – Compósito.*

Parámetro	pH	Conductiv	Turbidez	STS	TSD	SO₄⁼	CN_T	CN_w
Unidades		µmho/cm	NTU	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l
Compósito	7,8	1.606	>1.000,0	1.418	851	642	0,151	0,099

Tabla 14. Resultados de Análisis Químico por ICP – Compósito.

Ag(t)	Ag(d)	Al(t)	Al(d)	As(t)	As(d)	Ba(t)	Ba(d)	Be(t)	Be(d)
mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l
<0,00	<0,00	15,34	0,04	0,310	0,12	0,109	0,044	0,003	<0,000
2	2			8				6	3
B(t)	Ca(t)	Ca(d)	Cd(t)	Cd(d)	Ce(t)	Ce(d)	Co(t)	Co(d)	Cr(t)
mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l
0,060	265,6	244,3	0,010	<0,00	<0,0	<0,02	0,007	<0,00	0,043
	5	3		1	2			2	
Cr(d)	Cu(t)	Cu(d)	Fe(t)	Fe(d)	K(t)	K(d)	Li(t)	Li(d)	Mg(t)
mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l
<0,00	0,148	0,042	46,70	0,04	36,8	30,92	0,042	0,032	32,46
4					9				
Mg(d)	Mn(t)	Mn(d)	Mo(t)	Mo(d)	Na(t)	Na(d)	Ni(t)	Ni(d)	P(t)
mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l
20,22	5,178	0,789	<0,00	<0,00	37,7	37,66	0,034	<0,00	0,94
			4	4	7			2	
P(d)	Pb(t)	Pb(d)	Sb(t)	Sb(d)	Se(t)	Se(d)	Sn(t)	Sn(d)	Sr(t)
mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l
<0,06	1,17	<0,01	<0,00	<0,00	<0,0	<0,02	<0,00	<0,00	1,0213
			8	8	2		7	7	
Sr(d)	Ti(t)	Ti(d)	Tl(t)	Tl(d)	V(t)	V(d)	Zn(t)	Zn(d)	
mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	
1,016	0,13	<0,01	<0,05	<0,05	0,03	<0,00	2,280	0,066	
9					4	3			

ECA-3 Vs Muestra Compósito

Finalmente, los parámetros ECA-3 para la descarga de efluentes líquidos de actividades minero metalúrgicos según Decreto Supremo N°004-2017-MINAM comparados con los resultados de análisis químico del compósito, se presenta en la tabla 15.

Tabla 15. *Parámetros ECA-3 Vs Resultados de Compósito.*

Parámetro	Unidad	ECA-3 – D1	Compósito
pH	pH	6,5 – 8,5	7,8
SO ₄ ⁼	mg/l	1.000	642
CN wad	mg/l	0,1	0,099
Conductividad	µS/cm	2.500	1.606
Al(t)	mg/l	5	15,34
As(t)	mg/l	0,1	0,310
Ba(t)	mg/l	0,7	0,109
Be(t)	mg/l	0,1	0,0036
B(t)	mg/l	1	0,060
Cd(t)	mg/l	0,01	0,010
Cr(t)	mg/l	0,1	0,043
Cu(t)	mg/l	0,5	0,148
Co(t)	mg/l	0,05	0,007
Fe(t)	mg/l	5	46,70
Li(t)	mg/l	2,5	0,042
Mg(t)	mg/l	250	32,46
Mn(t)	mg/l	0,2	5,178
Hg(t)	mg/l	0,001	0,0003
Ni(t)	mg/l	0,2	0,034
Pb(t)	mg/l	0,05	1,17
Se(t)	mg/l	0,02	<0,02
Zn(t)	mg/l	2,0	2,280

Los metales de alto contenido en el compósito comparados a los ECA-3, que están por encima de los estándares son Al, As, Fe, **Mn**, Pb y Zn. El contenido de sulfatos y CN wad están por debajo de los ECA-3.

3.6. Técnicas e instrumentos de recolección de datos

Para la recolección de datos se elaboró formatos impresos para cada actividad. Asimismo, se utilizó una libreta de campo, un cronómetro, una cámara fotográfica, frascos de 1 litro, baldes de 10 litros, probetas, pHmetro, turbidímetro portátil, luna de reloj, balanza analítica y otros instrumentos, que se fueron usados durante el trabajo de investigación.

3.6.1. Técnicas de recolección de datos

- a) Observación: Se revisaron la información histórica de los contenidos de metales de muestras que ingresan a la planta de tratamiento de aguas ácidas para la formación del compósito.

Fichaje: Se preparó reportes de piso de toma de muestra de las condiciones al momento de la recolección de las muestras iniciales, de cada uno de los puntos individuales según la hoja de piso. (Ver figura 3).

Figura 3: *Hoja de piso de la toma de muestra in situ.*

GENIERÍA Y
INSTRUCCIÓN

HOJA DE PISO PARA TOMA DE MUESTRAS LÍQUIDAS

NOMBRE DEL OPERADOR: _____

PUNTO DE MUESTREO: _____

FECHA DE MUESTREO: _____

HORA	VOLUMEN (L)	CAUDAL (m3/h)	OBSERVACIÓN
06:00	2	4.6	
12:00	2	4.8	
18:00	2	5.0	
00:00	2	5.2	

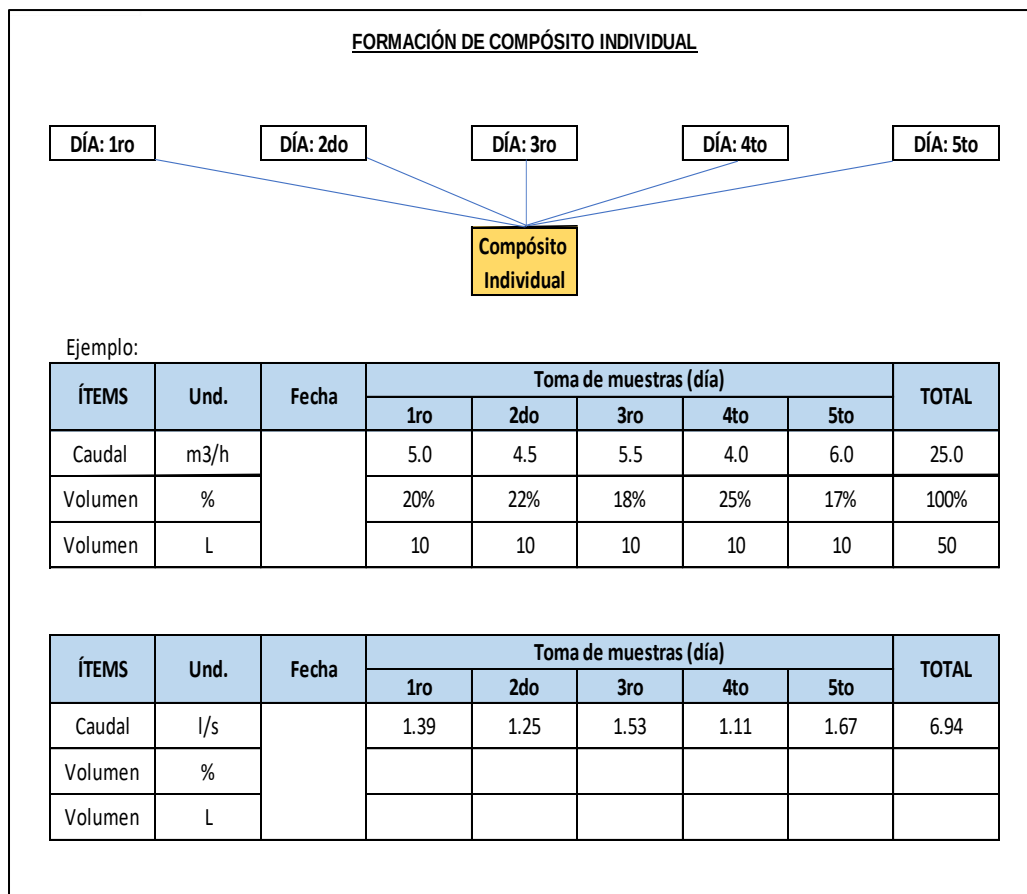
Firma del Operador: _____

Firma del Supervisor: _____

Referencia: Elaboración propia.

Así mismo, se presenta en la figura 4 el formato para la conformación de las muestras compósitos según flujos o caudales medidos de cada una de las muestras individuales y formación de compósitos:

Figura 4: Hoja de piso para la conformación del compósito.



Referencia: Elaboración propia.

3.6.2. Instrumentos de recolección de datos

Los principales instrumentos que se utilizaron son los siguientes:

- **Procedimientos:** Instructivos tanto para la preparación de reactivos, así como la ejecución de las pruebas metalúrgicas de laboratorio.
- **Cuestionarios:** Así mismo, el requerimiento tales como: personal,

equipos, materiales y herramientas para la realización del programa de muestreo.

Materiales e Instrumentos:

- **Cal:** Se utilizó la cal de 80% de CaO en el proceso de neutralización convencional (LDS) hasta pH 11 y, posteriormente a la separación S/L, la reducción del pH fue mediante el uso de CO₂. (Ver figura 5).

Figura 5 Cal de 80% CaO.



Referencia: Fotografía propia.

- **Vasos de precipitación:** Nos sirvió para medir las cantidades de los efluentes para su posterior tratamiento en las pruebas de laboratorio. (Ver figura 6).

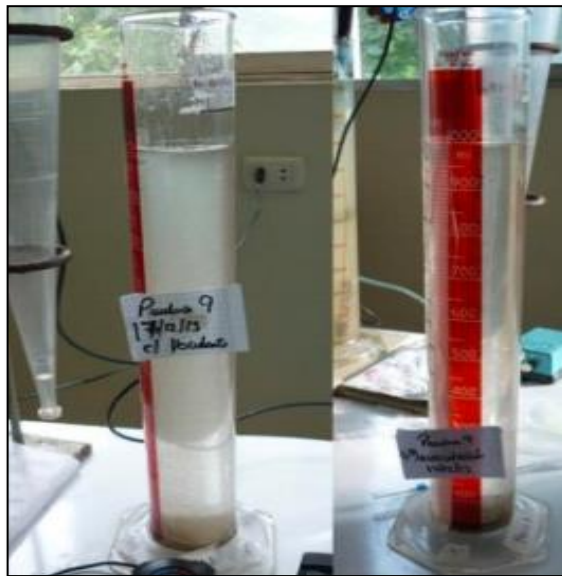
Figura 6: Vasos de precipitación de 1 litro.



Referencia: Fotografía propia.

- **Probetas:** Nos sirvió para medir las cantidades de los efluentes para su posterior tratamiento. (Ver figura 7).

Figura 7: Probetas para medir alícuotas necesarias.



Referencia: Fotografía propia.

- **Muestra agua ácida de mina:** Es el material o muestras individuales para su tratamiento proveniente de Andaychagua. (Ver figura 8).

Figura 8: *Medición de muestras de agua de mina.*



Referencia: Fotografía propia.

- **Potenciómetro:** Es un sensor utilizado en el método electroquímico para medir pH de una disolución en agua ácida de mina. (Ver figura 9).

Figura 9: *pH metro.*



Referencia: Fotografía propia.

- **Turbidímetro Portátil:** Nos sirvió para medir la turbidez en las muestras de agua ácida de mina en el laboratorio, se usó un turbidímetro Digital 2100Q. (Ver figura 10).

Figura 10: Turbidímetro.



Referencia: Fotografía propia.

- b) Luna de reloj:** Se utilizó para pesar productos sólidos o como cubierta de vasos de precipitados, y contener sustancias parcialmente corrosivas.
- c) Balanza Analítica:** Báscula que mide masa con un alto grado de precisión. Típicamente tienen un rango de pesaje entre los 100 y los 300 g, y una lectura de 0,1 mg (4 decimales), de 0,01 mg (5 decimales, también denominada balanza semi-micro) o de 0,001 mg (6 decimales, también denominada micro balanza). (Ver figura 11).

Figura 11: *Balanza Analítica.*



Referencia: Fotografía propia.

3.7. Selección, validación y confiabilidad de los instrumentos de investigación

3.7.1. Selección

La selección de los instrumentos de investigación se realizó mediante un muestreo aleatorio y representativo en base a la data histórica de las muestras de la unidad minera Andaychagua.

3.7.2. Validación

Respecto a la validación este se realizó mediante un análisis estadístico en función al diseño experimental aplicado con repetición de pruebas metalúrgicas.

3.7.3. Confiabilidad

El nivel de confiabilidad de las pruebas realizadas a nivel laboratorio cumple con el 95% de nivel de confianza y conforme al plan de trabajo aplicado a este proyecto se discute los resultados.

3.8. Técnicas de procesamiento y análisis de datos

En esta etapa se ordenó, clasificó, codificó y se tabularon los datos obtenidos de los diferentes ensayos químicos de las muestras de agua. Se aplicó el análisis estadístico, descriptivo, ello sirvió para efectos de la contrastación de la hipótesis. Se aplicará un escalonamiento para obtener los datos estadísticos óptimos.

3.8.1. Técnicas de procesamiento de datos

Para el procesamiento de datos se describe las pruebas metalúrgicas de laboratorio realizadas según el diseño de investigación factorial, para luego denotar los efectos e interacción de factores, análisis de varianza ANAVA, en función del % de remoción de los metales.

A continuación, se describe las pruebas de neutralización, más oxidación y pruebas de optimización realizadas:

Pruebas de Neutralización

Para ver el efecto de precipitación del manganeso trabajando a pH mayores de 9,7; se realizaron las pruebas de alcalinización, mediante la adición de lechada de cal preparada al 10%, a una agitación de 120 RPM, al compósito, el detalle de las pruebas se muestra en la tabla 16.

Tabla 16. *Etapas de Alcalinización a pH 9,7-10,5 – Compósito.*

Código de Muestra	Vol. inicial (l)	Tiempo de Res. (min)	ETAPA DE NEUTRALIZACIÓN					
			pH inicial	Lechada de Cal Conc. %	Adición ml	Dosis g/l	Pulpa pH	ORP mv
HLC-T03	5,0	15	7,83	10	1,0	0,02 0	9,66	- 162,0
HLC-T05	5,0	15	7,84	10	1,7	0,03 4	9,98	- 181,0
HLC-T06	5,0	15	7,87	10	2,2	0,04 4	10,2 2	- 193,1
HLC-T07	5,0	15	7,88	10	2,5	0,05 0	10,5 4	- 209,5

El ratio de consumo de cal considerando una pureza de 80% CaO estuvo entre 0,02-0,05 g/l para llegar a un pH entre 9,66-10,54.

Después de concluidas la etapa de alcalinización, se dosificó 1 ppm de floculante MT-127, con el fin de formar flóculos y precipitar las partículas en suspensión aplicando agitación lenta (80 RPM).

Los parámetros de clarificación se muestran en la siguiente tabla 17:

Tabla 17. *Etapas de Clarificación a pH 9,7-10,5 – Compósito.*

Código de Muestra	Vol. (L)	Tiempo de Agitación (min)	ETAPA DE CLARIFICACIÓN						
			Conc. %	Adición ml	Dosis mg/l	Turbidez (NTU's)			
						0'	2,5'	5'	10'
HLC-T03	5,0	5	0,1	5,0	1,00	48,9	35,6	31,3	23,5
HLC-T05	5,0	5	0,1	5,0	1,00	35,2	25,8	24,6	18,2
HLC-T06	5,0	5	0,1	5,0	1,00	22,8	17,9	17,2	11,2
HLC-T07	5,0	5	0,1	5,0	1,00	25,8	19,9	16,8	8,64

Una vez transcurrido el tiempo de floculación se dejó reposar por 10 minutos adicionales con el fin de extraer la alícuota de solución sobrenadante para el respectivo análisis por pH (clarificado), ICP (metales totales y disueltos), los cuales se compara con los resultados del compósito y ECA-3. (Ver tabla 18).

Tabla 18. *Parámetros ECA-3 Vs Resultados HLC-T05, T06, T07.*

Parámetro	ECA-3 – D1	Comp.	HLC-T03		HLC-T05		HLC-T06		HLC-T07	
			Total	Disuelto	Total	Disuelto	Total	Disuelto	Total	Disuelto
pH	6,5-8,5	7,8	9,4	-	9,6	-	9,8	-	10,0	-
Al	5	15,34	0,1	0,7	0,38	0,05	0,28	0,05	0,28	0,07
As	0,1	0,310	0,168	0,154	0,173	0,148	0,151	0,140	0,125	0,100
Ba	0,7	0,109	0,038	0,031	0,041	0,038	0,041	0,037	0,038	0,031
Be	0,1	0,0036	<0,0003	<0,0003	<0,0003	<0,0003	<0,0003	<0,0003	<0,0003	<0,0003
B	1	0,060	0,057	-	0,056	-	0,056	-	0,056	-
Cd	0,01	0,010	<0,001	<0,001	0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001
Cr	0,1	0,043	<0,004	<0,004	0,004	0,004	<0,004	<0,004	<0,004	<0,004
Cu	0,5	0,148	0,059	0,055	0,020	0,015	0,016	0,009	0,015	0,010
Co	0,05	0,007	<0,002	<0,002	0,002	<0,002	<0,002	<0,002	<0,002	<0,002
Fe	5	46,70	0,08	0,04	0,82	0,03	0,67	0,03	0,66	0,05
Li	2,5	0,042	0,032	0,031	0,032	0,032	0,033	0,032	0,031	0,025
Mg	250	32,46	20,06	19,80	20,18	19,64	20,61	19,07	19,49	19,35
Mn	0,2	5,178	0,287	0,251	0,263	0,211	0,182	0,105	0,078	0,014
Ni	0,2	0,034	<0,002	<0,002	<0,002	<0,002	<0,002	<0,002	<0,002	<0,002
Pb	0,05	1,17	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01
Se	0,02	<0,02	<0,02	<0,02	<0,02	<0,02	<0,02	<0,02	<0,02	<0,02
Zn	2,0	2,280	0,011	0,009	0,061	0,011	0,045	0,012	0,049	0,017

Considerando únicamente el proceso de neutralización mediante lechada de cal al 10% y considerando pH entre 10,22 y 10,54 (Pruebas T06 y T07), se logró remover los metales de alto contenido de la muestra compósito. El manganeso fue removido hasta 0,182 y 0,078 mg/l cumpliendo los ECA-3. El elemento difícil de remover fue el arsénico, cuyos resultados finales fueron 0,151 y 0,125 mg/l para las pruebas T06 y T07.

Debido que el arsénico no cumple con el ECA-3 ($<0,1$ mg/l As), fueron realizadas nuevas pruebas en las cuales se incluyó la oxidación mediante aire fresco con la finalidad de oxidar el arsénico As (III) hasta Arseniato As (V) y procurar su precipitación mediante la neutralización.

Las pruebas HLC-T03 y HLC-T05 que fue realizada a pH 9,66 y pH 9,98, no tuvo éxito para la remoción del manganeso, reportando 0,263 y 0,287 mg/l en la solución tratada.

Pruebas de Neutralización más Oxidación

La muestra cabeza del compósito presentó 0,151 mg/l CN total y 0,099 mg/l CN wad, pudiendo contener iones arseniuros los cuales necesitan ser oxidados a cianatos para su precipitación.

Se realizaron 3 pruebas de neutralización-oxidación, mediante la adición de lechada de cal preparada al 10% más insuflación de aire fresco para la oxidación, tiempos de residencia de 15 minutos y agitación de 120 RPM. El detalle de las pruebas se muestra en la tabla 19.

Tabla 19. *Etapas de Alcalinización–Oxidación a pH 10.3 – Compósito.*

Código de Muestra	Vol. inicial (l)	Tiempo de Res. (min)	NEUTRALIZACIÓN				OXIDACIÓN	
			pH inicial	Lechada de Cal Conc. %	Adición ml	Dosis g/l	Aire Dosis f. LP M	pH en pulpa
HLC-T04	5,0	15	7,76	10	1,2	0,024	0,4	9,79
HLC-T08	5,0	15	7,75	10	2,3	0,045	0,4	10,32
HLC-T09	5,0	15	7,76	10	2,5	0,050	0,4	10,46

El ratio de consumo de cal considerando una pureza de 80% CaO fue de 0,03; 0,04 y 0,05 g/l y 0,4 LPM de aire fresco.

Después de concluidas las etapas de neutralización- oxidación, se dosificó 1 ppm floculante MT-127, con el fin de formar flóculos y precipitar las partículas en suspensión aplicando agitación lenta (80 RPM). Los parámetros de trabajo se muestran en la siguiente tabla 20:

Tabla 20 *Etapas de Clarificación después de Alc. +Aire – Compósito.*

Código de Muestra	Vo l. (l)	Tiempo de Agitación (min)	ETAPA DE CLARIFICACIÓN						
			Con c. %	Adición ml	Dosis mg/l	Turbidez (NTU's)			
						0'	2,5'	5'	10'
HLC-T04	5,0	5	0,1	5,0	1,00	36,2	34,3	23,0	20,2
HLC-T08	5,0	5	0,1	5,0	1,00	27,2	18,0	14,2	11,8
HLC-T09	5,0	5	0,1	5,0	1,00	12,0	10,2	8,69	6,58

Luego de la floculación se dejó reposar por 10 minutos adicionales con el fin de extraer la alícuota de solución sobrenadante para el respectivo análisis por pH, TSS, CN total y wad, ICP (metales totales y disueltos).

En la tabla 21, se presenta los resultados de análisis químico de estas 2 pruebas (neutralización más oxidación) comparados con los resultados de cabeza del compósito y parámetros ECA-3:

Tabla 21. *Parámetros ECA-3 Vs Resultados HLC-T04, T08, T09*

Parámetro	ECA-3 – D1	Comp .	HLC-T04		HLC-T08		HLC-T09	
			Total	Disuelt o	Total	Disuelt o	Total	Disuelt o
pH	6,5 – 8,5	7,8	9,3	-	10,0	-	10,0	-
CN wad	0,1	0,099	-	-	0,056	-	0,050	-
TSS	25 (LMP)	1418	-	-	18	-	16	-
CN total	0,8 (LMP)	0,151	-	-	0,101	-	0,068	-
Al	5	15,34	0,1	0,7	0,18	0,06	0,16	0,08
As	0,1	0,310	0,119	0,095	0,075	0,060	0,065	0,052
Ba	0,7	0,109	0,040	0,038	0,035	0,034	0,035	0,035
Be	0,1	0,0036	<0,0003	<0,0003	<0,0003	<0,0003	<0,0003	<0,0003
B	1	0,060	0,056	-	0,050	-	0,052	-
Cd	0,01	0,010	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001
Cr	0,1	0,043	<0,004	<0,004	<0,004	<0,004	<0,004	<0,004
Cu	0,5	0,148	0,057	0,051	0,008	0,005	0,006	0,004
Co	0,05	0,007	<0,002	<0,002	<0,002	<0,002	<0,002	<0,002
Fe	5	46,70	0,10	0,04	0,34	0,02	0,27	0,03
Li	2,5	0,042	0,032	0,032	0,029	0,023	0,030	0,024
Mg	250	32,46	20,48	19,50	18,98	18,75	19,75	19,29
Mn	0,2	5,178	0,248	0,233	0,044	0,016	0,042	0,008
Ni	0,2	0,034	<0,002	<0,002	<0,002	<0,002	<0,002	<0,002
Pb	0,05	1,17	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01
Se	0,02	<0,02	<0,02	<0,02	<0,02	<0,02	<0,02	<0,02
Zn	2,0	2,280	0,010	0,009	0,028	0,010	0,015	<0,005

Los resultados muestran que a pH mayor a 10,2 mediante el proceso alcalinización más oxidación, los metales de alto contenido de la muestra compósito como: Al, As, Cd, Fe, Mn, Pb, Zn, fueron precipitados cumpliendo con la normativa ECA-3, a excepción del tratamiento a pH 9,8.

Las pruebas fueron realizadas a pH 10,3 cuyo consumo fue 0,05 g/l de cal,

alimentación de aire fresco a razón de 0,4 LPM, tiempo de residencia de 15 minutos y 1,0 g/m³ de floculante MT-127 en la etapa de clarificación de ambas pruebas. Así mismo, los resultados de los ensayos químicos muestran que se cumplen la Normativa ECA-3, es decir, el tiempo óptimo para la precipitación debería ser menor a 15 minutos.

Pruebas de Optimización

Con el fin de ajustar el tiempo de residencia en la etapa de neutralización-oxidación y optimizar el consumo de aire y lechada de cal se realizaron las siguientes pruebas:

Se realizó 6 pruebas de neutralización-oxidación, mediante la adición de lechada de cal preparada al 10% con oxidación por aire fresco, a una agitación de 120 RPM, el detalle de las pruebas se muestra en la tabla 22.

Tabla 22. *Etapas de Neutralización y Oxidación (Optimización).*

Código de Muestra	Vol. inicial (l)	Tiempo de Agitación (min)	NEUTRALIZACIÓN				OXIDACIÓN	
			pH inicial	Lechada de Cal Conc. %	Adición ml	Dosis f. g/l	Aire Dosis f. LP M	pH en pulpa
HLC-T12	5,0	5	7,81	10	0,5	0,01	0,2	9,39
HLC-T13	5,0	5	7,81	10	1,0	0,02	0,2	9,63
HLC-T14	5,0	5	7,84	10	2,0	0,04	0,2	10,23
HLC-T15	5,0	10	7,81	10	0,5	0,01	0,2	9,46
HLC-T16	5,0	10	7,82	10	1,0	0,02	0,2	9,70
HLC-T17	5,0	10	7,84	10	2,0	0,04	0,2	10,31

El aire usado para cada una de las pruebas fue de 0,2 LPM para un volumen de 5 litros. Las dosificaciones de cal fueron 0,01; 0,02 y 0,04 g/l, respectivamente.

Después de concluidas las etapas de neutralización-oxidación, se dosificó 1 ppm de floculante MT-127, con el fin de formar flóculos y precipitar las partículas en suspensión aplicando agitación lenta (80 RPM). Los parámetros de trabajo se muestran en la siguiente tabla 22:

Tabla 23. *Etapas de Clarificación (Optimización).*

Código de Muestra	Vol. (l)	Tiempo de Agitación (min)	ETAPA DE CLARIFICACIÓN				
			Conc.	Adición	Dosif.	Turbidez (NTU's)	
			%	ml	mg/l	0'	10'
HLC-T12	5,0	3	0,1	5,0	1,00	30,2	15,2
HLC-T13	5,0	3	0,1	5,0	1,00	31,8	10,6
HLC-T14	5,0	3	0,1	5,0	1,00	32,6	9,7
HLC-T15	5,0	3	0,1	5,0	1,00	45,2	20,2
HLC-T16	5,0	3	0,1	5,0	1,00	52,6	20,0
HLC-T17	5,0	3	0,1	5,0	1,00	59,1	19,1

Una vez transcurrido el tiempo de floculación se dejó reposar por 10 minutos adicionales con el fin de extraer la alícuota de solución sobrenadante para el respectivo análisis por ICP (metales totales y disueltos).

A continuación, en la tabla 24 se presenta los resultados de análisis químico de estas 6 pruebas de neutralización más oxidación comparada con los ECA-3.

Tabla 24. *Contenido de As y Mn en las Pruebas de Optimización.*

Ítems	Tiempo	Pulpa	As(t)	As(d)	Mn(t)	Mn(d)
	min	pH	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L
ECA-3 – D1	-	6,5 – 8,5	0,1	-	0,2	-
COMP. N°02	-	7,8	0,310	0,128	5,178	0,798
HLC-T12	5	9,4	0,008	0,008	0,658	0,555
HLC-T13	5	9,6	0,008	0,008	0,474	0,358
HLC-T14	5	10,2	0,008	0,008	0,199	0,014
HLC-T15	10	9,5	0,008	0,008	0,440	0,423
HLC-T16	10	9,7	0,008	0,008	0,334	0,284
HLC-T17	10	10,3	0,008	0,008	0,066	0,013

Las pruebas desarrolladas optimizando el tiempo como agitación hasta un pH de 10,2-10,3 en un proceso de neutralización-oxidación, tanto el contenido de Mn como del As reportan valores por debajo de los ECA-3.

Los resultados muestran que, considerando la etapa alcalinización - oxidación y pH entre 10,2-10,3; sería suficiente 5 minutos para abatir el manganeso; sin embargo; el contenido de manganeso a los cinco minutos es el doble de los reportados a 10 minutos. Los resultados muestran que, a 5 minutos, la lechada de cal aún falta reaccionar reportando pH 10,2; sin embargo; luego de 10 minutos el pH es alcanza 10,31 siendo este tiempo el óptimo para completar el objetivo de la investigación.

Técnicas de análisis de datos

La técnica usada para el análisis de datos fue mediante un aplicativo estadístico – Minitab para el procesamiento de la información recolectada, los cuales nos permitió predecir información de los puntos más relevantes de estos casos para posteriormente compararlos con el Escenario Base (identificación del problema) y

seleccionar aquella alternativa que sea óptima para la precipitación del manganeso y mitigar impactos descritos en la identificación del problema. También fue necesario una laptop para poder trabajar con el paquete estadístico Minitab, cuaderno de apuntes, materiales de escritorio e impresora.

Se elaboraron cuadros, gráficos, tablas, esquemas, y su análisis de información correspondiente, para los efectos e interacción de factores, análisis de varianza ANAVA, en función del % de remoción de los metales, los cuales son mostrados en el tratamiento estadístico.

Se realizaron pruebas diferentes con cal a diferentes concentraciones y tiempo para determinar una mayor sedimentación del manganeso y los metales pesados, para lo cual se utilizó el diseño experimental factorial 2k.

Un experimento 2k en esta investigación proporcionaron el menor número de ensayos con los cuales se pueden estudiar 3 factores en un diseño factorial completo.

Existen varios casos especiales del diseño factorial, pero el más importante de todos ocurre cuando se tienen k factores, cada uno de ellos a dos niveles. Debido a que sólo hay dos niveles para cada factor, asumimos que la respuesta es aproximadamente lineal en el rango de los niveles elegidos de los factores. El efecto de un factor se define como el cambio en la respuesta que produce un cambio en el nivel del factor. (Gonzalez, 2015).

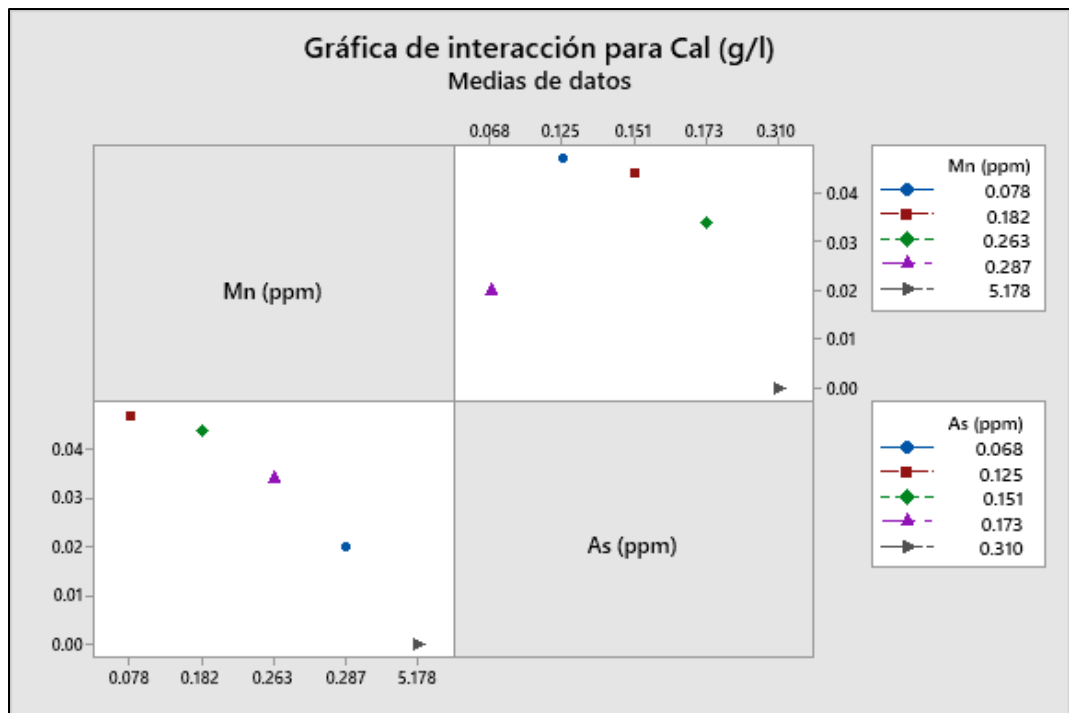
3.9. Tratamiento estadístico.

Con los resultados obtenidos se realizó el tratamiento estadístico, los cuales son mostrados con las siguientes graficas para determinar las variables de mayor influencia sobre la precipitación del manganeso con interacciones del arsénico puesto

que, fue un elemento que incide en el comportamiento de Mn sobre el pH, es por ello durante la investigación para poder optimizar el consumo de cal se utilizó aire como etapa de oxidación.

A continuación, se presenta las interacciones según los resultados de procesamiento de datos, según las pruebas de neutralización descritas. (Ver gráficas 1 y 2).

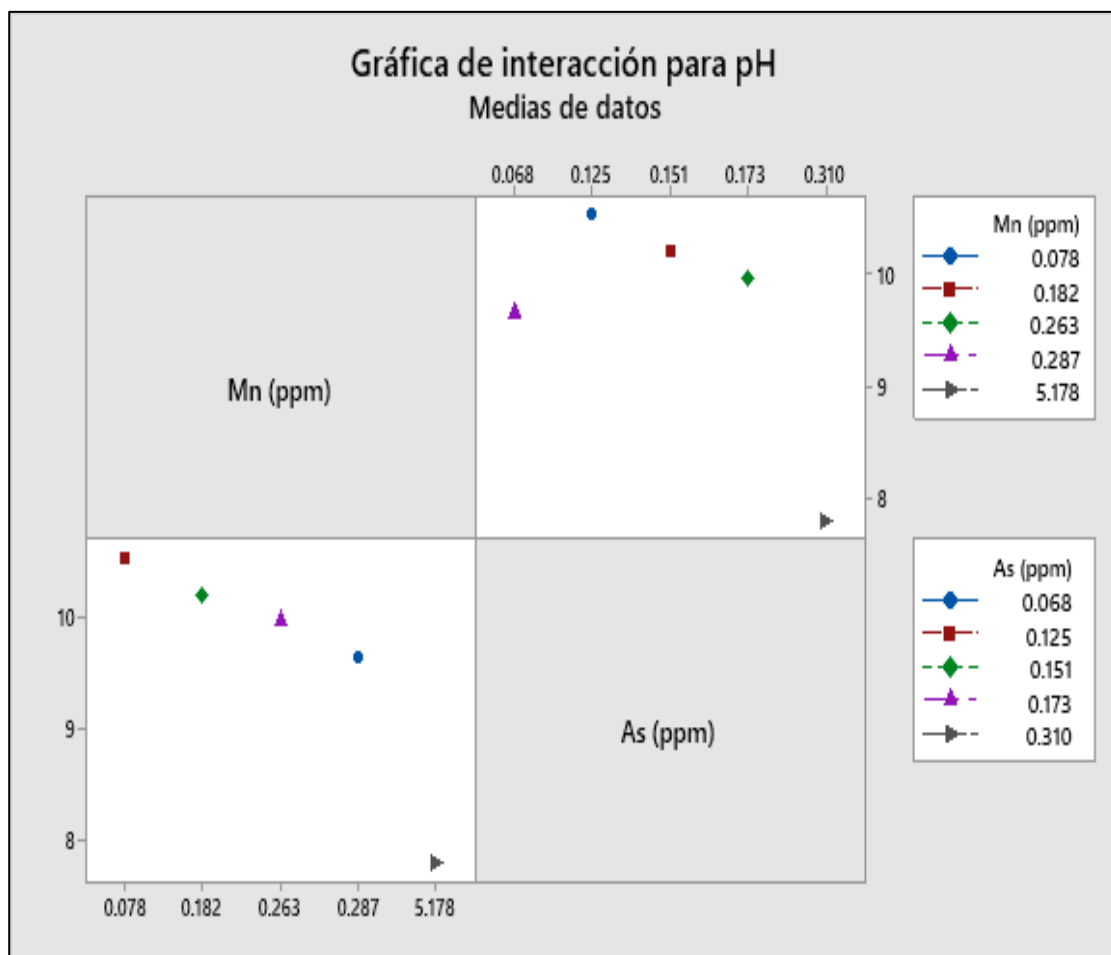
Gráfica 1: *Gráfica de interacción de la cal para el Mn y As – Neutralización.*



Referencia: Minitap, 2019. Elaboración propia.

Según la gráfica 1, podemos observar que el consumo de cal influye significativamente en la remoción del Mn cumpliendo con los ECA-3 (<0.2 ppm Mn), pero con la interacción del As no cumple con la normativa ECA-3 (>0.1 ppm As), lo cual significa que dichas variables no pueden trabajar aisladas.

Gráfica 2: Gráfica de interacción de pH para el Mn y As – Neutralización.



Referencia: Minitap, 2019. Elaboración propia.

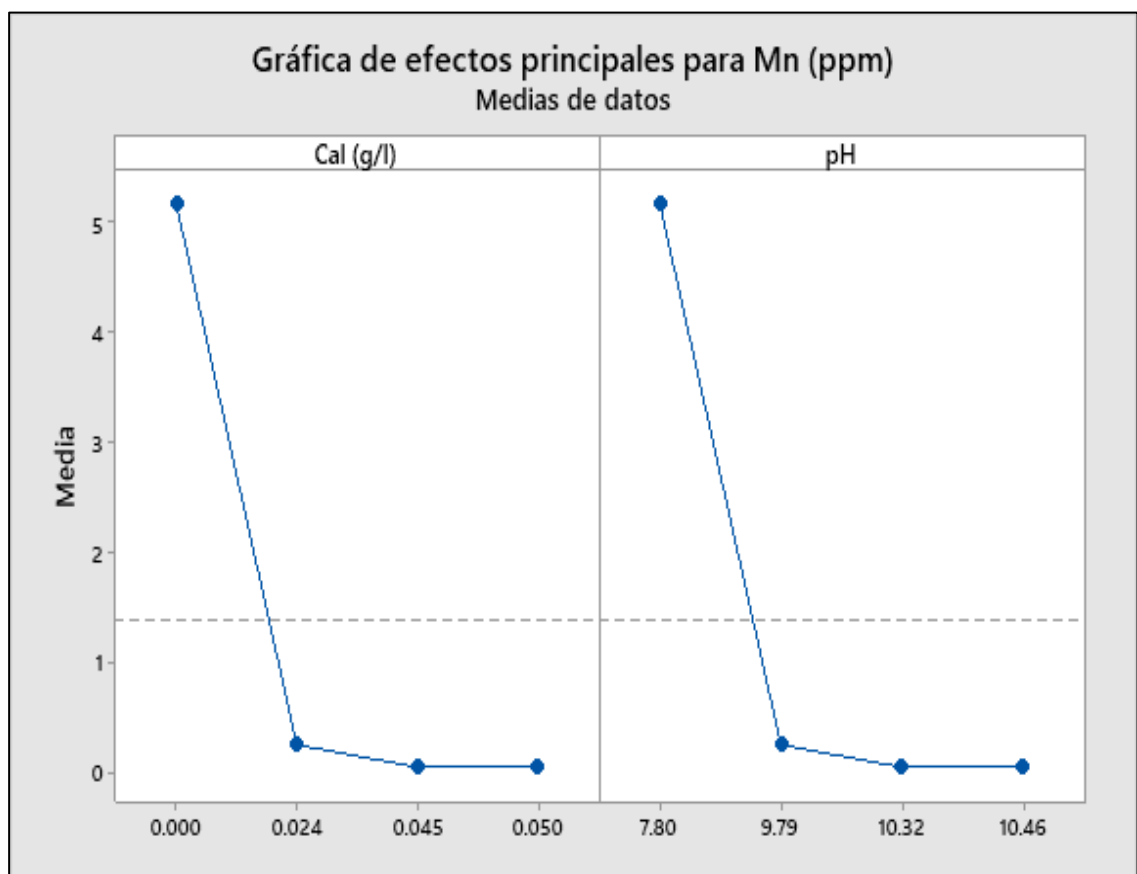
Según la gráfica 2, podemos observar que la variable de influencia significativa sobre el grado de precipitación del manganeso es el pH, mientras que para el As no influye significativamente. El tiempo de residencia y la interacción entre ambos no influyen sobre ello.

Después de esta investigación en las pruebas de neutralización, da la necesidad de utilizar un agente oxidante natural que es el aire para la insuflación en las demás pruebas de neutralización, en este caso más oxidación.

Así mismo, se presenta las interacciones según los resultados de

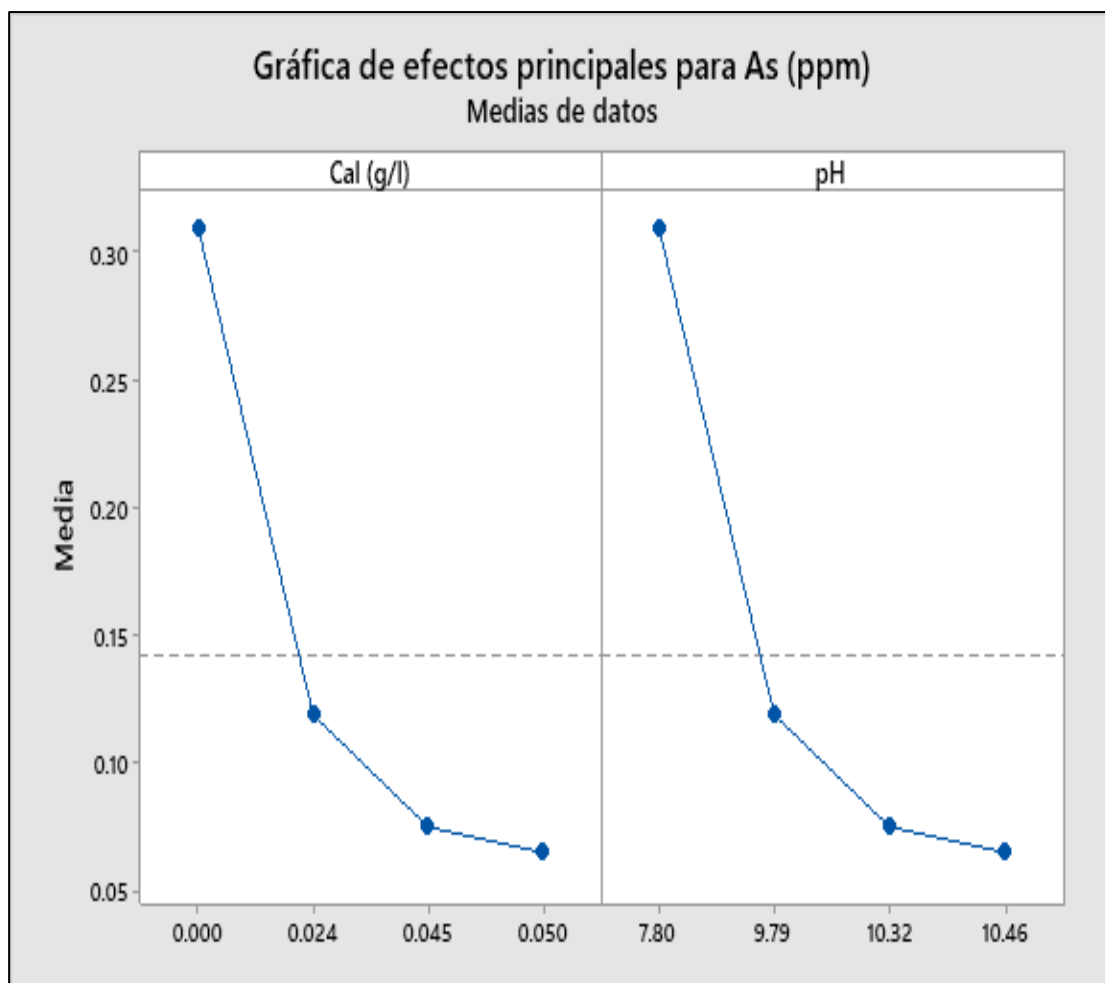
procesamiento de datos, según las pruebas de neutralización más oxidación descritas.
(Ver gráficas 3 y 4).

Gráfica 3: Gráfica de efectos principales para el Mn – Neutralización más Oxidación.



Referencia: Minitab, 2019. Elaboración propia

Gráfica 4: Gráfica de efectos principales para el As – Neutralización más Oxidación.

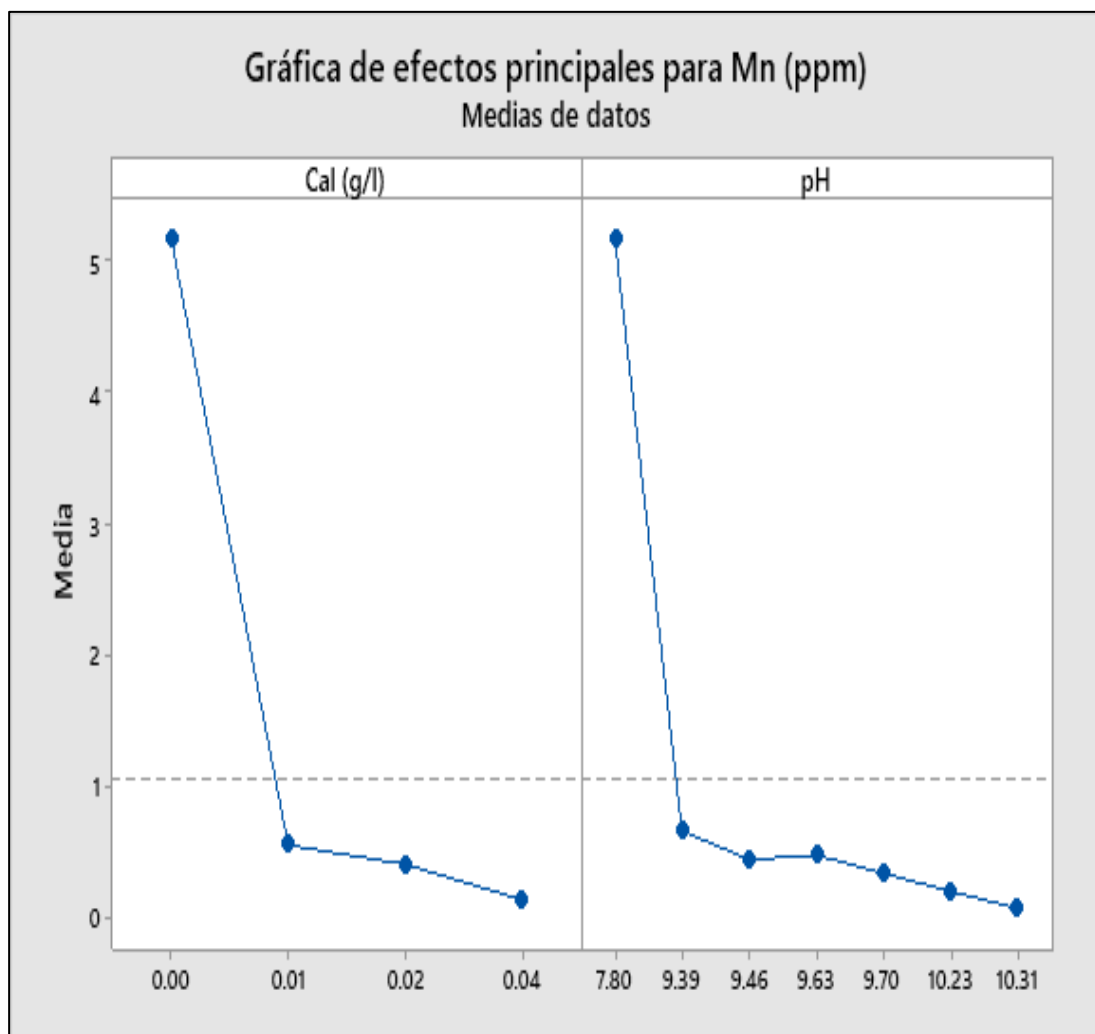


Referencia: Minitap, 2019. Elaboración propia.

Según las gráficas 3 y 4, podemos corroborar que la neutralización con cal y oxidación con aire influye significativamente en el proceso de precipitación de Mn y As cumpliendo con los ECA-3, donde se interpreta que a mayor pH más aire, se incrementa la remoción de Mn y As en la solución tratada.

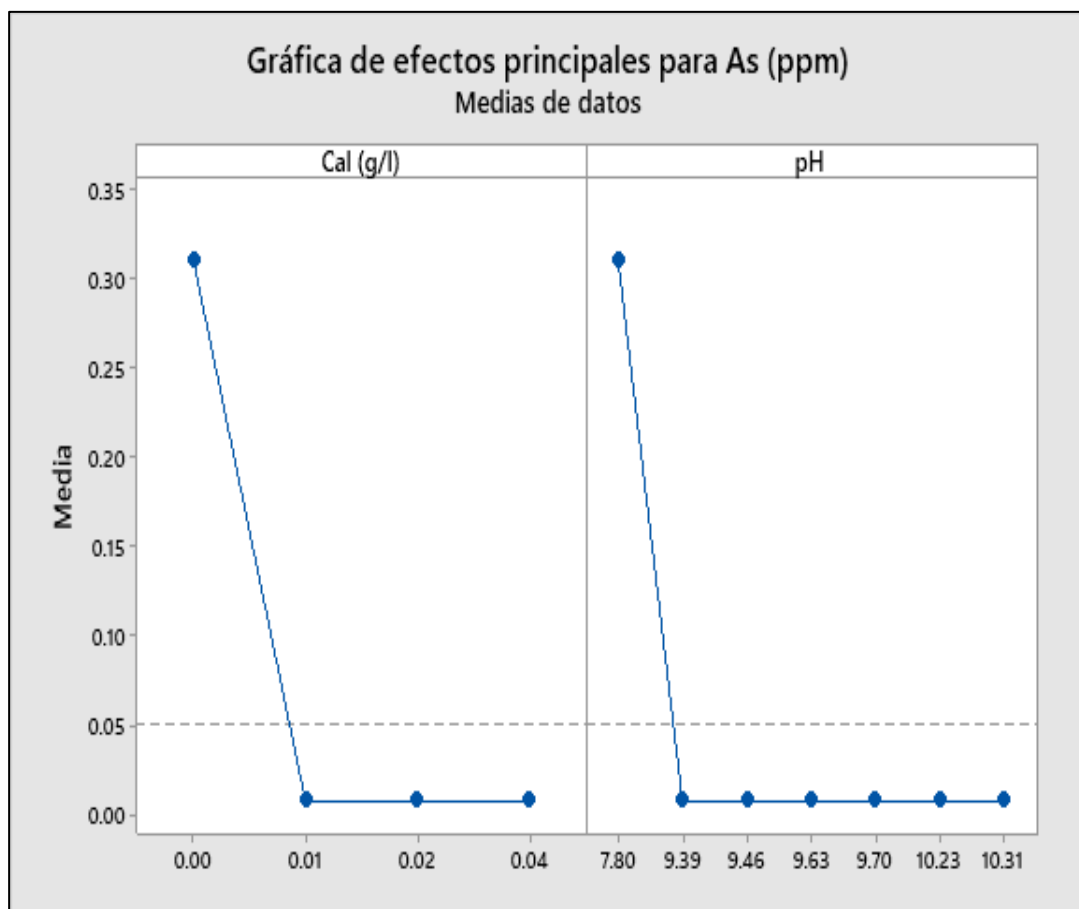
Finalmente, se presenta las interacciones según los resultados de procesamiento de datos, según las pruebas de optimización en neutralización más oxidación descritas. (Ver gráficas 5 y 6).

Gráfica 5: Gráfica de efectos principales para el manganeso – Optimización.



Referencia: Minitap, 2019. Elaboración propia.

Gráfica 6: Gráfica de efectos principales para el arsénico – Optimización.



Referencia: Minitap, 2019. Elaboración propia.

Según las gráficas 5 y 6, al optimizar los consumos de cal y tiempo de residencia se logra corroborar y utilizar 0.04 g/l de cal para llegar a un pH de 10,31 y lograr precipitar el Mn por debajo de los ECA-3 (0,2 mg/l) y con ayuda de 0.2 LPM es necesario el abatimiento del As.

3.10. Orientación ética filosófica y epistémica

Nuestro trabajo de investigación se realizó teniendo en cuenta la planificación y los resultados del proyecto, los cuales tuvieron efectos positivos a la unidad minera Andaychagua, además mantuvo la sostenibilidad respecto a la emisión de efluentes

al medio ambiente esperando que sirva de base de estudio para futuros proyectos. Todo proyecto de investigación debe ser elaborado teniendo en cuenta el anti-plagio y autenticidad.

CAPITULO IV

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1. Descripción del trabajo

Este trabajo de investigación se desarrolló en las instalaciones de laboratorio metalúrgico a partir de la formación del compuesto compuestas por muestras individuales provenientes de la unidad minera Andaychagua, descritas en el Capítulo III.

En este estudio para el tratamiento de efluentes mineros, se desarrollaron pruebas metalúrgicas de neutralización, neutralización más oxidación y de optimización, en las que se incluyeron las etapas de alcalinización, oxidación y clarificación.

En las pruebas de neutralización con cal se logra abatir el Mn excepto el As, lo cual es necesario incluir la inyección de aire, para garantizar por lo menos una concentración mínima de As que cumpla con los ECA-3.

Los reactivos utilizados fueron cal de 80% CaO en la etapa de alcalinización

y el floculante MT-127 para la etapa de clarificación. Así mismo, fue necesario la inclusión de pruebas con aire para a fin de oxidar arsénico de As (III) hasta arseniato (V) y luego ser precipitados en la etapa de alcalinización mediante lechada de cal y cumplir con los ECA-3.

4.2. Presentación, análisis e interpretación de resultados

4.2.1. Presentación de resultados

A continuación, se presentan en las tablas 25, 26 y 27, los resultados donde se detalla los consumos de la cal que son los más influyentes, ya sea en las pruebas de neutralización, neutralización más oxidación y pruebas de optimización.

Tabla 25. Resultados de diseño experimental - Neutralización con cal.

Parámetro	Cal	pH	Tiempo	Mn	As	% Remoción	
	g/l		min	ppm	ppm	Mn	As
ECA-3	-	6,5-8,5	-	0,2	0,1	-	-
Cabeza	-	7,8	0	5,178	0,310	-	-
T03	0,020	9,66	15	0,287	0,168	94,46	78,06
T05	0,034	9,98	15	0,263	0,173	94,92	44,19
T06	0,044	10,22	15	0,182	0,151	96,49	51,29
T07	0,047	10,54	15	0,078	0,125	98,49	59,68

Tabla 26. Resultados de diseño experimental – Neutralización más oxidación.

Parámetro	Cal	Aire	pH	Tiempo	Mn	As	% Remoción	
	g/l	LP M		min	ppm	ppm	Mn	As
ECA-3	-	-	6,5-8,5	-	0,2	0,1	-	-
Cabeza	-	-	7,8	0	5,178	0,310	-	-
T04	0,024	0,4	9,79	15	0,248	0,119	95,21	61,61
T08	0,045	0,4	10,32	15	0,044	0,075	99,15	75,81
T09	0,050	0,4	10,46	15	0,042	0,065	99,19	79,03

Tabla 27. Resultados de diseño experimental – Optimización.

Parámetro	Cal	Aire	pH	Tiempo	Mn	As	% Remoción	
	g/l	LP M			ppm	ppm	Mn	As
ECA-3	-	-	6,5-8,5	-	0,2	0,1	-	-
Cabeza	-	-	7,8	0	5,178	0,310	-	-
T12	0,01	0,2	9,39	5	0,658	0,008	87,29	97,42
T13	0,02	0,2	9,63	5	0,474	0,008	90,85	97,42
T14	0,04	0,2	10,23	5	0,199	0,008	97,88	97,42
T15	0,01	0,2	9,46	10	0,440	0,008	91,50	97,42
T16	0,02	0,2	9,70	10	0,334	0,008	93,55	97,42
T17	0,04	0,2	10,31	10	0,066	0,008	98,73	97,42

4.2.2. Análisis e interpretación de resultados

De las pruebas según diseño experimental neutralización con el uso de cal (Ver tabla 23), en los ratios 0,02; 0,03; 0,04 y 0,05 g/l se llega a pHs de 9,7; 10,0; 10,2 y 10,5, respectivamente, lográndose remover un 94,46%, 94,92%, 96,49% y 98,49% de Mn en el orden dado, los cuales a partir de 0,04 g/l de cal se logra abatir el Mn logrando valores menores a 0,2 según el ECA-3. En cuanto al As el contenido está por encima de los ECA-3 (0,1 mg/l As), los cuales amerita el uso de aire fresco con la finalidad de oxidar el arsénico As (III) hasta Arseniato As (V) y procurar su precipitación mediante la neutralización.

Asi mismo, de las pruebas según diseño experimental neutralización con el uso de cal más oxidación con aire (Ver tabla 24), en los ratios 0,02; 0,04 y 0,05 g/l se llega a pHs de 9,8; 10,3 y 10,5, respectivamente, lográndose remover un 95,21%,

99,15%, y 99,19% de Mn en el orden dado, los cuales a partir de 0,04 g/l de cal se logra abatir el Mn logrando valores menores a 0,2 según el ECA-3; y con el uso de aire también se logra remover un 75,81% As con contenido final de 0,075 mg/l As estando por debajo de los ECA-3 (0,1 mg/l As).

Finalmente, según pruebas según diseño experimental de optimización (Ver tabla 25), en los ratios 0,01; 0,02 y 0,04 g/l se llega a pHs de 9,4; 9,6 y 10,3, respectivamente, lográndose remover un 91,50%, 93,55%, y 98,73% de Mn en el orden dado en un tiempo de agitación de 10 minutos, los cuales se ratifica que a partir de 0,04 g/l de cal (a pH entre 10,2-10,3) se logra abatir el Mn logrando valores menores a 0,2 mg/l Mn según el ECA-3; y con el uso de aire también se logra remover un 75,81% As con contenido final de 0,075 mg/l As estando por debajo de los ECA-3 (0,1 mg/l As).

A continuación, se presenta el consumo de la cal según determinación del problema (Ver tabla 27) para un tratamiento de 1.000 m³/mes y según investigación aplicada (Ver tabla 28).

Tabla 28 Consumo de cal en la PTAR – Andaychagua (Determinación del problema).

Reactivo	Ratio	C. masa	Anual
	Kg/m ³	(kg/mes)	(ton/año)
Cal (69%CaO)	0,1606	160,6	1,9272

Tabla 29. Costo de cal según la investigación aplicada.

Reactivo	Ratio	C. masa	Unitario
	Kg/m ³	(kg/mes)	(ton/año)
Cal (80% CaO)	0,040	40,00	0,48

Se procede a comparar los costos bajo un tratamiento anual de 12.000,00 m³ de agua residual, siendo estos resultados:

- ✓ Determinación del problema Vs Investigación aplicada se logró un ahorro de 1,4472 tn/año en cuanto al consumo de la cal.

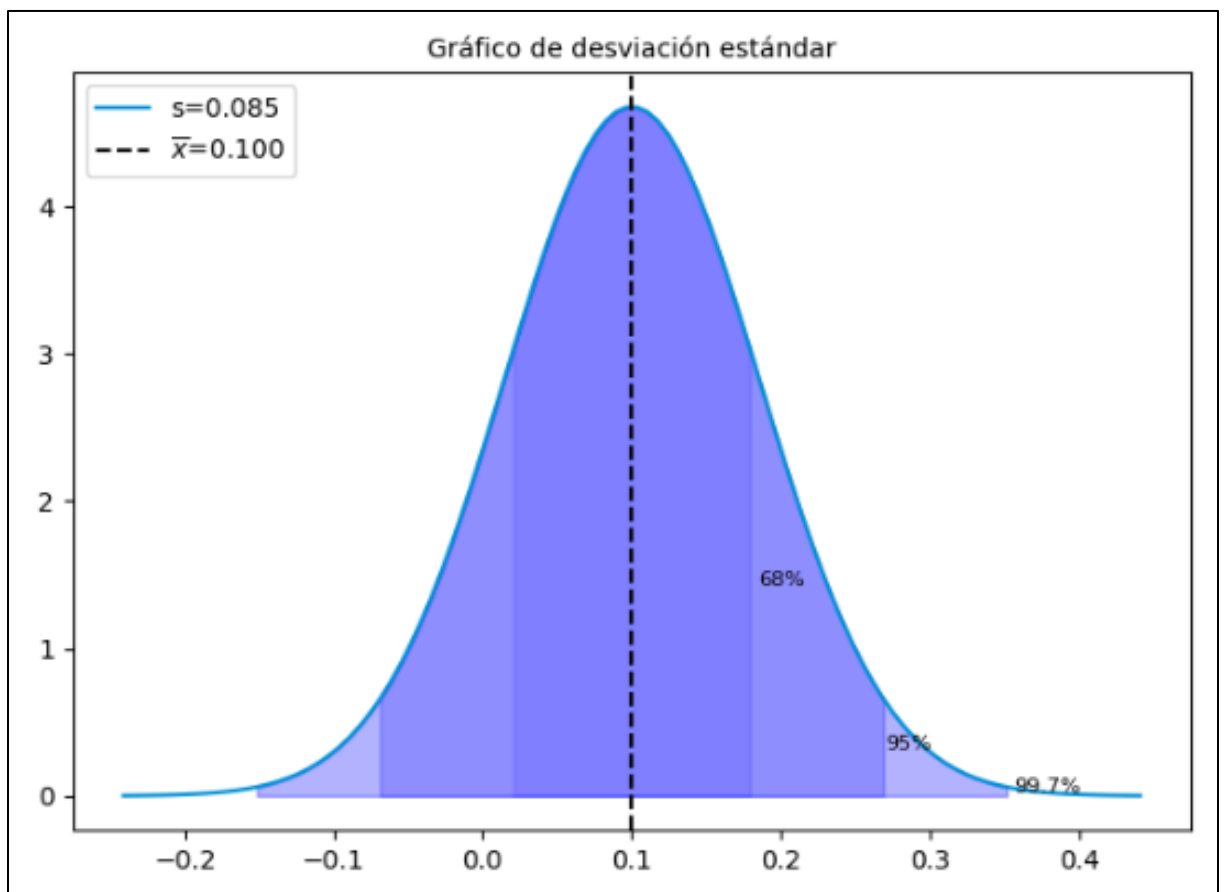
4.3. Prueba de Hipótesis

En la unidad minera Andaychagua se trata un promedio de 12.000,00 m³/año de agua residual con un consumo de cal de 0,1606 kg/m³, siendo el consumo de X = 1,9272 tn/año de reactivos según determinación del problema. Según investigación aplicada se llega a un costo de 0,040 kg/m³ siendo el consumo promedio de X = 0,48 tn/año, con una desviación estándar de s = 0,085. Aun alfa del 5%. Se concluye que:

1. Planteamiento de hipótesis Ho: $\mu=1,9272$ Ha: $\mu\neq1,9272$
2. Determinar estadístico de la prueba t
3. $t_c = 0,48 - 1,9272 / (0,085/ \sqrt{10}) = -1,4472 / 0,0269$
4. $t_c = - 53,84$
5. Determinar el valor de t en tablas de acuerdo con el valor de alfa y los grados de libertad
6. $gl= n-1= 10-1 =9$ para un alfa / 2 de $0.05/2= 0.025$
7. t_t de tablas para 0.025 con 9 gl = 2.262 con $=\text{distr.t.inv}(0.05,9) = 2.262$
8. Interpretación y conclusiones
9. Dado que $t_c= -53,84$ es menor que $t_t= - 2.262$ la Ho se rechaza a un nivel alfa del 5%.
10. Entonces el consumo de cal es de 0,48 tn/año.
11. Intervalo de confianza

12. $IC = Media \pm T_{\alpha/2} \cdot S / \sqrt{n}$
13. $IC = 0,48 \pm 2,262 \cdot 0,085 / \sqrt{10} = (0,42; 0,54)$
14. La media de la hipótesis se encuentra en el intervalo de confianza, SI se rechaza H_0 .
15. Valor P del estadístico de prueba
16. $P = \text{distr.t}(T_c, gl, colas) = \text{distr.t}(53,84; 9; 2) = 0,997$ (Ver gráfica 7).
17. Como el valor P es menor a $\alpha/2$ entonces SI se rechaza H_0 ,
18. El consumo de cal (80% CaO) es de 40 kg/mes.

Gráfica 7: Gráfica de distribución probabilística – Optimización.



Referencia: Simulador Standard Deviation Calculator. Elaboración propia.

4.4. Discusión de resultados

La precipitación del manganeso es un proceso clave en el tratamiento de aguas o efluentes industriales que contienen este metal, y su optimización involucra una serie de variables químicas y operativas. La optimización del consumo de cal está estrechamente vinculada a este proceso, ya que la cal (hidróxido de calcio) se utiliza para ajustar el pH y favorecer la formación de compuestos insolubles de manganeso, como el óxido de manganeso (MnO_2) o el hidróxido de manganeso (Mn(OH)_2).

A continuación, se discuten puntos claves en la discusión de resultados sobre la precipitación de manganeso y la optimización del consumo de cal:

4.4.1. Condiciones del pH y su influencia en la precipitación del manganeso

La precipitación del manganeso depende principalmente del pH de la solución. En general:

A pH bajos, el manganeso tiende a estar en forma de iones Mn^{2+} , lo que dificulta su precipitación.

A pH elevados, el manganeso se oxida a Mn^{3+} o Mn^{4+} , lo que favorece la formación de compuestos insolubles, como el MnO_2 , que puede ser fácilmente removido de la solución.

La cal se usa para aumentar el pH, pero un exceso de cal puede resultar en un consumo innecesario de reactivo y la formación de residuos no deseados.

A demás a diferencia de los antecedentes donde se requerían tiempos de tratamiento más largos o el uso de reactivos complejos, este estudio demostró que con 10 minutos de agitación y $\text{pH} \approx 10,3$, se logra la precipitación completa del Mn y As. A 5 minutos, aunque el pH era similar ($\approx 10,2$), el contenido de Mn era el doble,

evidenciando la importancia del tiempo de contacto.

4.4.2. Efectos del consumo de cal

La optimización del consumo de cal es crucial para mejorar la eficiencia del proceso y mitigar impactos ambientales. Un exceso de cal no solo incrementa el gasto de reactivo, sino que también puede generar grandes cantidades de lodo, lo que hace más costoso el manejo de residuos. Sin embargo, un déficit de cal puede resultar en un pH insuficiente para alcanzar la precipitación completa del manganeso, lo que reduce la eficiencia del proceso, a demás es importante considerar que en comparación a los antecedentes, en nuestro caso se empleó cal al 80% de CaO junto con aire como oxidante natural, sin necesidad de coagulantes adicionales como PAC, lo cual reduce costos y simplifica el proceso operacional.

Para optimizar el uso de cal, es necesario:

- Monitorear el pH en tiempo real para ajustar el consumo de cal de manera precisa.
- Determinar la dosis mínima efectiva de cal que garantice la precipitación completa del manganeso sin exceder los límites necesarios.
- Considerar tratamientos adicionales (como el uso de coagulantes) para mejorar la eficiencia de la precipitación, lo que puede reducir la cantidad de cal requerida.

4.4.3. Cinética de precipitación

La cinética de precipitación del manganeso también juega un papel importante. La velocidad de la reacción de precipitación puede verse afectada por factores como la agitación y el tiempo de contacto. La optimización de estos parámetros, en combinación con el control del pH, puede reducir la cantidad de cal utilizada al asegurar que las condiciones sean las más favorables para la precipitación

completa del manganeso en un tiempo relativamente corto.

4.4.4. Consideración de factores químicos como el arsénico y hierro

En el caso de la unidad minera Andaychagua, la presencia de otros iones metálicos como arsénico en la solución puede interferir con la precipitación del manganeso o requerir ajustes adicionales en las dosis de cal. La presencia de hierro también puede competir con el manganeso por los sitios de precipitación, lo que reduce la eficiencia del proceso.

4.4.5. Evaluación de la eficiencia

- Determinar si el aumento de la dosis de cal mejora significativamente la precipitación del manganeso, sobre todo si es una cal de pureza 80% CaO.
- Considera el impacto ambiental, y la eficiencia en la eliminación del Mn.

CONCLUSIONES

- Según las pruebas realizadas se logra abatir el manganeso hasta un valor de 0,1 ppm Mn logrando estar por debajo de los ECA-3 (0,2 mg/l Mn), donde a medida que se incrementa el pH, el manganeso logra una remoción de hasta un 99% Mn.
- De las pruebas metalúrgicas realizadas al compósito y considerando el proceso de neutralización más oxidación, se logra un consumo de cal igual a 0,04 g/l llegando a pH de 10,3 para la precipitación de metales pesados.
- Se concluye que trabajando con la investigación aplicada nos representa un ahorro de consumo de 0,1206 tn/mes
 - Consumo de cal según determinación del problema = 1,9272 tn/año de cal de pureza 69% CaO.
 - Según la investigación = 0,48 tn/año de cal de pureza 80% CaO.
 - Ratio de consumo de cal de Andaychagua = 0,1606 kg/m³.
 - Ratio de consumo de cal según investigación = 0,040 kg/m³.

Es decir si se trata 12.000,00 m³/año de solución se obtiene un ahorro de 1,4472 tn/año considerando un ahorro respecto a la determinación del problema.
- El tratamiento de neutralización y oxidación es mucho mejor y relevante debido a la disminución del consumo de reactivos sobre todo la cal, logrando así determinar la dosificación óptima (adecuada) en la PTAR de la unidad minera Andaychagua y sobre todo obtener valores por debajo de los ECA-3 según Decreto Supremo N°004-2017-MINAM.

RECOMENDACIONES

- No se puede realizar labores específicas si no se tiene previamente una capacitación de MATPEL.
- Usar equipos de protección personal (respiradores, guantes, lentes, protectores de oídos, etc.), como barrera de protección ante cualquier accidente.
- Realizar pruebas de optimización de consumo de reactivos como floculante en la etapa de clarificación.
- Tener cuidado a la hora de manipular los reactivos, ya que algunos pueden ser nocivos (verificar hojas MSDS).
- Realizar pruebas de estabilidad de lodos a partir de la prueba óptima y cuantificar.
- Realizar la gravedad específica del lodo precipitado.
- Realizar pruebas a mayor escala (prueba en campo), simulando el flujo y condiciones críticas.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Aduvire, O. (1991). Drenaje Ácido de Mina. Generación y Tratamiento. En *Instituto Geológico y Minero de España*.
- Almeciga Adriana, M. M. (2013). *pH, Historia de un concepto. analisis en texto de educacion superior*.
- Badii, M. H., Castillo Rodríguez, M., Wong, A., & Villalpando, P. (2017). Diseños experimentales e investigación científica. *Revista Innovaciones de Negocios*, 4(8), 283–330. <https://doi.org/10.29105/rinn4.8-5>
- Carrasco Díaz, S. (2006). *Metodología de Investigación Científica*.
- Castillo Ungaro, R., Pulido Capurro, V., Cano Coa, D. M., & Olivera Carhuaz, E. (2022). Uso de hipoclorito de sodio para disminuir la concentración de Mn^{2+} en aguas ácidas de mina para el mejoramiento de la calidad del agua del río Yauli, Junín, Perú. *Revista de Investigaciones Altoandinas - Journal of High Andean Research*, 24(3), 208–219. <https://doi.org/10.18271/ria.2022.440>
- Ceballos, C. (2011). Precipitación Química. *Centro De Investigación Y Desarrollo Tecnológico Del Agua*, 1(1), 1–12.
- De la Cruz Lima, Y. (2019). Efecto de la dosificación de la lechada de cal en la remoción del manganeso del agua de mina de la UM Huarón 2018. En *UNIVERSIDAD CONTINENTAL* (Vol. 53, Número 9).
- Definición de remoción - Qué es, Significado y Concepto*. (s/f).
- Flórez, J. M. C. (2011). Clarificación de aguas usando coagulantes polimerizados: Caso del hidroxiclورو de aluminio. *DYNA (Colombia)*, 78(165), 18–27.
- Gonzalez, Y. (2015). *Diseño Factorial 2K*. 283.

Huertas Jara, G. M. (s/f). *Efluentes mineros*.

Jimenez Huallpa, C. C. (2017). Eficiencia en la remoción del tratamiento de aguas ácidas de mina, mediante neutralización activo con lechada de cal de la Unidad Minera Arasi – Puno. En *Universidad Peruana Unión*.

Julio Quicaño. (2019). *UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN AGUSTÍN DE AREQUIPA "EVALUACIÓN DE LA PRESENCIA DE CONCENTRACIÓN DE METALES*.

Loroña-Calderón, F., & Gomez-Lora, W. (2017). Propuesta de tratamiento para la eliminación del manganeso en la Planta de Neutralización de Aguas Ácidas, Victoria-Compañía Minera Volcan S. A. A, Perú. *Cátedra Villarreal*, 5(1), 1–9.
<https://doi.org/10.24039/cv201751183>

Maldonado, V. (2015). *SEDIMENTACIÓN*.

Manganeso (Mn) Propiedades químicas y efectos sobre la salud y el medio ambiente. (s/f).

María Gaitan. (2004). *Metales en agua por Absorción Atómica*. 2–33.

MITECO. (2018). *Fabricación de cal (emisiones de proceso)*. 1–12.

Paolo, L., & Soberón, F. M. (2015). LÍMITES MÁXIMOS PERMISIBLES DE AGUA EN LA ACTIVIDAD MINERAY LA REALIDAD HIDROLÓGICA DEL PERÚ
MAXIMUM PERMISSIBLE LIMITS OF WATER IN MINING ACTIVITY AND
HIDROLOGIC OF PERÚ MAXIMUM PERMISSIBLE LIMITS OF WATER IN
MINING ACTIVITY AND HIDROLOGIC OF PERÚ. En *VOX JURIS* (Vol. 30, Número 2). Perú.

Pérez, E. V. C. y T. G. R. (2016). *PH TEORIA Y PROBLEMAS*.

¿Por qué medir la alcalinidad en el agua potable? | HANNA® instruments México. (s/f).

Quevedo, F. (2011a). La prueba de la hipótesis. *Medwave*, 11(07), 1–3.

<https://doi.org/10.5867/medwave.2011.07.5066>

Quevedo, F. (2011b). La prueba de la hipótesis. *Medwave*, 11(07), 1–3.

<https://doi.org/10.5867/medwave.2011.07.5066>

Sandra Katherine Arismendy. (2020). 1. internacional (1). *Universidad Nacional Abierta y a Distancia UNAD, Problemática ambiental generada por el drenaje ácido de mina en la explotación de yacimientos mineros en Colombia*, 18.

tiempo de residencia | *Oilfield Glossary*. (s/f).

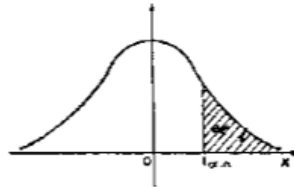
Tucto Ambrosio. (2019). *UNIVERSIDAD NACIONAL DANIEL ALCIDES CARRIÓN FACULTAD DE INGENIERÍA ESCUELA DE FORMACIÓN PROFESIONAL DE INGENIERÍA METALURGICA*.

Ures, P., Jácome, A., & Suárez, J. (2014). *Neutralización de pH*.

ANEXOS

Instrumentos de Recolección de Datos

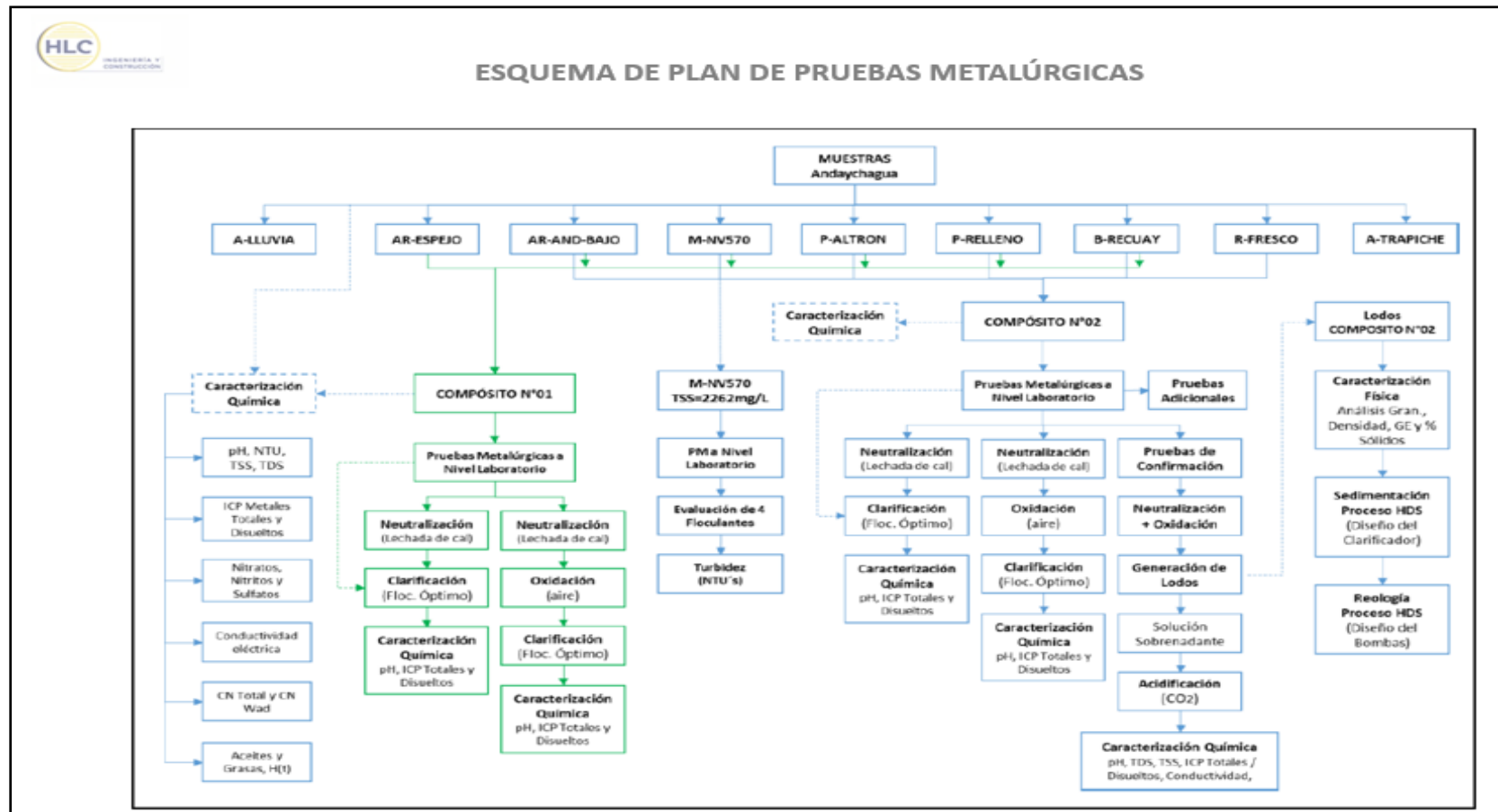
Fotografía 1: Distribución T Student.



$\alpha/2$ df	0,40	0,30	0,20	0,10	0,050	0,025	0,010	0,005	0,001	0,0005
1	0,325	0,727	1,376	3,078	6,314	12,71	31,82	63,66	318,3	636,6
2	0,289	0,617	1,061	1,886	2,920	4,303	6,965	9,925	22,33	31,60
3	0,277	0,584	0,978	1,638	2,353	3,182	4,541	5,841	10,22	12,94
4	0,271	0,569	0,941	1,533	2,132	2,776	3,747	4,604	7,173	8,610
5	0,267	0,559	0,920	1,476	2,015	2,571	3,365	4,032	5,893	6,859
6	0,265	0,553	0,906	1,440	1,943	2,447	3,143	3,707	5,208	5,959
7	0,263	0,549	0,896	1,415	1,895	2,365	2,998	3,499	4,785	5,405
8	0,262	0,546	0,889	1,397	1,860	2,306	2,896	3,355	4,501	5,041
9	0,261	0,543	0,883	1,383	1,833	2,262	2,821	3,250	4,297	4,781
10	0,260	0,542	0,879	1,372	1,812	2,228	2,764	3,169	4,144	4,587
11	0,260	0,540	0,876	1,363	1,796	2,201	2,718	3,106	4,025	4,437
12	0,259	0,539	0,873	1,356	1,782	2,179	2,681	3,055	3,930	4,318
13	0,259	0,538	0,870	1,350	1,771	2,160	2,650	3,012	3,852	4,221
14	0,258	0,537	0,868	1,345	1,761	2,145	2,624	2,977	3,787	4,140
15	0,258	0,536	0,866	1,341	1,753	2,131	2,602	2,947	3,733	4,073
16	0,258	0,535	0,863	1,337	1,746	2,120	2,583	2,921	3,686	4,013
17	0,257	0,534	0,863	1,333	1,740	2,110	2,567	2,898	3,646	3,965
18	0,257	0,534	0,862	1,330	1,734	2,101	2,552	2,878	3,611	3,922
19	0,257	0,533	0,861	1,328	1,729	2,093	2,539	2,861	3,579	3,883
20	0,257	0,533	0,860	1,325	1,725	2,086	2,528	2,845	3,552	3,850
21	0,257	0,532	0,859	1,323	1,721	2,080	2,518	2,831	3,527	3,819
22	0,256	0,532	0,858	1,321	1,717	2,074	2,508	2,819	3,505	3,792
23	0,256	0,532	0,858	1,319	1,714	2,069	2,500	2,807	3,485	3,767
24	0,256	0,531	0,857	1,318	1,711	2,064	2,492	2,797	3,467	3,745
25	0,256	0,531	0,856	1,316	1,708	2,060	2,485	2,787	3,450	3,725
26	0,256	0,531	0,856	1,315	1,706	2,056	2,479	2,779	3,435	3,707
27	0,256	0,531	0,855	1,314	1,703	2,052	2,473	2,771	3,421	3,690
28	0,256	0,530	0,855	1,313	1,701	2,048	2,467	2,763	3,408	3,674
29	0,256	0,530	0,854	1,311	1,699	2,045	2,462	2,756	3,396	3,659
30	0,256	0,530	0,854	1,310	1,697	2,042	2,457	2,750	3,385	3,646
40	0,255	0,529	0,851	1,303	1,648	2,021	2,423	2,704	3,307	3,551
50	0,255	0,528	0,849	1,298	1,676	2,009	2,403	2,678	3,262	3,495
60	0,254	0,527	0,848	1,296	1,671	2,000	2,390	2,660	3,232	3,460
80	0,254	0,527	0,846	1,292	1,664	1,990	2,374	2,639	3,195	3,415
100	0,254	0,526	0,845	1,290	1,660	1,984	2,365	2,626	3,174	3,389
200	0,254	0,525	0,843	1,286	1,653	1,972	2,345	2,601	3,131	3,339
500	0,253	0,525	0,842	1,283	1,648	1,963	2,334	2,586	3,106	3,310
∞	0,253	0,524	0,842	1,282	1,645	1,960	2,326	2,576	3,090	3,291

Referencia: Fotografía propia

Fotografía 2.1 Instrumento de Recolección de datos: Plan de pruebas metalúrgicas



Referencia: Fotografía propia

Fotografía 3: *Recepción de muestras individuales de Andaychagua.*



Referencia: Fotografía propia.

Fotografía 4: *Muestras Individuales para Análisis Químicos.*



Referencia: Fotografía propia.

Fotografía 5: *Formación de compósito.*



Referencia: Fotografía propia.

Fotografía 6: *Toma de alícuotas del compósito.*



Referencia: Fotografía propia.

Fotografía 7: *Preparación de lechada de cal.*



Referencia: Fotografía propia.

Fotografía 8: *Medición de parámetros como pH.*



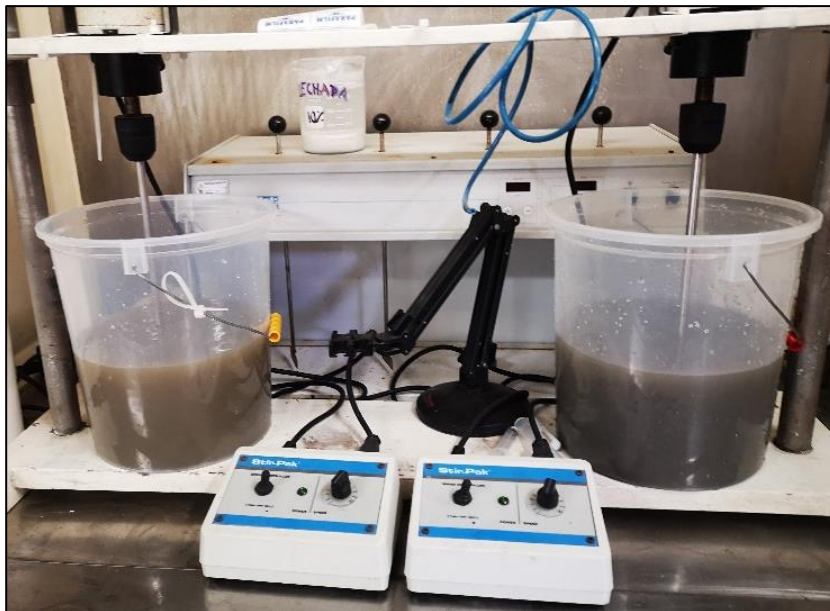
Referencia: Fotografía propia.

Fotografía 9: *Dosificación de lechada de cal.*



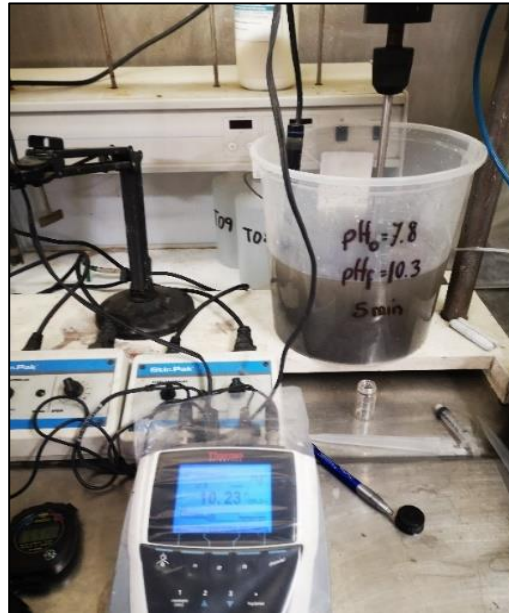
Referencia: Fotografía propia.

Fotografía 10: *Ejecución de pruebas de neutralización*



Referencia: Fotografía propia.

Fotografía 11: Ejecución de pruebas de neutralización más oxidación.



Referencia: Fotografía propia.

Fotografía 12: Clarificación de la solución tratada.



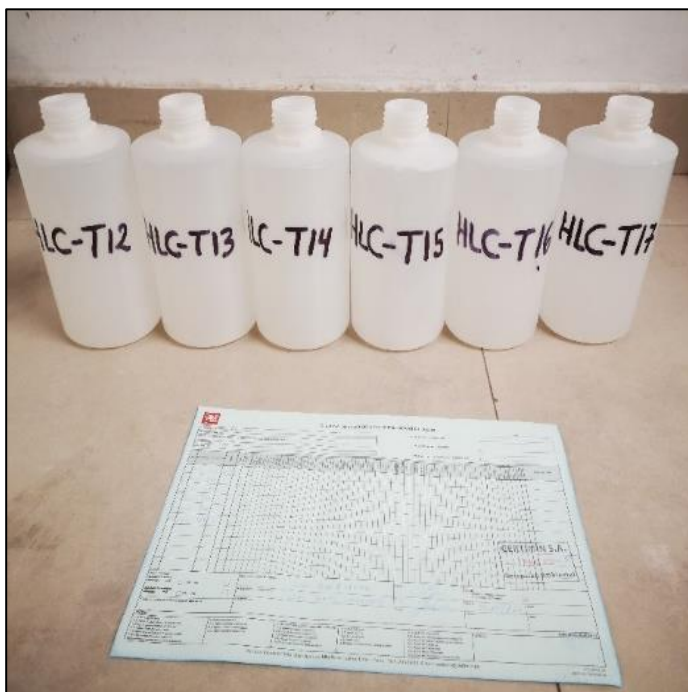
Referencia: Fotografía propia.

Fotografía 13: *Medición de turbidez de la solución clarificada.*



Referencia: Fotografía propia.

Fotografía 14: *Muestras tratadas para análisis químico.*



Referencia: Fotografía propia.