

**UNIVERSIDAD NACIONAL DEL ALTIPLANO
FACULTAD DE INGENIERÍA DE MINAS
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA DE MINAS**



**“RECUPERACIÓN DE SUELOS DE LAS RIBERAS DE
LA LAGUNA CHOQUENE GENERADOS POR LA
CONTAMINACIÓN DE PASIVOS AMBIENTALES
MINEROS EN EL PROYECTO MINERO SILLUSTANI -
MINSUR S.A.”**

TESIS

PRESENTADO POR:

Bach. WILSON DAVID TICONA PARI

PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE:

INGENIERO DE MINAS

PUNO – PERÚ

2018



UNIVERSIDAD NACIONAL DEL ALTIPLANO

**FACULTAD DE INGENIERÍA DE MINAS
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA DE MINAS**

TESIS

“RECUPERACIÓN DE SUELOS DE LAS RIBERAS DE LA LAGUNA
CHOQUENE GENERADOS POR LA CONTAMINACIÓN DE LOS PASIVOS
AMBIENTALES MINEROS EN EL PROYECTO MINERO SILLUSTANI –
MINSUR S.A.”

PRESENTADO POR:

Bach. WILSON DAVID TICONA PARI

PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE:

INGENIERO DE MINAS

APROBADA POR LOS JURADOS:

PRESIDENTE:


Mag. Ing. MARIO SERAFIN CUENTAS ALVARADO

PRIMER MIEMBRO:


Dr. Ing. ROBERTO CHAVEZ FLORES

SEGUNDO MIEMBRO:


M.Sc. Ing. FIDEL HUISA MAMANI

DIRECTOR / ASESOR:


Ing. OWAL ALFREDO VELASQUEZ VIZA

Área : Ingeniería de minas
Tema : Cierre de minas

DEDICATORIA

Dedico este trabajo de investigación con profundo respeto, amor y eterna gratitud:

A mi querido hijo Thiago David y a mi amada Luz quienes son el motor e inspiración de esta tesis.

A mis queridos padres Justo y Virginia como también a mis hermanos(as) quienes son los que me orientaron y apoyaron incondicionalmente en todo momento.

Ticona Pari Wilson David.

AGRADECIMIENTOS

En primer lugar, agradezco a Dios, por concederme salud, bendición, protección, sabiduría y fortaleza para poder cumplir con esta meta de ser Ingeniero de Minas.

A la Facultad de Ingeniería de Minas, Universidad Nacional del Altiplano Puno, a todos los docentes quienes me brindaron sus valiosos conocimientos, experiencias durante mi formación profesional.

Al director de tesis Ing. Owal Alfredo Velásquez Viza y a todos los miembros del jurado de la presente tesis; por las oportunas correcciones y recomendaciones que contribuyeron a mejorar el contenido de la tesis.

ÍNDICE GENERAL

DEDICATORIA.....	ii
AGRADECIMIENTOS	iv
ÍNDICE GENERAL.....	v
ÍNDICE DE FIGURAS	ix
ÍNDICE DE TABLAS	x
ACRÓNIMOS.....	xii
RESUMEN	xi
ABSTRACT	xiii

CAPÍTULO I**INTRODUCCIÓN**

1.1. Descripción del problema	2
1.2. Definición del problema	3
1.3. Limitación de la investigación realizada	3
1.4. Justificación del problema	4
1.5. Antecedentes de la investigación	5
1.6. Objetivos de la investigación	7
1.6.1. Objetivo general	7
1.6.2. Objetivos específicos.....	7

CAPÍTULO II**REVISIÓN DE LITERATURA**

2.1. Marco teórico.....	9
2.1.1. Suelo	9
2.1.2. Propiedades del suelo.....	10
2.1.3. Contaminación de suelos	15
2.1.4. Diseño de la cobertura	17

2.2.	Marco legal.....	21
2.2.1.	Ministerio de Energía y Minas (MEM).....	21
2.2.2.	Ministerio del Ambiente (MINAM).....	23
2.3.	Glosario de términos.....	25
2.3.1.	Drenaje Ácido Mina (DAM).....	25
2.3.2.	Remediación.....	25
2.3.3.	Relaves mineros.....	25
2.3.4.	Suelo industrial/extractivo.....	26
2.4.	Hipótesis.....	26
2.4.1.	Hipótesis general.....	26
2.4.2.	Hipótesis específico.....	26
2.5.	Sistema de variables.....	27
2.5.1.	Variable independiente.....	27
2.5.2.	Variable dependiente.....	27
2.5.3.	Operación de variables.....	28

CAPÍTULO III

MATERIALES Y MÉTODOS

3.1.	Tipo y diseño de investigación.....	29
3.2.	Fases de la investigación.....	29
3.3.	Población y muestra de la investigación.....	30
3.3.1.	Población.....	30
3.3.2.	Muestra.....	30
3.4.	Ubicación y caracterización del área del proyecto.....	31
3.4.1.	Ubicación y acceso del proyecto.....	31
3.4.2.	Clima.....	31
3.4.3.	Contexto histórico.....	32
3.4.4.	Hidrología.....	33

3.4.5.	Geología.....	33
3.4.6.	Suelos	34
3.4.7.	Relaves mineros.....	35
3.5.	Metodología de muestreo de suelos con relaves mineros.....	36
3.5.1.	Técnicas de muestreo	36
3.5.2.	Obtención de las muestras de suelos.....	36
3.5.3.	Requerimiento de seguridad en obtención de muestras	38
3.5.4.	Materiales utilizados en el muestreo	39
3.6.	Técnicas de recolección de datos	40
3.7.	Técnicas de procesamiento de información	40
3.8.	Descripción de muestras de suelos contaminados	40

CAPÍTULO IV

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1.	Caracterización física y química de suelos contaminados	42
4.1.1.	Textura	42
4.1.2.	Humedad.....	44
4.1.3.	pH.....	45
4.1.4.	Carbono orgánico.....	46
4.1.5.	Determinación de materia orgánica (m.o.)	47
4.1.6.	Evaluación del potencial de generación del DAR.....	49
4.2.	Determinación de metales pesados	52
4.2.1.	Arsénico (As).....	54
4.2.2.	Bario (Ba)	55
4.2.3.	Cadmio (Cd)	57
4.2.4.	Cromo VI (Cr)	58
4.2.5.	Mercurio (Hg)	60
4.2.6.	Plomo (Pb)	62

4.2.7.	Consideraciones.....	63
4.3.	Diseño de la cobertura	64
4.3.1.	Estimado de cantidades	67
4.3.2.	Revegetación	68
4.4.	Evaluación de suelos sustituidos.....	69
4.4.1.	Calicatas.....	69
4.4.2.	Ensayos geoquímicos	70
	CONCLUSIONES	73
	RECOMENDACIONES	75
	REFERENCIAS.....	76
	ANEXOS	81

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1: Distribución de 165 días de precipitación.....	19
Figura 2.2: Modelo geométrico de columna, materiales y mallas de elementos finitos para el diseño de la cobertura con pendiente menor a 4%.....	20
Figura 2.3: Modelo geométrico de columna, materiales y mallas de elementos finitos para el diseño de la cobertura con pendiente mayor a 4%.....	20
Figura 3.1: Vista panorámica de la laguna Choquene.....	35
Figura 3.2: Partición de muestras.....	36
Figura 3.3: Muestreo de suelos contaminados detallado.	38
Figura 4.1: Contenido de materia orgánica.	48
Figura 4.2: Potencial neto de neutralización	51
Figura 4.3: Contenido de arsénico en suelos muestreados.	55
Figura 4.4: Contenido de bario en los suelos contaminados.....	56
Figura 4.5 contenido de cadmio en los suelos contaminados	58
Figura 4.6: Contenido de cromo en los suelos contaminados.....	60
Figura 4.7: Contenido de mercurio en los suelos contaminados.....	61
Figura 4.8: Contenido de plomo en los suelos contaminados.....	63
Figura 4.9: Vectores de velocidad de agua y saturación para 165 días de análisis cobertura natural.	65
Figura 4.10: Percolación de agua hacia el depósito de relaves colapsados de la cobertura natural.	66
Figura 4.11: Perfil de saturación de la cobertura natural.....	66

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2.1: Criterios de evaluación de un suelo con respecto a su pH.....	12
Tabla 2.2: Interpretación del contenido de materia orgánica en suelo.	15
Tabla 2.3: Temperatura promedio mensual.....	19
Tabla 2.4: Propiedades de los materiales	21
Tabla 2.5: Estándares de calidad ambiental para suelo	24
Tabla 2.6: Operación de variables.....	28
Tabla 3.1: Accesibilidad al área de estudio.	31
Tabla 3.2: Precipitación en 24 hr. para diferentes periodos de retorno	33
Tabla 3.3: Cantidad mínima de muestras.....	37
Tabla 3.4: Características de los puntos de muestreo (calicatas).	41
Tabla 4.1: Resumen de ensayos de clasificación de suelos.	43
Tabla 4.2: Porcentaje de humedad en los suelos muestreados	44
Tabla 4.3: Valores de reacción del suelo (pH).....	45
Tabla 4.4: Resultados de laboratorio de análisis de carbono.....	46
Tabla 4.5: Frecuencias del contenido de materia orgánica.	47
Tabla 4.6: Caracterización acido/base de los relaves mineros lag. Choquene.	50
Tabla 4.7: Frecuencias del potencial neto de neutralización	51
Tabla 4.8: Estadísticos descriptivos para el contenido de metales pesados. ...	53
Tabla 4.9: Resultados de las concentraciones de arsénico	54
Tabla 4.10: Resultados de las concentraciones de bario	56
Tabla 4.11: Resultados de las concentraciones de cadmio	57
Tabla 4.12: Resultados de las concentraciones del cromo	59
Tabla 4.13: Resultados de las concentraciones del mercurio	61
Tabla 4.14: Resultados de las concentraciones del plomo.	62

Tabla 4.15: Diseño de cobertura natural	65
Tabla 4.16: Balance hídrico de la cobertura natural para 165 días.	67
Tabla 4.17: Espesores de las capas de las riberas de la laguna Choquene. ...	68
Tabla 4.18: Espesores y volúmenes de los materiales naturales.....	68
Tabla 4.19: Resumen de calicatas muestreadas.....	70
Tabla 4.20: Resultados de análisis balance acido base (ABA)	71
Tabla 4.21: Resultados de análisis de pH	72

ACRÓNIMOS

- As Arsénico
- Ba Bario
- Cd Cadmio
- Cr Cromo
- DAM Drenaje Ácido Mina.
- DAR Drenaje Ácido Roca.
- D.S. Decreto Supremo
- ECA Estándares de Calidad Ambiental.
- ERSA Evaluación de Riesgos a la Salud y al Ambiente.
- Hg Mercurio
- LGA Ley General del Ambiente.
- LMP Límites Máximos Permisibles.
- INDECOPI Instituto Nacional de Defensa de La Competencia y de la
Protección de la Propiedad Intelectual.
- MD Muestreo Detallado.
- MEM Ministerio de Energía de Minas.
- m.o Materia Orgánica.
- MINAM Ministerio del Ambiente.
- PA Potencial de Acidez.
- Pb Plomo
- PAM Pasivos Ambientales Mineros.
- pH Potencial de Hidrógeno
- PN Potencial de Neutralización.
- PNN Potencial Neto de Neutralización.
- USDA United States Department of Agriculture
- UTM Universal Transverse Mercator.
- WGS84 Sistema Geodésico Mundial 1984

RESUMEN

La extracción minera en el área del estudio de investigación se produjo desde hace tres décadas, provocando disturbios al medioambiente, generando suelos con limitaciones físicas y químicas. El presente estudio titulado; “Recuperación de suelos de las riberas de la laguna Choquene generados por la contaminación de pasivos ambientales mineros en el proyecto minero Sillustani - Minsur S.A.” realizado en el distrito de Quilcapunco, provincia de San Antonio de Putina, departamento de Puno, cuyo objetivo es recuperar los suelos impactados por los pasivos ambientales mineros de las riberas de la laguna Choquene mediante la sustitución de suelos, asegurando su estabilidad física y química. El tipo de investigación es cuantitativa, en las tareas de investigación propuesta en el presente estudio, se extrajeron quince muestras de suelos con relaves mineros. Se determinó la generación de DAR (los resultados fluctúan un valor PNN mínimo de $-134.6\text{kg CaCO}_3/\text{ton}$ y un máximo de $-1.9\text{kg CaCO}_3/\text{ton}$, el 93% de las muestras si producen DAR, mientras que el 6.7% de muestras están en el rango de incertidumbre) y las concentraciones de metales pesados (la concentración máxima de arsénico fue 326 ppm, bario 640 ppm, cadmio 1.91 ppm, cromo 38 ppm, mercurio 2.98 ppm y plomo 851 ppm; siendo arsénico y cromo la que se encuentra por encima, mientras que bario, cadmio, mercurio y plomo se encuentran por debajo de los estándares de calidad ambiental para suelos). Debido a este problema se evacuará el material contaminante, lo cual permitirá la recuperación de los suelos impactados por pasivos ambientales mineros de las riberas de la laguna Choquene mediante la sustitución de suelos, de esta forma asegurar la estabilidad física y química. Al final del estudio se extrajeron tres muestras de los suelos sustituidos con la finalidad de probar la

eliminación del drenaje ácido mina de acuerdo a los estándares de calidad ambiental. Logrando tener resultados favorables, ahora los suelos remediados no generan drenaje ácido mina (PNN mínimo 1.458 y máximo de 3.402) y los metales pesados se encuentran por debajo del rango admisible de las normas peruanas.

Palabras Clave: Recuperación de suelos, contaminación de suelos, relaves mineros, estabilidad física y química, calidad ambiental.

ABSTRACT

The mining extraction in the area of the research study occurred three decades ago, causing disturbances to the environment, generating soils with physical and chemical limitations. The present study entitled; "Recovery of soil from the shores of the Choquene lagoon generated by the pollution of mining environmental liabilities in the Sillustani - Minsur SA mining project" carried out in the district of Quilcapunco, province of San Antonio de Putina, department of Puno, whose objective is to recover the soils impacted by the mining environmental liabilities of the shores of the Choquene lagoon by replacing soils, ensuring their physical and chemical stability. The type of research is quantitative, in the research tasks proposed in the present study, fifteen soil samples were extracted with mine tailings. The generation of DAR was determined (the results fluctuate a minimum PNN value of $-134.6\text{kg CaCO}_3/\text{ton}$ and a maximum of $-1.9\text{kg CaCO}_3/\text{ton}$, 93% of the samples if they produce DAR, while 6.7% of samples are in the range of uncertainty) and heavy metal concentrations (the maximum concentration of arsenic was 326 ppm, barium 640 ppm, cadmium 1.91 ppm, chromium 38 ppm, mercury 2.98 ppm and lead 851 ppm, being arsenic and chromium the one found above, while barium, cadmium, mercury and lead are below the environmental quality standards for soils). Due to this problem the polluting material will be evacuated, which will allow the recovery of impacted soils due to mining environmental liabilities of the shores of the Choquene lagoon through the substitution of soils, in this way to ensure the physical and chemical stability. At the end of the study, three samples of the replaced soils were extracted in order to prove the elimination of the mine acid drainage according to the environmental quality standards. Achieving favorable results, now the remediated soils do not

generate acid mine drainage (minimum PNN 1,458 and maximum of 3,402) and heavy metals are below the admissible range of Peruvian standards.

Keywords: Soil recovery, soil contamination, mining tailings, physical and chemical stability, environmental quality.

CAPÍTULO I

INTRODUCCIÓN

El proyecto minero Sillustani S.A. debido a la explotación desmesurada ha afectado áreas relativamente pequeñas, resultando impactado el medio ambiente, lo que hace que la contaminación medioambiental derivada de estas actividades constituya un problema ambiental.

Los suelos de las riberas de la laguna Choquene, están contaminados con relaves de actividades minero - metalúrgicos desde hace más de tres décadas, la liberación de metales pesados a lo largo de las riberas de la laguna Choquene ocurre, a través del drenaje ácido de mina (DAM) y erosión de desechos en los depósitos de relaves, que se encuentra ubicado aguas arriba de la laguna Choquene. Lo que produce la alteración de los suelos circundantes, incluyendo grandes procesos de acidificación, de igual forma en estos espacios alterados existe una deficiencia de nutrientes, ausencia de cobertura vegetal, pérdida de la estructura física del suelo y lixiviación de metales hacia las fuentes de agua (laguna Choquene). Para recuperar los suelos contaminados con pasivos ambientales (relaves mineros) se ha realizado mediante la sustitución de suelos iniciando con la excavación y remoción del suelo contaminado, para sustituir con

suelos de características físicas y químicas basados en los estándares de calidad ambiental para suelos y el proyecto de cierre de pasivos ambientales del proyecto minero Sillustani. Al final del estudio se logró la recuperación del suelo contaminado de acuerdo a los estándares de calidad ambiental (ECA), para suelos industriales/extractivos, la estabilización del drenaje ácido y metales pesados.

1.1 Descripción del problema

El proyecto minero Sillustani (Regina Palca 11), ha desarrollado una actividad minera convencional a pequeña escala generando problemas ambientales en la zona, sin tener un plan de cierre de mina. Los residuos de la antigua actividad minera contienen minerales, materiales, etc. que producen un impacto negativo en el área de estudio. Los relaves mineros al estar expuestos en la superficie y sin control ambiental, generan contaminación a los suelos de las riberas de la laguna Choquene constituyendo riesgo permanente al ambiente y a la salud de las personas. En el proyecto minero Sillustani se ha generado impactos ambientales por la generación de Drenaje Acido Mina (DAM) con presencia de metales pesados que son materia del presente estudio de investigación. La mayoría de dichos impactos ambientales es resultado de operaciones mineras anteriores (relaves mineros).

Concluyéndose que el producto de las actividades mineras generó pasivos ambientales mineros, ya sea por desconocimiento, negligencia, o por accidentes a lo largo de su historia, los cuales afectan la calidad ambiental del agua, el suelo y el aire.

1.2 Definición del problema

Siendo el proyecto Sillustani una mina trabajada hace tres décadas, la contaminación de suelos en las riberas de la laguna Choquene es evidente que ha ocasionado graves daños al medio ambiente y en la salud pública; fue después de una década de explotación que los problemas de contaminación de suelos de las riberas de la laguna Choquene se hicieron más notorios y se vio con la necesidad de tomar medidas para preservar el entorno natural y humano de la zona (generación de drenaje ácido mina).

Por todos los problemas ambientales producidos por los derrames de relaves mineros o depositados en lugares no adecuados con presencia de agentes contaminantes requiriendo como prioridad implementar medidas para manejar ambientalmente los residuos mineros, para el tratamiento adecuado de suelos contaminados en las riberas de la laguna Choquene a bajo costo, con rapidez y mayor efectividad.

1.3 Limitación de la investigación realizada

El estudio tiene algunas limitaciones que influyeron en los resultados de la investigación que no afectan su desarrollo. Se considera que cumple los objetivos propuestos, algunas limitaciones que se tuvo son:

Primero, no se consideró la posibilidad de que pudiera resultar rentable aprovechar económicamente los minerales contenidos en relaves y desmontes que en consecuencia la empresa privada pudiera estar interesada en su aprovechamiento y recuperación.

Segundo, se ha limitado la recuperación a un plazo arbitrario, el cual genera un obstáculo para que los proyectos que requieran un mayor tiempo de aprovechamiento para resultar económicamente viable, sean asumidos por la empresa privada.

Tercero, entre otras razones, que consideramos como inadecuada para cumplir su finalidad principal, consistente en neutralizar los riesgos que generan los pasivos ambientales mediante su recuperación.

1.4 Justificación del problema

La actividad minera ha estado asociado no solo al desarrollo de una región sino también al apelativo de la actividad contaminante que a veces ha ocasionado cambios irreversibles en el medio ambiente en que se desarrolló, al día de hoy la población ha heredado el daño ambiental no gestionado generado por la actividad minera inactiva abandonada (pasivos ambientales mineros) poniendo en riesgo al ambiente, la salud y calidad de vida de los pobladores. La tesis denominada “Recuperación de suelos de las riberas de la laguna Choquene generados por la contaminación de pasivos ambientales mineros en el proyecto minero Sillustani - Minsur S.A.”, tiene como fin contribuir a la empresa minera Sillustani S.A., referente a la recuperación de suelos contaminados, el trabajo permitirá asegurar la estabilidad física y química y evitar la generación de drenaje ácido roca en las riberas de la laguna Choquene

La metodología de recuperación de suelos contribuirá al cierre adecuado de pasivos ambientales-mineros.

1.5 Antecedentes de la investigación

Machacca (2013), en su artículo de investigación. “Determinación de los metales pesados en la laguna Choquene, Quilcapunco-Putina-Puno”, concluye que en el resultado de las investigaciones realizadas en la laguna Choquene y suelos actuales del proyecto minero Sillustani (antiguamente mina Regina Palca 11) y cuenca abajo no se encuentran restaurado, ni realizado en plan de cierre de mina, la concentración de los metales pesados caracterizados en los escombros y los diques cola; es Cu (0.40 – 0.08 mg/l), As (1.40 – 2.50 mg/l), Pb (0.08 – 0.12 mg/l), Fe (0.01 – 0.60 mg/l) y Ag (0.00 – 0.02 mg/l). Mientras que las concentraciones anómalas de Cu (24.5 ppm), Fe (10.6 ppm), Pb de 27.6 ppm, As (62.5 – 1410 ppm), minerales que son responsables de generar el drenaje ácido de mina. Las concentraciones analizadas en la laguna son altas y generan toxicidad en las proximidades de la laguna Choquene y cuenca abajo de la comunidad de Condoraque Quilcapunco Putina. El comportamiento y la estabilidad geoquímica de los metales pesados en la mina no se mantienen estable por lo cual genero efectos de contaminación actualmente en la zona de pantano; las oxidaciones de los metales pesados se encuentran en la fase tres, por condiciones de estabilidad geoquímica que no son favorables.

Alcántara (2015), en su artículo de investigación titulado. “Recuperación de suelos de relaves mineros para convertirlos en áreas verdes en la planta piloto metalúrgica-Yauris-UNCP”, indica que es posible recuperar los suelos de relaves para destinarlos a otras actividades pero a largo plazo, previa estabilización física, química y biológica, a un costo relativamente bajo; Concluye que los resultados de materia orgánica nos indican que los relaves son suelos con un

contenido de materia orgánica muy bajo (0.36%) por lo que se le da una valoración de extremadamente pobre. Con la aplicación del 5% de humus mejora el porcentaje de materia orgánica a 0.88% y con 10% de humus se eleva a 1.09%. Ambos se presentan en un nivel de pobre a moderadamente pobre de materia orgánica respectivamente.

Puga et al. (2006), en su obra titulado. “Contaminación por metales pesados en suelo provocado por la industria minera”, realizaron estudios de la contaminación por metales pesados en el suelo, provocados por la industria minera encontrando altas concentraciones de As, Pb, Zn y Cd encontrándose a diferentes distancias de la presa de jales, de 300 a 600m se encontraron concentraciones más altas a mayores profundidades y concluye que las concentraciones de los elementos estudiados sobrepasan los rangos propuestos por diferentes agencias internacionales, por lo que es necesario la remediación de este tipo de suelos afectados.

Romero et al (2008), en su artículo de investigación titulado. “Estudio de metales pesados en el relave abandonado de Ticapampa”, concluye que de acuerdo a los elementos encontrados en el análisis geoquímico del relave de Ticapampa, se puede deducir que la mineralogía trabajada en la zona corresponde a yacimientos polimetálicos y la asociación mineralógica del relave con el silicio (superior a 80%) permitirá la encapsulación de los metales pesados, de este modo se remedia el relave, puesto que esta encapsulación natural determinara la mitigación de la generación de aguas acidas que contaminen la cuenca del rio Santa.

Li (2013), en su tesis de pregrado. “Medición del potencial de generación de agua ácida para un relave en la zona central del Perú y sus necesidades de neutralización”, realiza la medición de potencial de generación de agua ácida en relaves mineros en la zona central del Perú, donde indica que las especies generadoras de ácido son aquellos que corresponden a sulfuros, sus resultados indican que dos de las muestras tomadas tienen escasas posibilidades de generar drenaje ácido debido a que la predominante presencia de especies básicas, en alguna medida garantiza la posible neutralización del ácido que genere. En cambio, en las otras dos muestras hay posibilidades de generación de ácido por la predominancia de las especies sulfuradas. Concluye que en la zona geológica donde realizó el estudio, los elementos químicos con mayores probabilidades de contaminación ambiental son: hierro, arsénico, plomo, cobre, cadmio y eventualmente el manganeso.

1.6 Objetivos de la investigación

1.6.1 Objetivo general

Recuperar los suelos impactados por los pasivos ambientales mineros de las riberas de la laguna Choquene mediante la sustitución de suelos, asegurando su estabilidad física y química.

1.6.2 Objetivos específicos

- Determinar las características físicas y químicas de los suelos impactados en las riberas de la laguna Choquene en el proyecto minero Sillustani - Minsur S.A.

- Determinar las concentraciones de metales pesados en los suelos impactados en las riberas de la laguna Choquene según los estándares de calidad ambiental del suelo, en el proyecto minero Sillustani - Minsur S.A.
- Determinar el modelo de cobertura para la sustitución del suelo.
- Evaluar los suelos sustituidos de la concentración de metales pesados y drenaje ácido mina.

CAPÍTULO II

REVISIÓN DE LITERATURA

2.1 Marco teórico

2.1.1 Suelo

Es la cubierta superficial de la mayoría de la superficie continental de la tierra. Es un agregado de minerales no consolidados y de partículas orgánicas producidas por la acción combinada del viento, el agua y los procesos de desintegración orgánica.

Los suelos cambian mucho de un lugar a otro. La composición química y la estructura física del suelo en un lugar dado, están determinadas por el tipo de material geológico del que se origina la cubierta vegetal, por la cantidad de tiempo en que ha actuado la meteorización, por la topografía y por los cambios artificiales resultantes de las actividades humanas. Las variaciones del suelo en la naturaleza son graduales, excepto las derivadas de desastres naturales. Sin embargo, el cultivo de la tierra priva al suelo de su cubierta vegetal y de su

protección contra la erosión del agua y del viento, por lo que estos cambios pueden ser más rápidos (Bustamante, 2007).

2.1.2 Propiedades del suelo

2.1.2.1 Propiedades físicas y químicas del suelo

a) Textura

La textura del suelo es un factor importante para el movimiento de los metales pesados, estos suelos contaminados con relaves mineros se clasificaron de acuerdo al tamaño de partículas principalmente por tres componentes: grava, arena y finos, con las cantidades relativas de cada tipo de partícula mineral se determinó la textura del suelo lo cual tiene un impacto en las propiedades física, químicas de este (Fernández et al. 2006).

Las partículas del suelo se conocen como arcilla, limo y arena, cada una se subdivide en fina, media y gruesa. Su fraccionamiento sigue una escala logarítmica con límites entre 0.002 y 2mm con un valor intermedio de 0.063mm. la arcilla es menor de 0.002mm, el limo entre 0.002 y 0.063mm y la arena entre 0.063 y 2mm. Grava de 2 a 20mm y piedra mayor de 20mm.

La textura influye como factor de fertilidad y en la habilidad del suelo para lograr altos rendimientos en los cultivos agrícolas.

Como criterio para estimar el potencial productivo de un suelo se toma en cuenta el porcentaje de partículas menores de 10 micrómetros (limo fino + arcilla) y se considera óptimo 40%, en reducido porcentaje se disminuye la capacidad de campo. Mientras que en alto porcentaje se deteriora la capacidad de aireación del suelo.

Clasificación textural del suelo

Arcilloso > 40% arcilla poros pequeños.

Limoso > 45% limo porosidad equilibrada.

Arenoso > 50% arena poros grandes.

b) Humedad

El agua es esencial para todos los seres vivos porque en forma molecular participa en varias reacciones metabólicas celulares, actúa como un solvente y portador de nutrimentos desde el suelo hasta las plantas y dentro de ellas. El contenido de agua en el suelo puede ser benéfico, pero en algunos casos también perjudiciales. El exceso de agua en los suelos favorece la lixiviación de sales y de algunos otros compuestos; por lo tanto, el agua es un regulador importante de las actividades físicas, químicas y biológicas en el suelo (Fernández et al. 2006).

c) pH

El pH es una propiedad química del suelo que tiene un efecto importante en el desarrollo de los seres vivos (incluidos microorganismos y plantas). La lectura de pH se refiere a la concentración de iones hidrógeno activos (H^+) que se da en la interface líquida del suelo, por la interacción de los componentes sólidos y líquidos. La concentración de iones de hidrógeno es fundamental en los procesos físicos, químicos y biológicos del suelo. El grado de acidez o alcalinidad de un suelo es determinado por medio de un electrodo de vidrio en un contenido de humedad específico o relación de suelo - agua, están expresados en términos de la escala de pH. El valor de pH es el logaritmo del recíproco de la

concentración de iones de hidrógeno, que se expresa por números positivos del 0 al 14. Tres son las condiciones posibles del pH en el suelo: la acidez, la neutralidad y la alcalinidad.

Criterios de evaluación

Tabla 2.1. Criterios de evaluación de un suelo con respecto a su pH.

Categoría	Valor de pH
Fuertemente ácido	< 5.0
Moderadamente ácido	5.1 - 6.5
Neutro	6.6 - 7.3
Medianamente alcalino	7.4 - 8.5
Fuertemente alcalino	8.5

Fuente: (Fernández et al. 2006).

d) Carbono

El carbono del suelo está presente en la forma orgánica e inorgánica. La forma orgánica equivale a la mayor reserva en interacción con la atmósfera. El carbono orgánico presente en el suelo representa un balance dinámico entre la absorción de material vegetal muerto y la pérdida por descomposición (mineralización). El carbono orgánico es uno de los principales componentes de los seres vivos: aproximadamente 50% del peso seco de la materia orgánica es carbono. La materia orgánica del suelo es la fracción orgánica que incluye residuos vegetales animales en diferentes estados de descomposición; tejidos y células de organismos (Fernández et al. 2006).

2.1.2.2 Generación del drenaje ácido

La generación de ácido es originada por la oxidación de los minerales sulfurosos cuando son expuestos al aire y agua, lo cual da por resultado la

producción de acidez, sulfatos y la disolución de metales. No todos los minerales sulfurosos son igualmente reactivos, ni la acidez se produce en igual proporción. Además, no todos los minerales sulfurosos o rocas con contenido de sulfuro son potencialmente generadores de ácido. La tendencia de una muestra particular de roca a generar acidez neta es una función del balance entre los minerales (sulfurosos) productores potenciales de ácido y los minerales (alcalinos) consumidores potenciales de ácido (MINEM, 1995).

Criterio de evaluación

Los siguientes criterios se emplearon para evaluar el potencial de drenaje ácido de roca (DAR):

PA (Potencial Ácido)

Es una medida del máximo potencial de acidez que la muestra puede generar si todos los minerales sulfurosos contenidos se oxidan en forma ácida.

PN (Potencial de Neutralización)

Es una medida del potencial de neutralización de la muestra.

PNN (Potencial Neto de Neutralización)

Es una medida del balance entre el potencial de generación de ácido y consumo de ácido de la muestra. Se obtiene de la siguiente manera:

$$PNN = PN - PA$$

La interpretación tradicional de los resultados de pruebas ABA, se basa en los siguientes criterios:

El primer criterio de la evaluación considera el potencial neto de neutralización (PNN):

Si: $PNN > +20$ = la muestra NO GENERA DRENAJE ÁCIDO.

Si: $PNN < -20$ = la muestra GENERA DRENAJE ÁCIDO.

Si: $-20 < PNN < +20$ = muestra de comportamiento INCIERTO.

Si: $PN/PA > 3$ = la muestra NO GENERA DRENAJE ÁCIDO.

Si: $PN/PA < 1$ = la muestra GENERA DRENAJE ÁCIDO.

La relación ácido/base (ABA), es un procedimiento rápido para evaluar la generación de acidez o no. Teniendo en cuenta que la diferencia entre el potencial de neutralización (PN) y el potencial de acidez (PA) es positiva, el riesgo de generación ácida es menor, si sucede lo contrario existirá una mayor posibilidad de que se generen efluentes ácidos. (MINEM, 1995).

2.1.2.3 Materia Orgánica (m.o.)

La materia orgánica del suelo es la fracción orgánica que incluye residuos vegetales y animales en diferentes estados de descomposición; tejidos y células de organismos que viven en el suelo, sustancias producidas y vertidas por esos organismos. Esta definición es muy amplia pues incluye tanto a los materiales poco alterados como a aquellos que sí han experimentado cambios de descomposición, transformación y resíntesis dentro del suelo. Además se pueden incluir compuestos orgánicos tóxicos provenientes de las actividades industriales del hombre, como la contaminación de suelos por hidrocarburos, que también constituye parte de la materia orgánica del suelo (Etchevers, 1998).

La cantidad de materia orgánica en los suelos generalmente se expresa como porcentaje en base al peso del suelo. En la práctica, es difícil en el laboratorio separar el material orgánico e inorgánico de un suelo, por lo que una estimación del contenido de materia orgánica se obtiene indirectamente a través del análisis de un elemento que es constituyente de todas las sustancias orgánicas en el suelo.

A partir del contenido total de carbono orgánico se puede estimar el contenido de materia orgánica (tabla 2.2); suponiendo de forma convencional que la materia orgánica contiene 58% de carbono. Así el contenido de carbono orgánico se multiplica por el factor 1.724 para obtener el contenido de materia orgánica (Fernández et al. 2006).

Tabla 2.2. Interpretación del contenido de materia orgánica en el suelo.

Materia orgánica (%)		
Clase	Suelos volcánicos	Suelos no volcánicos
Muy bajo	< 4.0	< 0.5
Bajo	4.1 - 6.0	0.6 - 1.5
Medio	6.1 - 10.9	1.6 - 3.5
Alto	11.0 - 16.0	3.6 - 6.0
Muy alto	> 16.1	> 6.0

Fuente: (Fernández et al. 2006).

2.1.3 Contaminación de suelos

La contaminación del suelo consiste en una degradación química que provoca la pérdida parcial o total de la productividad del suelo como consecuencia de la acumulación de sustancias tóxicas, debido a las concentraciones anómalas que superan el poder de amortiguación natural del suelo y que modifican negativamente sus propiedades. Esta acumulación se realiza generalmente como consecuencia de actividades humanas exógenas, aunque también se

puede producir de forma natural o endógena cuando los procesos de edafización liberan elementos químicos contenidos en las rocas y los concentran en el suelo alcanzando niveles tóxicos. (López, 2002).

2.1.3.1 Contaminación de suelos generados por pasivos ambientales

Como en ningún proceso de concentración se logra una recuperación de 100%, los desechos mineros (pasivos ambientales mineros) siempre contienen residuos del mineral, permitiendo su eventual recuperación a futuro. Sin embargo, era común que muchas empresas descartaran sus desechos en ríos o los dispusieran en grandes pilas. La composición de estos residuos puede ser muy diversa en su naturaleza química y mineralógica (Sánchez 1995, citado por López, 2002).

2.1.3.2 Contaminación de suelos generados por relaves mineros

En la actualidad, la situación de los pasivos ambientales es bastante preocupante, por considerarlos fuentes de contaminación del suelo, causada por los relaves de la actividad minera y metalúrgica, que al contacto el suelo altera su composición natural, afectando la fauna, flora y población humana con riesgos en la salud.

La principal fuente de contaminación de los relaves mineros es el drenaje ácido mina si no es controlado adecuadamente. El drenaje ácido mina se forma partir de relaves altamente con contenido de minerales altos en sulfuros; los relaves desde un punto de vista físico-químico varían ampliamente de un yacimiento a otro con características físico-químicas diferentes, por tal motivo el grado de contaminación a los suelos son diferentes.

2.1.3.3 Degradación de suelos por pasivos ambientales mineros

- **Degradación física.-** La degradación física generado por los PAM se refiere a todos aquellos procesos que resultan de cambios adversos que pueden afectar las condiciones y propiedades físicas de los suelos. Casi todos los procesos causantes de degradación física están muy relacionados entre sí y conllevan a una reducción de la porosidad, y en consecuencia un deterioro de las relaciones aire-agua en el suelo. los principales agentes de degradación física del suelo son: compactación del suelo, sellado y encostramiento, consolidación del suelo, exceso de humedad (López, 2002).
- **Degradación química.-** Varios de los procesos de degradación química están vinculados a la degradación biológica y suelen ocurrir en condiciones extremas de la ocurrencia de este último. Ejemplos de lo manifestado son el agotamiento de nutrientes y la acidificación del suelo que resultan como consecuencia de acumulación de relaves mineros, infraestructura abandonada, botaderos abandonados, etc. (López, 2002).

2.1.4 Diseño de la cobertura

El diseño de la cobertura final para las riberas de la laguna Choquene, consideran las condiciones climáticas y proporcionan una cobertura adecuada, a fin de asegurar que se impida la contaminación del subsuelo y las aguas subterráneas.

2.1.4.1 Modelamiento numérico

El modelamiento de flujo realizado es bidimensional utilizando el programa VADOSE/W (GEO-SLOPE, 2007) que utiliza el método de elementos finitos e

incluye como fuente de información las condiciones climáticas del lugar en estudio.

2.1.4.1.1 Criterios de diseño

Fueron adoptados como criterios de diseño los siguientes puntos:

- Percolación de agua de hasta 1.5% de la precipitación media (Criterio propuesto por Hauser 2009). El criterio de ACAP para climas áridos y semiáridos es de 30 mm por año (Berson *et al.* 2002). De acuerdo a la información en la guía para el diseño de coberturas de depósitos de residuos mineros, sección resumen de casos documentados, donde la percolación puede llegar hasta el 3% de la precipitación media.
- Período de precipitación en 165 días, considerando el año de mayor precipitación.
- Reducir la migración de gas (oxígeno) que ingresa al material estéril de mina.
- Mantener la capa de retención de humedad con saturación mayor a 80%.

2.1.4.1.2 Condiciones climáticas

El modelo climático utilizado para evaluar las condiciones de flujo de la cobertura es de 165 días. Este dato climático y otros como la temperatura, humedad relativa y velocidad del viento corresponden a la estación meteorológica Sillustani, la cual es la estación más representativa cercana al proyecto. El periodo del modelo de precipitación utilizado es del 1° de enero de 2009. La precipitación anual del año 2009 es de 544.4 mm. La distribución de la precipitación para estos 165 días se muestra en la figura 2.1.

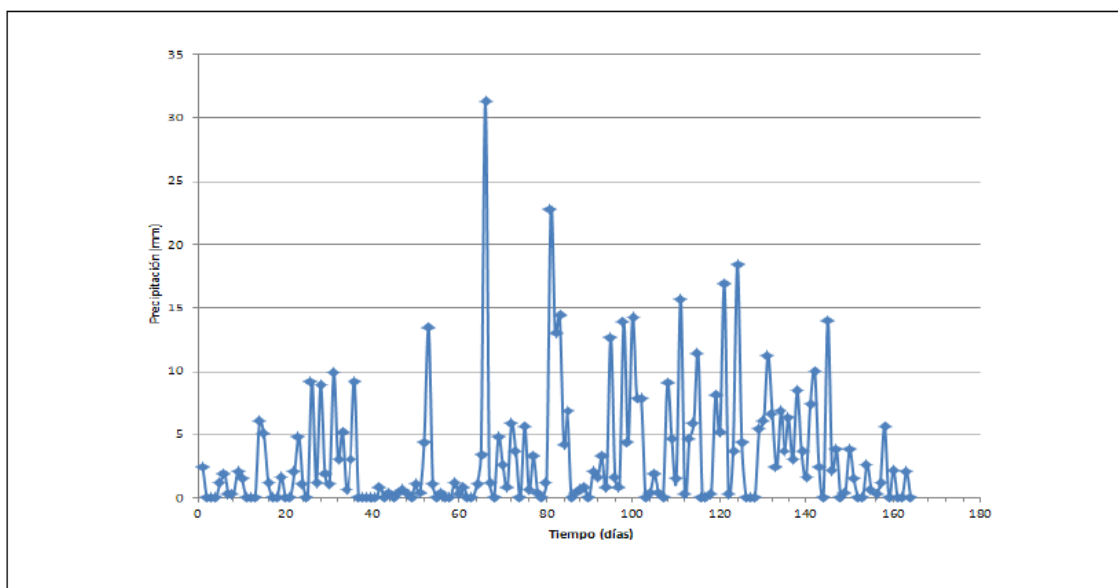


Figura 2.1. Distribución de 165 días de precipitación.
Fuente: Estación mina Sillustani-MINSUR S.A.

La temperatura media mensual no supera los 6°C y están indicadas en la tabla 2.3. La evaporación actual fue estimada, considerando -14°54' de latitud sur, con datos promedios de humedad relativa, temperatura, velocidad del viento. En la siguiente tabla se presentan los datos de temperatura promedio mensual.

Tabla 2.3. Temperatura promedio mensual.

ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SET	OCT	NOV	DIC
4.7	5.4	4.7	4.7	4.9	5.3	----	----	----	----	----	----

Fuente: Estación meteorológica mina Sillustani-MINSUR S.A.

2.1.4.1.3 Condiciones de contorno y malla de elementos finitos

El modelamiento numérico se realiza en base al modelo geométrico, condiciones de contorno y malla de elementos finitos mostrado en las figuras 2.2 y 2.3. La condición de contorno representa las condiciones climáticas.

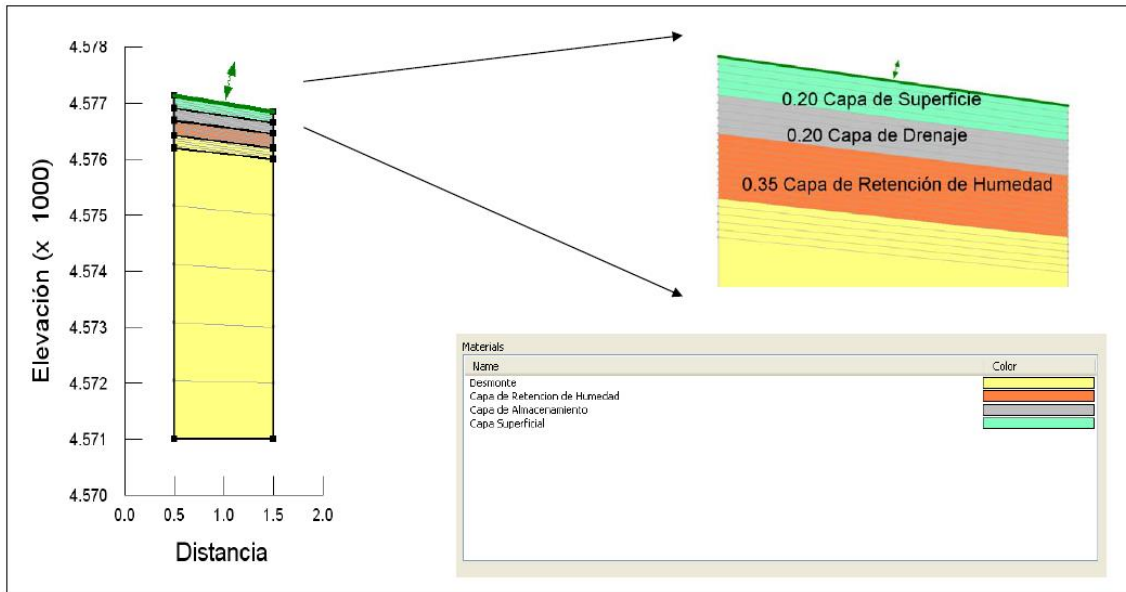


Figura 2.2. Modelo geométrico de columna, materiales y mallas de elementos finitos para el diseño de la cobertura con pendiente menor a 4%.

Nota: Se utilizará capa de soporte cuando se tenga una fundación de baja capacidad portante, con la finalidad de evitar asentamientos.

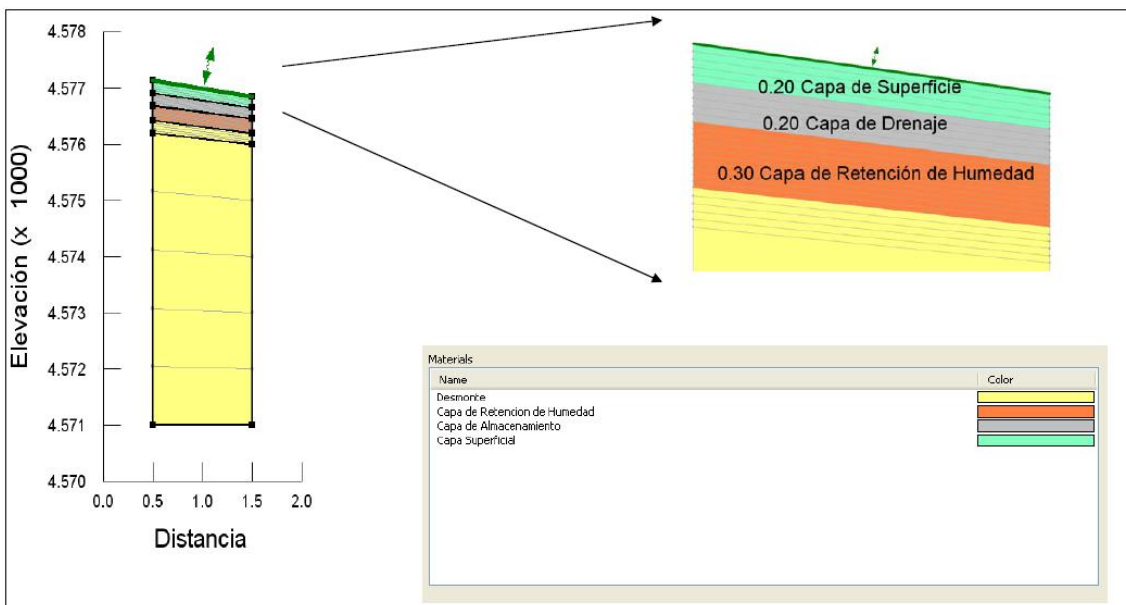


Figura 2.3. Modelo geométrico de columna, materiales y mallas de elementos finitos para el diseño de la cobertura con pendiente mayor a 4%.

Nota: Se utilizará capa de soporte cuando se tenga una fundación de baja capacidad portante, con la finalidad de evitar asentamientos.

La malla de elementos finitos está distribuida en toda la columna del material estéril de mina que modela el cuerpo del relleno, con elementos rectangulares en el área de cobertura. En total el mallado consta de 35 elementos y 72 nudos

cuyo tamaño máximo es un metro, las mallas están inclinadas con una pendiente de 2%, que es el valor mínimo para la conformación de coberturas que se está utilizando en el diseño.

2.1.4.1.4 Características de los Materiales

En la tabla 2.4 se presenta los parámetros de cada material utilizado en el modelamiento numérico. La función de permeabilidad es determinada con el modelo de Fredlund et al. (1994).

El material de baja permeabilidad se utilizó de la misma zona y el material granular de las canteras más cercanas y alrededores.

Tabla 2.4. Propiedades de los materiales.

Material	Simbolo	n	VEA	VEW	Ks (m/día)
Material arena y grava	GC-GM	0.4	0.4	3	8.64
Material de retención de humedad	CH-MH	0.45	12	400	8.64E-04
Geomembrana	-	-	25	300	8.64E-06
Superficie	OH-OL	0.35	5	200	8.864
n: Porosidad efectiva(vol/vol) VEA: Valor de entrada de aire (kPa) VEW: Valor de entrada de agua (kPa) Ks: Conductividad hidráulica saturada (cm/s)					

Fuente: (Schlumberger Water Services, 2014).

2.2 Marco legal

2.2.1 Ministerio de Energía y Minas (MEM)

El MEM considera que el sector minero es una de las actividades que más contamina el medio ambiente. Esto ha motivado a las empresas a iniciar la implementación del mecanismo de corrección, mitigación y prevención de la contaminación del medio ambiente en el que desarrollaron sus actividades.

En la actualidad la legislación peruana cuenta con un marco normativo sobre pasivos ambientales mineros que permita una gestión eficiente para su tratamiento (MEM, 2002).

2.2.1.1 Ley y reglamento de cierre de pasivos ambientales mineros

La Ley N° 28271 – Ley que regula los pasivos ambientales de la actividad minera, se aprobó con el objeto de regular el tratamiento de las áreas afectadas por pasivos ambientales mineros, a fin de mitigar los impactos negativos a la salud de la población, el ecosistema circundante y la propiedad (MEM, 2009).

Adicionalmente a ello, la modificación del reglamento de pasivos ambientales en la actividad minera, aprobada por Decreto Supremo N° 003-2009-EM incorporó la figura del remediador voluntario pudiendo ser éste cualquier persona natural o jurídica. Respecto a los pasivos ambientales mineros que se encuentren en territorio nacional, inclusive en el área de la concesión de un tercero (MEM, 2009).

En este sentido, de lo desarrollado hasta aquí se desprende que de acuerdo a la Ley N° 28271 – Ley que regula los pasivos ambientales mineros, su reglamento aprobado por Decreto Supremo N° 059-2005-EM y su modificación, aprobada mediante Decreto Supremo N° 003-2009-EM, existen dos tipos de remediadores:

- a) Los remediadores generadores.
- b) Los remediadores no generadores, el cual incluye al estado y los remediadores voluntarios.

2.2.2 Ministerio del Ambiente (MINAM)

2.2.2.1 Ley General del Ambiente, ley 28611 (LGA)

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

En su artículo 91 declara que el “Estado es responsable de promover y regular el uso sostenible del recurso suelo, buscando prevenir o reducir su pérdida o deterioro por erosión o contaminación”. En este sentido, al regular los estándares de calidad ambiental reconoce al suelo como un cuerpo receptor.

Considerando este tratamiento a nivel legislativo, el segundo eje de la política nacional del ambiente vigente, referido a la gestión integral de la calidad ambiental, incluye varios lineamientos referidos tanto a la aplicación de control como recuperación de la contaminación ambiental de este recurso.

2.2.2.2 Estándares de Calidad Ambiental del Suelo (ECA)

Los estándares de calidad ambiental del suelo, Decreto Supremo N° 002-2013-MINAM, es medida que establece el nivel de concentración o del grado de elementos, sustancias o parámetros físicos, químicos y biológicos, presentes en el suelo en su condición de cuerpo receptor, que no representa riesgo significativo para la salud de las personas ni al ambiente. Los ECA son

obligatorios en el diseño de las normas legales y las políticas públicas; así como referente obligatorio en el diseño y aplicación de todos los instrumentos de gestión ambiental.

Tabla 2.5. Estándares de calidad ambiental para suelo.

N°	PARAMETROS	USO DEL SUELO			METODO DE ENSAYO
		SUELO AGRICOLA	SUELO RESIDENCIAL/ PARQUES	SUELO COMERCIAL/INDUSTRIAL/EXTR ACTIVOS	
INORGÁNICOS					
1	Cianuro libre (mg/kg MS)	0.9	0.9	8	EPA 9013-A/APHA-WEF4500 CN F
2	Arsénico total (mg/kg MS)	50	50	140	EPA 3050-B EPA 3051
3	Bario total (mg/kg MS)	750	500	2000	EPA 3050-B EPA 3051
4	Cádmio total (mg/kg MS)	1.4	10	22	EPA 3050-B EPA 3051
5	Cromo VI (mg/kg MS)	0.4	0.4	1.4	DIN 19734
6	Mercurio total (mg/kg MS)	6.6	6.6	24	EPA 7471-B
7	Plomo total (mg/kg MS)	70	140	1200	EPA 3050-B EPA 3051

EPA: Environmental Protection Agency (Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos)

DIN: German Institute for Standardization

MS: materia seca a 105 °C, excepto para compuestos orgánicos y mercurio no debe exceder 40 °C, para cianuro libre se debe realizar el secado de muestra fresca en una estufa a menos de 10 °C por 4 días. Luego de secada la muestra debe ser tamizada con malla de 2 mm. Para el análisis se emplea la muestra tamizada < 2mm.

Fuente: Decreto Supremo N° 002-2013-MINAM-Anexo I.

2.2.2.3 Análisis de muestras

El análisis de las muestras de suelo se realizó en laboratorios acreditados aceptados expresamente por las autoridades competentes. (Decreto Supremo N° 010-2010-MINAM).

2.3 Glosario de términos

2.3.1 Drenaje Ácido Mina (DAM)

Las aguas ácidas generadas por la minería actual o pasada resultan de la oxidación de minerales sulfurados principalmente pirita en presencia de aire, agua y bacterias. La pirita es uno de los sulfuros más comunes y abundantes asociados a mineralización hidrotermal y normalmente es parte de la ganga siendo incorporada en los desechos mineros (desmontes o relaves). Estas descargas pueden producir desde algunos efectos menores como decoloración local de suelos y drenajes con precipitación de óxidos de Fe, o llegar a una extensa polución de sistemas de ríos y tierras de cultivo (MINAM, 2010).

2.3.2 Remediación

Tarea o conjunto de tareas a desarrollarse en un sitio contaminado con la finalidad de eliminar o reducir contaminantes, a fin de asegurar la protección de la salud humana y la integridad de los ecosistemas.

2.3.3 Relaves mineros

Son los residuos resultantes del proceso de recuperación de los metales. Una vez que las rocas con contenido metálico han sido chancadas y molidas, éstas pasan a través de un conjunto de procesos físicos y químicos, conocidos como

concentración o beneficio, para recuperar los metales. Una vez finalizado el mismo, se obtiene el componente con valor que es el concentrado y por otro lado lo que queda es el relave o desecho. El relave está compuesto por material sólido de tamaño muy pequeño, incluso menor al de la arena y agua formando un compuesto similar al lodo (MINAM, 2010).

El relave tiene características especiales dependiendo del tipo de mineral que involucre su proceso productivo. Estas características serán las que indiquen el método mediante el cual se deben tratar y su posterior almacenamiento.

2.3.4 Suelo industrial/extractivo

Suelo en el cual, la actividad principal que se desarrolla abarca la extracción y/o aprovechamiento de recursos naturales (actividades mineras, hidrocarburos, entre otros) y/o, la elaboración, transformación o construcción de bienes (MINAM, 2013).

2.4 Hipótesis

2.4.1 Hipótesis general

La recuperación de los suelos impactados por pasivos ambientales mineros de las riberas de la laguna Choquene mediante la sustitución de suelos, nos permitirá asegurar la estabilidad física y química.

2.4.2 Hipótesis específico

- Existe inestabilidad física y química en los suelos impactados en las riberas de la laguna Choquene, según los estándares de calidad ambiental del suelo en el proyecto minero Sillustani - Minsur S.A.

- Las concentraciones de metales pesados en los suelos impactados en las riberas de la laguna Choquene se encuentran por encima de los estándares de calidad ambiental del suelo en el proyecto minero Sillustani - Minsur S.A.
- El modelo de cobertura para la sustitución del suelo se diseñó de acuerdo a las características de lugar.
- El grado de concentración de metales pesados y drenaje ácido mina en los suelos sustituidos se encuentran por debajo de los estándares de calidad ambiental para suelo.

2.5 Sistema de variables

2.5.1 Variable independiente

Concentración de metales pesados.

Características fisicoquímicas del suelo.

2.5.2 Variable dependiente

Suelo contaminado por metales pesados.

Generación de drenaje ácido.

2.5.3 Operación de variables

Tabla 2.6. Operación de variables.

	CORRELACIONAR	INDICADORES
VARIABLE INDEPENDIENTE	Concentración de metales pesados	ppm
	Características fisicoquímicas del suelo	análisis
VARIABLE DEPENDIENTE	Suelo contaminado por metales pesados	ppm
	Generación de drenaje ácido	porcentaje

CAPÍTULO III

MATERIALES Y MÉTODOS

3.1 Tipo y diseño de investigación

Los principales parámetros fisicoquímicos y el contenido total de metales pesados son indicadores que determinan la calidad del suelo, para lo cual se muestrearon 15 calicatas a lo largo de las riberas de la laguna Choquene.

El tipo de investigación es cuantitativa, se inició con la caracterización de los parámetros físico – químicos y metales pesados de los suelos contaminados, se finalizó con el muestreo de los suelos recuperados (tres muestras) mediante la sustitución de suelos, de acuerdo a los ECA para suelos industriales/extractivos, establecidos por la MINAM, la determinación de los parámetros antes mencionados se realizó en base a laboratorio.

3.2 Fases de la investigación

En el presente trabajo de investigación titulado “Recuperación de suelos de las riberas de la laguna Choquene generados por la contaminación de pasivos

ambientales mineros en el proyecto minero Sillustani - Minsur S.A.” se ha considerado cinco fases que son:

- Trabajo de campo (muestreo y caracterización de suelos contaminados con relaves mineros).
- Estructuración de base de datos.
- Trabajo de pos proceso con software Microsoft Excel.
- Elaboración del trabajo de investigación.
- Presentación del trabajo de investigación.

3.3 Población y muestra de la investigación

3.3.1 Población

La población en estudio son las riberas de la laguna Choquene del proyecto minero Sillustani - Minsur S.A. del distrito de Ananea y Quilcapunco, provincia de San Antonio de Putina, departamento de Puno, país Perú con un área de 2224.443 m² (anexo 1 lamina L-2).

3.3.2 Muestra

Se aperturaron 15 calicatas y se tomaron muestras de 2 Kg./bolsa por cada sector en estudio que hacen un total de 15 muestras a lo largo de las riberas circundantes de la laguna Choquene en el proyecto minero Sillustani - Minsur S.A.

3.4 Ubicación y caracterización del área del proyecto

3.4.1 Ubicación y acceso del proyecto

La investigación se encuentra ubicado dentro de la propiedad del proyecto minero Sillustani, a una elevación que varía entre los 4500 msnm hasta los 5000 msnm. Políticamente se emplaza dentro de los distritos de Ananea y Quilcapuncu, provincia de San Antonio de Putina en el departamento de Puno.

Tabla 3.1. Accesibilidad al área de estudio.

N° RUTA	VÍA	TRAMO	DISTANCIA (KM)	CARRETERA	TIEMPO (HORAS)	ESTADO
1	Área	Lima – Juliaca	-	-	1.5	-
2	Terrestre	Lima – Juliaca	1300	Asfaltada	20	Buena
-	Terrestre	Juliaca - carretera hasta Ananea	123	Asfaltada	2	Buena
		Desvío Ananea - Proyecto Sillustani	26	Afirmada	1	Regular

Fuente: Compañía minera Sillustani – MINSUR S.A.

3.4.2 Clima

El clima de la zona en estudio está caracterizado principalmente por ser frío y seco, asimismo presentan dos temporadas claramente definidas: la época seca entre los meses de abril hasta noviembre y la época de lluvia entre los meses de diciembre hasta marzo, observándose la presencia de granizos y nevadas esporádicos.

La variación de la temperatura es:

- Máxima y mínima en verano: 16.5°C y 2.8°C respectivamente.
- Máxima y mínima en invierno: 19.7°C y -7.8°C respectivamente.

Con respecto a las precipitaciones se presenta una estación lluviosa y otra seca, la variación de la precipitación es:

- Precipitación mensual máxima extremo: 700mm.
- Precipitación promedio mensual: 280mm.
- Precipitación mensual mínima: 33mm.
- Precipitación anual: 1950mm.

En tanto la velocidad máxima anual del viento es del orden de 2.1m/s. La dirección dominante de vientos registra un azimut de 301°.

3.4.3 Contexto histórico

La mina Sillustani estuvo en funcionamiento hace más de treinta años atrás a cargo de la minera Regina Palca 11, empresa subsidiaria de Avocat Mining ING (con sede en Canadá y Reino Unido) y de propiedad del grupo Arias. El 2006 la mina fue transferido a la empresa minera Sillustani S.A., perteneciente a MINSUR S.A. del grupo Breca, asumiendo todo activo y pasivo de la anterior empresa, entre ellos, los pasivos ambientales mineros.

El proyecto minero Sillustani (anteriormente denominada Regina Palca 11), ha sido un importante productor de minerales de tungsteno (W), años atrás se han explotado Ag, Pb, Cu, Zn.

3.4.4 Hidrología

Hidrográficamente, el proyecto minero Sillustani está en la parte alta de la cuenca del río Huancané. Las aguas de esta zona drenan por el río Condoraque (Choquene) que se une con el río Tocotoco, y luego con el río Huancané, hasta su desembocadura en el lago Titicaca.

En el área de estudio se cuenta con información de la estación Putina, una estación regional administrada por SENAMHI esta estación cuenta con datos el cual dispuso con registros de precipitaciones máximas en 24 horas correspondientes al periodo 1962 – 2013, con un total de 53 años. En la tabla 3.2, presenta la precipitación máxima para distintos periodos de retorno en la estación Putina.

Tabla 3.2. Precipitación en 24 hr. para diferentes periodos de retorno.

TR (años)	PUTINA (mm)	TR (años)	PUTINA (mm)
500	68.8	25	53.8
200	64.7	20	53
100	61.4	10	48.9
50	58	-	-

Fuente: Compañía minera Sillustani – MINSUR S.A.

3.4.5 Geología

El área en estudio se emplaza en la cordillera oriental, caracterizándose por su continuidad y elevación. Los rasgos estructurales están en estrecha relación con las características de las rocas precámbricas y paleozoicas existentes; producto del tectonismo del hercínico, el mismo que fue controlado por fallas regionales longitudinales.

La morfología actual es el resultado del intenso plegamiento y fallamiento asimismo se encuentra caracterizada por relieve moderadamente abrupto y accidentado donde destacan los ambientes glaciares, destacan algunas montañas de cima truncada disecada por innumerables valles; asimismo, paralelo a las quebradas se aprecian terrazas aluviales antiguas y depósitos de conos de deyección laterales.

La secuencia estratigráfica regional, está constituida por rocas sedimentarias mesozoicas, deformadas por el intenso plegamiento, fallamiento inverso y grandes sobrescurrimientos. Las rocas intrusivas del terciario tienen afloramientos de gran amplitud y distribución, estas rocas varían en composición desde diorita, tonalita, granodiorita y dacita.

3.4.6 Suelos

Los suelos de la zona del proyecto están ubicados cerca de la laguna Choquene, de acuerdo a la clasificación internacional y los términos edáficos propuestos por la FAO (Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación), los suelos más representativos del área del proyecto son el paramo andosol-litosol andino como grupo dominante y el fluvisol eutrítico como grupo subdominante, los cuales se encuentran en una fase climática que varía de sub-húmedo a húmedo frígido, pertenecen a una topografía ligeramente ondulada, altitud promedio de 4700 msnm, provienen de un material madre fluvio-glacial y gran presencia de fragmentos gruesos de los cuales el 30% son piedras sub-angulares de 25 a 60 cm. de tamaño.

En la visita de campo se hizo 15 calicatas de las cuales podemos dar la siguiente descripción del suelo. De 0 a 20cm de profundidad tenemos un suelo

franco arenoso, de color pardo oscuro, granular muy fino, de consistencia suave en seco, con un pH de 5.5, de 20 a 40cm tenemos un suelo franco arenosos de color pardo en húmedo, bloques subangulares muy finos, con pH de 4.1 y de 40cm a más, tenemos un suelo franco arenoso, color pardo en húmedo, masivo que se rompe en bloques subangulares medíos débiles, con pH de 2.7, el contenido de materia orgánica es poroso y con mezcla de colores.

3.4.7 Relaves mineros

Los relaves mineros abandonados contienen aproximadamente 1'200,000 toneladas métricas de material con un promedio de 0.6% de tungsteno. Presenta desbordes varios sitios, cuyo material llega a la laguna Choquene.

También se observa que en el depósito de relaves aguas arriba de la laguna Choquene, no existe vegetación en la superficie del depósito de relaves; se observa un color amarillo rojizo debido a la oxidación de minerales sulfurados, entre ellos también se encuentra los relaves mineros en las riberas como en la laguna Choquene.



*Figura 3.1. Vista panorámica de la laguna Choquene.
Fuente: Elaboración propia*

3.5 Metodología de muestreo de suelos contaminados con relaves mineros

Se tomó muestras representativas (muestreo de detalle) sistemáticos polares, para determinar el área y volumen (la distribución horizontal y vertical) del suelo contaminado con relaves mineros. El muestreo se realizó teniendo en cuenta el tiempo desde que se produjo la contaminación, profundidad del mismo, extensión del área contaminada y muestreos anteriormente realizados por la empresa minera Sillustani-MINSUR S.A.

3.5.1 Técnicas de muestreo

Se tomaron muestras contaminadas con relaves mineros utilizando una pala, limpiando previamente la capa intemperizada, se extrajeron muestras de las calicatas de acuerdo al espesor de las capas, depositando las muestras en una manta de polietileno para su homogenización tal como se aprecia en la figura 3.2, obteniendo una muestra final de 2 Kg. / bolsa.

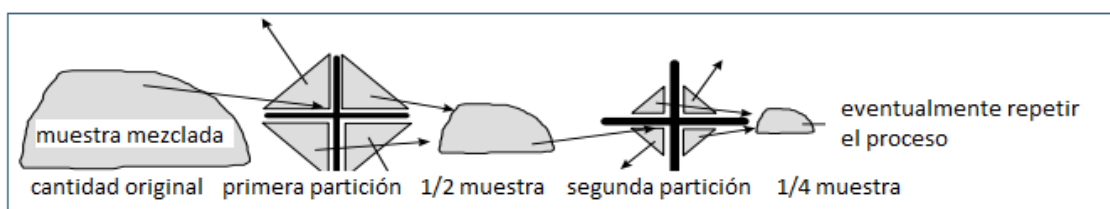


Figura 3.2. Partición de muestras.
Fuente: (MINAM, 2013).

3.5.2 Obtención de las muestras de suelos

La obtención de muestras del suelo contaminado se obtuvo por el sistema de calicatas a lo largo de las riberas de la laguna Choquene, se consideró la excavación de quince (15) calicatas, cabe indicar que las calicatas se ejecutaron manualmente, apoyados por personal auxiliar proporcionado por Sillustani.

Distribuidos sistemáticamente en el área de acuerdo a lo establecido por el Decreto Supremo N° 002-2013-MINAM.

Tabla 3.3. Cantidad mínima de muestras.

AREA DE POTENCIAL INTERES (ha.)	PUNTOS DE MUESTREO EN TOTAL
0.1	4
0.5	6
1	9
2	15
3	19
4	21
5	23
10	30
15	33
20	36
25	38
30	40
40	42
50	44
100	50

Fuente: (MINAM, 2013).

Se utilizó el siguiente etiquetado para diferenciar los estratos de cada calicata de la siguiente manera:

M-C-XX-YY

Donde:

M = muestra

C = calicata

XX = Nro. de calicata

YY = **01** Nro. de muestra

Para hallar la cantidad mínimo de puntos de muestreo, se efectuó de acuerdo al decreto supremo N° 002-2013-MINAM, ECA para suelos. La cual se muestra en la siguiente tabla.

Las muestras se colectaron en bolsas de polietileno previamente etiquetadas y se llevaron al laboratorio para su acondicionamiento. En el anexo 1 y el plano L-2 se indican sitios muestreados donde se pueden observar la distancia a la que se encuentran los puntos de muestreo con respecto a la superficie contaminada con relaves mineros, para la elaboración de planos y el cálculo de área y cubicación del material contaminado.



*Figura 3.3. Muestreo de suelos contaminados detallado.
Fuente: Elaboración propia*

3.5.3 Requerimiento de seguridad en el proceso de obtención de muestras

Los sitios contaminados pueden tener concentraciones de materiales que son perjudiciales para las personas cuyo trabajo en esta oportunidad es la obtención

de muestras. A pesar de presentar concentraciones mínimas de estos materiales, se requiere de un estricto control de protocolos de seguridad para evitar accidentes y proteger al personal técnico de una exposición innecesaria a productos peligrosos (lo cual lo exige la empresa minera Sillustani).

Por ello el equipo de protección personal está incluido:

- Casco.
- Respiradores.
- Lentes de seguridad.
- Botas de seguridad.
- Guantes adecuados para el muestreo.

3.5.4 Materiales utilizados en el muestreo

Para el desarrollo del muestreo por cuarteo en campo se emplearon los siguientes materiales.

- 01 lampa.
- 01 manta de polipropileno.
- Plumón marcador.
- Flexómetro.

Mientras que para la colecta de muestras que se analizaran en laboratorio.

- Bolsas de polietileno.
- Balanza de 0.1 gramo de precisión.
- Plumón marcador.
- Etiquetas para la codificación de muestras.

Para la orientación y ubicación de los puntos de muestreo y medir la zona.

- Estación total leyca TS06 precisión de 2”.
- Cinta métrica.
- Estacas.

3.6 Técnicas de recolección de datos

Hernández (1998) lo define como el “Conjunto de operaciones, estrategias y tácticas que el investigador realiza antes y con el fenómeno en estudio en relación a las operaciones que le otorga el mismo”.

3.7 Técnicas de procesamiento de información

Una vez recolectados los datos proporcionados por laboratorio, se ha realizado el análisis estadístico respectivo, análisis del muestreo de campo, análisis de muestras representativas, cuadros y gráficos mediante el uso del software Microsoft Excel, los datos serán tabulados en tablas y gráficos de las riberas de la laguna Choquene.

3.8 Descripción de muestras de suelos contaminados

Los suelos contaminados con relaves mineros que se estudian en el presente proyecto de investigación, corresponden a las riberas de la laguna Choquene - empresa minera Sillustani S.A. la cual se puede apreciar en el plano L-2 (muestreo de las riberas de la laguna Choquene) del anexo 1.

De la tabla 3.4 se puede apreciar que el 100% de las muestras (10) presentan relaves, el 66.6% de las muestras (11) tienen presencia de caolín y el 73.3% presentan tierra negra.

Tabla 3.4. Características de los puntos de muestreo (calicatas).

CALICATAS	COORDENADAS		ESTRATOS		
	ESTE	NORTE	RELAVE (cm)	CAOLIN (cm)	TIERRA NEGRA (cm)
1	426765.64	8372277.4	25	20	8
2	426784.53	8372261.1	20	30	10
3	426798.81	8372253.3	12	15	12
4	426817.49	8372248	15	22	-
5	426835.1	8372247.2	30	-	-
6	426855.85	8372245.6	10	22	-
7	426874.03	8372234	18	20	-
8	426891.67	8372218.2	15	15	10
9	426880.23	8372214.7	15	15	8
10	426862.15	8372229.6	15	20	12
11	426841.68	8372237.2	12	18	10
12	426819.6	8372231.7	25	-	10
13	426805.54	8372240.1	28	-	12
14	426784.49	8372250.6	25	-	8
15	426770.38	8372263.4	30	-	10

Fuente: Elaboración propia.

CAPÍTULO IV

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1 Caracterización física y química de suelos contaminados

Los resultados de laboratorio nos permiten conocer el grado de contaminación del suelo de las riberas de la laguna Choquene (la concentración y distribución), los principales parámetros fisicoquímicos son los siguientes:

- Textura
- Contenido de humedad
- pH
- Carbono orgánico
- Materia orgánica
- Drenaje ácido roca (DAR)

4.1.1 Textura

En las muestras obtenidas durante el trabajo de campo, se llevaron a cabo ensayos de laboratorio con fines de identificación y clasificación de suelos. Las

propiedades de los suelos ensayados en términos de granulometría y contenido de humedad se dan a conocer en la tabla 4.1.

Tabla 4.1. Resumen de ensayos de clasificación de suelos.

Muestra	PROF. (m)	D. GRANULOMETRICA			INTERPRETACION
		GRAVA (%)	ARENA (%)	FINOS (%)	
M-C-01-01	0.00-0.53		96.7	3.3	arena
M-C-02-01	0.00-0.60		91.5	8.5	arena con limo
M-C-03-01	0.00-0.39		92.8	7.2	arena con limo
M-C-04-01	0.00-0.15		84.9	15.1	arena limosa
M-C-05-01	0.00-0.30		12.8	87.2	arcilla limosa
M-C-06-01	0.00-0.32		81.8	18.2	arena limosa
M-C-07-01	0.00-0.38		91.6	8.4	arena con limo
M-C-08-01	0.00-0.40		91.1	8.9	arena con limo
M-C-09-01	0.00-0.38		33.0	67.0	arcilla limosa arenosa
M-C-10-01	0.00-0.47		80.3	19.7	arena limosa
M-C-11-01	0.00-0.40		92.8	7.2	arena con limo
M-C-12-01	0.00-0.35		92.1	7.9	arena con limo
M-C-13-01	0.00-0.40		21.7	78.3	limo orgánico
M-C-14-01	0.00-0.33	71.9	16.6	11.5	grava con arcilla y limo
M-C-15-01	0.00-0.40	62.1	27.2	10.7	grava con arcilla y limo
Promedio		8.9	67.1	23.9	

Fuente: Laboratorio de Agq Perú Labs & Technological Services (AGQ).

De la tabla anterior se puede apreciar que solo hay dos muestras con presencia de grava (M-C-14-01 y M-C-15-01), que representa el 20% de calitas muestreadas, mientras que el 86.7% de muestras son arenas limosas.

La comparación de contenido de arena y finos en cada una de las muestras, el contenido de arena tiene mayor predominio con un valor promedio de 67.1%, en cambio el contenido de finos tiene un valor promedio de 23.9% (tabla 4.1).

Alcántara (2015), el estudio que realizo en los suelos de la planta piloto metalúrgica de Yauris, los resultados del análisis granulométrico indican: Arena

92%, limo 6% y arcilla 2%. Llega a una conclusión que los suelos de relaves son de clase textural arenoso, que son caracterizados por su poca retención de humedad y poca habilidad para retener nutrientes. De acuerdo a los análisis granulométricos realizados son parecidos con los resultados del autor antes mencionado, según el triángulo de texturas y guías para la clasificación norteamericana para texturas de suelos USDA, los resultados obtenidos indican que se trata de un suelo de relave tipo arenoso.

4.1.2 Humedad

La humedad de suelos contaminados en los diferentes sectores (tabla 4.2) se muestran en promedio con un valor de 19.45% de contenido de humedad, con un valor mínimo de 5.1% y un valor máximo de 62.2% de contenido de humedad.

Tabla 4.2. Porcentaje de humedad en los suelos muestreados.

Muestra	PROF. (m)	CONT. HUMED (w%)
M-C-01-01	0.00-0.53	5.9
M-C-02-01	0.00-0.60	17.7
M-C-03-01	0.00-0.39	9.5
M-C-04-01	0.00-0.15	16.4
M-C-05-01	0.00-0.30	31.0
M-C-06-01	0.00-0.32	36.7
M-C-07-01	0.00-0.38	11.3
M-C-08-01	0.00-0.40	11.3
M-C-09-01	0.00-0.38	36.2
M-C-10-01	0.00-0.47	14.2
M-C-11-01	0.00-0.40	11.6
M-C-12-01	0.00-0.35	9.2
M-C-13-01	0.00-0.40	62.2
M-C-14-01	0.00-0.33	5.1
M-C-15-01	0.00-0.40	13.5

Fuente: Laboratorio de Agq Perú Labs & Technological Services (AGQ).

4.1.3 pH

La reacción del suelo (pH) en los diferentes sectores muestreados (tabla 4.3) a lo largo de la laguna Choquene, muestran que los suelos en promedio son fuertemente ácidos.

Tabla 4.3. Valores de reacción del suelo (pH).

MUESTRA	pH pasta	Condición
M-C-01-01	3.190	Fuertemente ácido
M-C-02-01	3.790	Fuertemente ácido
M-C-03-01	3.160	Fuertemente ácido
M-C-04-01	2.550	Fuertemente ácido
M-C-05-01	2.180	Fuertemente ácido
M-C-06-01	2.280	Fuertemente ácido
M-C-07-01	2.040	Fuertemente ácido
M-C-08-01	2.110	Fuertemente ácido
M-C-09-01	2.640	Fuertemente ácido
M-C-10-01	2.040	Fuertemente ácido
M-C-11-01	2.020	Fuertemente ácido
M-C-12-01	2.810	Fuertemente ácido
M-C-13-01	2.430	Fuertemente ácido
M-C-14-01	2.560	Fuertemente ácido
M-C-15-01	2.035	Fuertemente ácido

Fuente: Laboratorio de Agq Perú Labs & Technological Services (AGQ).

Los valores de pH con extrema acidez, son producto de la liberación de protones producidos por la oxidación permanente de sulfuros metálicos con la presencia de agua y oxígeno, y como consecuencia la generación de aguas ácidas en la cuenca de drenaje (Carmona, 2012). Los resultados de los suelos estudiados son considerados fuertemente ácidos, los que estarían influyendo en la formación del drenaje ácido (ver la tabla 4.3).

Machacca (2013), realizó estudios sobre la determinación de metales pesados en los suelos de la laguna Choquene, analizando dos muestras in situ a diferentes distancias de muestreo, reportando valores de pH de 3 y 5. Alcántara (2015) realizó estudios en la recuperación de suelos de relaves mineros en la planta piloto metalúrgica de Yauris. Obtiene resultado con respecto al pH con un valor de 5.89 considerado fuertemente ácido (muestra N° 1). Los resultados de Machacca se asemejan a los valores encontrados en la investigación realizada.

4.1.4 Carbono orgánico

Las muestras tomadas en campo se llevaron a laboratorio para su respectivo análisis, los resultados del laboratorio se observan en la tabla 4.4.

Tabla 4.4. Resultados de laboratorio de análisis de carbono.

MUESTRA	C. INORGÁNICO (%)	C. ORGÁNICO (%)
M-C-01-01	0.18	0.23
M-C-02-01	0.36	0.2
M-C-03-01	0.04	0.06
M-C-04-01	0.39	0.6
M-C-05-01	0.41	0.61
M-C-06-01	0.52	0.71
M-C-07-01	0.3	0.62
M-C-08-01	0.06	0.02
M-C-09-01	0.34	0.8
M-C-10-01	0.3	0.27
M-C-11-01	0.3	0.68
M-C-12-01	1.37	2.94
M-C-13-01	0.41	0.43
M-C-14-01	0.19	0.25
M-C-15-01	0.15	0.1

Fuente: Laboratorio de Agq Perú Labs & Technological Services (AGQ).

De la tabla 4.4 se puede observar la distribución de carbono orgánico e inorgánico en los suelos contaminados con relaves mineros a lo largo de la laguna Choquene. El carbono inorgánico tiene un valor mínimo de 0.02% y un valor máximo de 2.94%, mientras que el carbono orgánico tiene un valor mínimo de 0.04% y un valor máximo de 1.37%.

Es de esperarse por la procedencia de los residuos mineros encontrar bajos contenidos de % de carbono (Carmona, 2012). Los resultados de suelos estudiados en las riberas de la laguna Choquene tienen un bajo contenido de carbono, en general, estas áreas mineras, tienen un contenido bajo de carbono orgánico.

4.1.5 Determinación de materia orgánica (m.o.)

Procesando los valores de carbono orgánico de acuerdo a los criterios antes mencionados (ver tabla 2.2) en el software estadístico IBM SPSS. Se obtuvieron el contenido de materia orgánica de los suelos en los diferentes sectores estudiados (tabla 4.5 y figura 4.1).

Tabla 4.5. Frecuencias del contenido de materia orgánica.

		Frecuencia	Porcentaje	Porcentaje válido	Porcentaje acumulado
Válido	MUY BAJO	7	46,7	46,7	46,7
	BAJO	7	46,7	46,7	93,3
	ALTO	1	6,7	6,7	100,0
	Total	15	100,0	100,0	

Fuente: Resultados estadísticos elaborados Microsoft Excel.

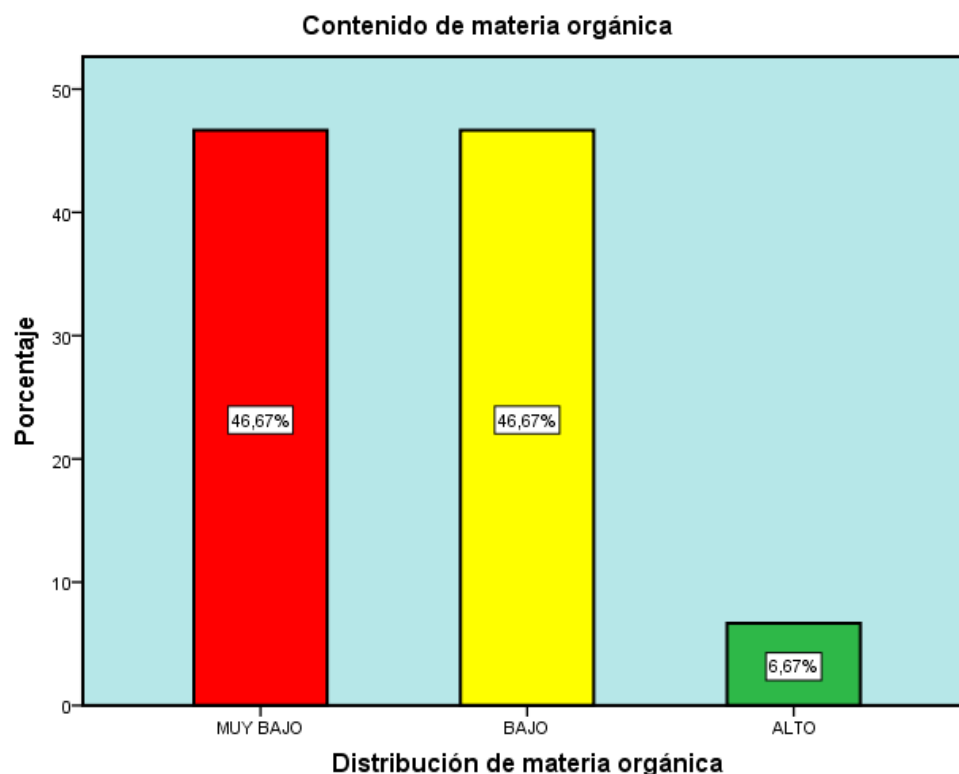


Figura 4.1. Contenido de materia orgánica.

Fuente: Resultados estadísticos elaborados con Microsoft Excel.

Los suelos muestreados se encuentran con un bajo contenido de materia orgánica con un valor mínimo de 0% y un máximo de 5.1%, de los cuales un 46.67% (7 muestras) se encuentran con un contenido *muy bajo* de contenido de materia orgánica, mientras un 46.67% (7muestras) se encuentran con un *bajo* contenido de m.o. y solo un 6.67% (M-C-12-01) está con contenido óptimo de materia orgánica.

Se sabe que el contenido de materia orgánica en la superficie de suelos suele variar entre 1 y 3 %, en general en estas áreas mineras son deficientes en el contenido de materia orgánica. Estos valores están en consonancia con la procedencia de estos residuos, mena de mineral sobre lo que se han aplicado diversos procesos físico-químicos para su explotación y beneficio (Carmona, 2012).

Alcántara.(2015), concluye que los resultados de materia orgánica en los relaves son suelos con un contenido de materia orgánica muy bajo (0.36) por lo que se le da una valoración de extremadamente pobre. Los valores encontrados en los suelos de las riberas de la laguna Choquene, son similares a los resultados obtenidos por estos autores.

4.1.6 Evaluación del potencial de generación del DAR

La evaluación realizada a las muestras, nos permite determinar de modo preliminar y la posibilidad de formación de ácido en los suelos contaminados con relaves mineros en riberas de la laguna Choquene.

Como se detalló anteriormente en la sección de metodología de trabajo, las muestras obtenidas fueron analizadas en laboratorio, para determinar su potencial de generación de drenaje ácido, su potencial de neutralización en cada muestra.

4.1.6.1 Ensayos de ABA

Se realizaron análisis de generación de drenaje ácido (DAR) en las quince muestras del material obtenido en el trabajo de campo. El resumen de los resultados obtenidos se presenta en la tabla 4.6. Los certificados de los resultados de evaluación de drenaje ácido se aprecian en el anexo 2.

En la tabla 4.6 se puede observar que 14 muestras tienen un alto potencial de generar drenaje ácido, mientras tanto que una muestra está en un rango de incertidumbre, esto quiere decir que: de acuerdo a los criterios anteriormente mencionados, los resultados de los ensayos ABA determinados en laboratorio, indican valores que fluctúan un valor PNN mínimo de -134.6 hasta un valor

máximo -1.9 expresados en kg- CaCO_3 /ton. El 93% de las muestras analizadas si producen drenaje acido mina, mientras que el 6.7% de las muestras analizadas están en el rango de incertidumbre (figura 4.2).

Tabla 4.6. Caracterización acido/base de los relaves mineros lag. Choquene.

MUESTRA	$\text{CaCO}_3/1000\text{ton}$			PN/PA	Azufre total %	pH pasta
	PN	PA	PNN			
M-C-01-01	-6.000	14.300	-20.300	-0.420	0.600	3.190
M-C-02-01	-1.000	41.100	-42.100	-0.020	1.370	3.790
M-C-03-01	-5.000	19.100	-24.100	-0.260	0.730	3.160
M-C-04-01	3.000	17.600	-14.600	0.170	1.330	2.550
M-C-05-01	-15.000	20.800	-35.800	-0.720	2.060	2.180
M-C-06-01	-37.000	38.800	-75.800	-0.950	1.930	2.280
M-C-07-01	-54.000	33.000	-87.800	-1.640	2.790	2.040
M-C-08-01	-28.000	26.100	-54.100	-1.070	2.740	2.110
M-C-09-01	-21.000	21.400	-42.400	-0.980	1.320	2.640
M-C-10-01	-52.000	57.800	-109.800	-0.900	3.860	2.040
M-C-11-01	-68.000	66.600	-134.600	-1.020	3.580	2.020
M-C-12-01	-24.000	22.100	-46.100	-1.090	1.330	2.810
M-C-13-01	-20.000	21.000	-41.000	-0.950	1.010	2.430
M-C-14-01	-21.000	21.100	-42.100	-1.000	1.230	2.560
M-C-15-01	-28.000	27.100	-55.100	-1.030	2.680	2.035
LEYENDA				Si generan drenaje acido		
				Estamos en rango de incertidumbre		

Fuente: Laboratorio de Agq Perú Labs & Technological Services (AGQ).

Donde:

PN = Potencial de neutralización.

PA = Potencial de acidez.

PNN = Potencial neto de neutralización.

(*) PN, PA y PNN están expresados en kg- CaCO_3 /t

%S = Porcentaje de azufre como sulfuro (SO_4) .

%S Total = Porcentaje de azufre total (Sulfuro + Sulfato).

En la tabla 4.7 se muestran las frecuencias absolutas y acumuladas del potencial neto de neutralización (PNN) de las quince muestras.

Tabla 4.7. Frecuencias del potencial neto de neutralización.

	Frecuencia	Porcentaje	Porcentaje válido	Porcentaje acumulado
Válido SE PRODUCE DAR	14	93,3	93,3	93,3
INCIERTO	1	6,7	6,7	100,0
Total	15	100,0	100,0	

Fuente: Resultados estadísticos elaborados con IBM SPSS.

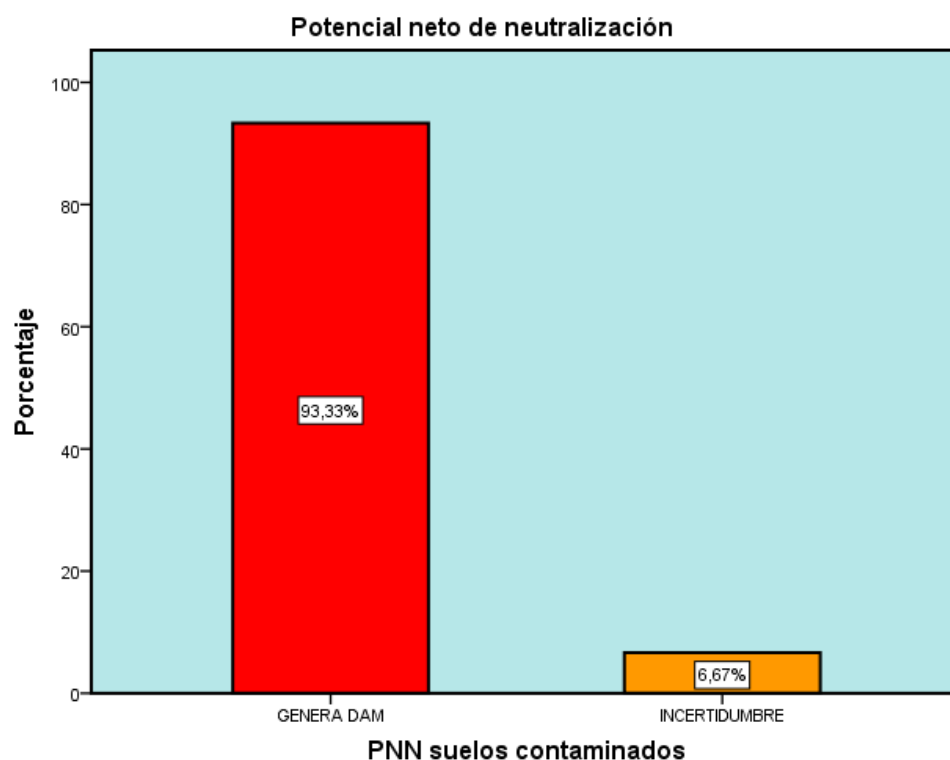


Figura 4.2. Potencial neto de neutralización.

Fuente: Resultados estadísticos elaborados con IBM SPSS.

El drenaje ácido es generado durante la explotación y acumulación de escombros en los alrededores de la mina Palca 11 (ahora Sillustani), sin considerar la lixiviación que han sido afectados en periodos de fuertes precipitaciones. Además, el ácido disuelto ataca a otros minerales produciendo

soluciones que transportan otros elementos tóxicos; como cadmio, arsénico (Machacca, 2013). De acuerdo al análisis estadístico realizado, los suelos de la ribera Choquene tienen altas posibilidades de generación ácida, lo cual coincide con el resultado del autor mencionado.

Los DAM se caracterizan por un bajo pH, alta conductividad eléctrica, altas concentraciones de sulfatos, hierro, manganeso y elementos tóxicos, estos últimos asociados con la roca o mineral explotado, tales como Pb, Cd, Cu, Hg y As. Bajo estas condiciones se incrementa la disolución de los metales y como consecuencia, aumenta significativamente su movilidad y la concentración de sólidos disueltos en el agua (Carmona, 2012).

4.1.6.2 Consideraciones

- De las 15 calicatas muestreadas, solo en la muestra M-C-04-01, hay un rango de incertidumbre de generar acidez (relave).

4.2 Determinación de metales pesados

Los resultados de los análisis de metales según los parámetros indicados por los ECA para suelo (As, Ba, Ca, Cr, Hg, Pb) indican que las zonas de estudio (riberas de la laguna Choquene). Están fuera del rango ECA para suelos, especialmente el arsénico (As) y cromo(Cr) , lo que era de esperarse por estar asociados con el beneficio de pirita y galena en esta zona minera, en las riberas de la laguna Choquene se evidencia una gran heterogeneidad en el contenido de metales, como se corrobora con sus valores en las siguiente tabla.

Tabla 4.8. Estadísticos descriptivos para el contenido de metales pesados.

	Arsénico (As) ppm	Bario (Ba) ppm	Cadmio (Cd) ppm	Cromo (Cr) ppm	Mercurio (Hg) ppm	Plomo (Pb) ppm
N Válido	15	15	15	15	15	15
Perdidos	0	0	0	0	0	0
Media	181,453	312,000	,2313	22,067	1,17887	152,240
Mínimo	55,3	40,0	,02	4,0	,143	41,3
Máximo	326,0	640,0	1,91	38,0	2,980	851,0

Fuente: Resultados estadísticos elaborados con IBM SPSS.

Realizando un análisis comparativo entre los valores encontrados en estas zonas de influencia minera y los suelos de las riberas de la laguna Choquene en la mina Sillustani S.A., se pueden observar que superan los niveles de referencia establecidos por los estándares de calidad ambiental (ECA) para suelos.

En la tabla 4.8 se observa que la contaminación más alta está asociada al contenido del cromo (Cr) seguido del arsénico (As), a excepción del resto de metales analizados. Obteniendo valores máximos de: arsénico 326ppm, bario 640 ppm, cadmio 1.91ppm, cromo 38ppm, mercurio 2.980 ppm y plomo 851 ppm.

La contaminación de suelos en las riberas de la laguna Choquene proviene de la alteración supergénica y erosión de los relaves depositados en los botaderos, como también los relaves esparcidos en toda el área circundante, y su posterior transporte por las aguas de escorrentía, que los arrastro aguas abajo hasta llegar a la laguna Choquene y el área en estudio.

De acuerdo a los resultados de laboratorio y el análisis estadístico comparado con los estándares de calidad ambiental nos muestran los siguientes resultados:

4.2.1 Arsénico (As)

Los resultados descritos en la siguiente tabla muestran la presencia de As en cada uno de las muestras examinadas, las concentraciones de As presentan diferencias significativas con los ECA para suelo a lo largo de las riberas de la laguna Choquene.

Tabla 4.9. Resultados de las concentraciones de arsénico.

RESULTADOS DEL ARSENICO			
Muestra	Unidad	Arsénico (As)	ECA Arsénico
M-C-01-01	ppm	214	140
M-C-02-01	ppm	192.5	140
M-C-03-01	ppm	142.5	140
M-C-04-01	ppm	326	140
M-C-05-01	ppm	249	140
M-C-06-01	ppm	240	140
M-C-07-01	ppm	122.5	140
M-C-08-01	ppm	101	140
M-C-09-01	ppm	113	140
M-C-10-01	ppm	55.3	140
M-C-11-01	ppm	113.5	140
M-C-12-01	ppm	237	140
M-C-13-01	ppm	215	140
M-C-14-01	ppm	180.5	140
M-C-15-01	ppm	220	140
Máximo		326	
Mínimo		55.3	

Fuente: Laboratorio de Agq Perú Labs & Technological Services (AGQ).

De acuerdo a los valores de los ECA para suelos industrial/extractivo nos indica que el valor máximo de arsénico es 326 ppm; basado en estos valores y con el análisis estadístico se obtuvo los siguientes resultados.

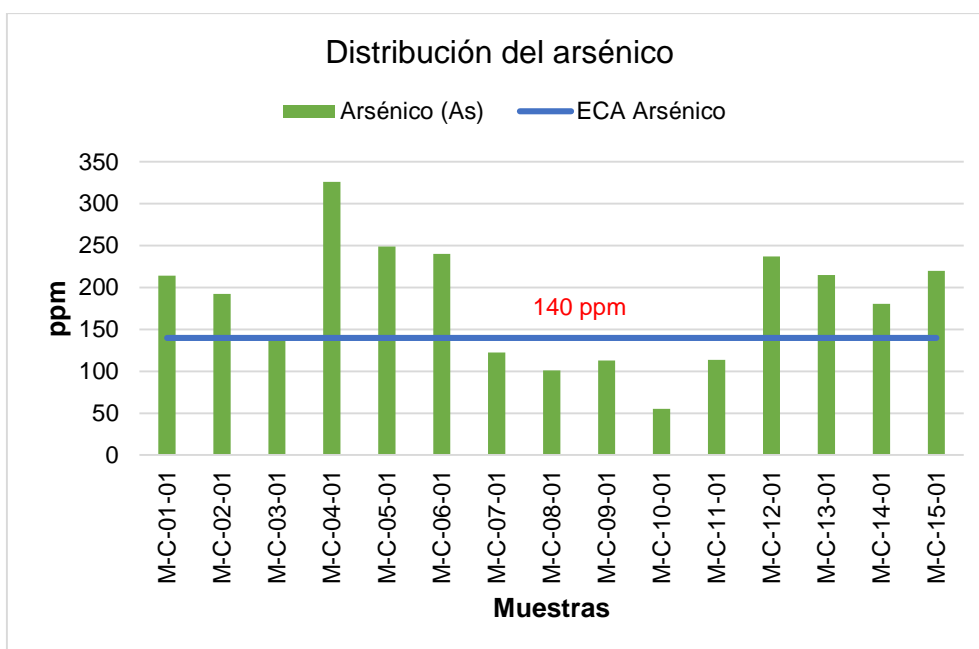


Figura 4.3. Contenido de arsénico en suelos muestreados.
Fuente: Resultados estadísticos elaborados.

Según la figura 4.3, en los suelos muestreados se puede observar que solo el 33.33% (cinco muestras) de las muestras se encuentran dentro de lo establecido por los ECA para suelos mientras un 66.67% (diez muestras) de las muestras se encuentra fuera del rango de los ECA (ver figura 4.3).

Las concentraciones de As (62.5 – 1410 ppm), este metal es uno de los responsables de generar drenaje ácido mina. Las concentraciones analizadas en la laguna Choquene son altas y generan toxicidad en las proximidades de la laguna Choquene y cuenca abajo de la comunidad de Condoraque, Quilcapunco y Putina (Machacca, 2013).

4.2.2 Bario (Ba)

El bario en los diferentes sectores estudiados (tabla 4.10), muestran un valor máximo de 640 ppm y un mínimo de 40 ppm.

Tabla 4.10. Resultados de las concentraciones de bario.

Muestra	Unidad	Bario (Ba)	ECA Bario
M-C-01-01	ppm	460	2000
M-C-02-01	ppm	470	2000
M-C-03-01	ppm	640	2000
M-C-04-01	ppm	420	2000
M-C-05-01	ppm	330	2000
M-C-06-01	ppm	250	2000
M-C-07-01	ppm	160	2000
M-C-08-01	ppm	130	2000
M-C-09-01	ppm	230	2000
M-C-10-01	ppm	40	2000
M-C-11-01	ppm	80	2000
M-C-12-01	ppm	240	2000
M-C-13-01	ppm	430	2000
M-C-14-01	ppm	410	2000
M-C-15-01	ppm	390	2000
Máximo	ppm	640	
Mínimo	ppm	40	

Fuente: Laboratorio de Agq Perú Labs & Technological Services (AGQ).

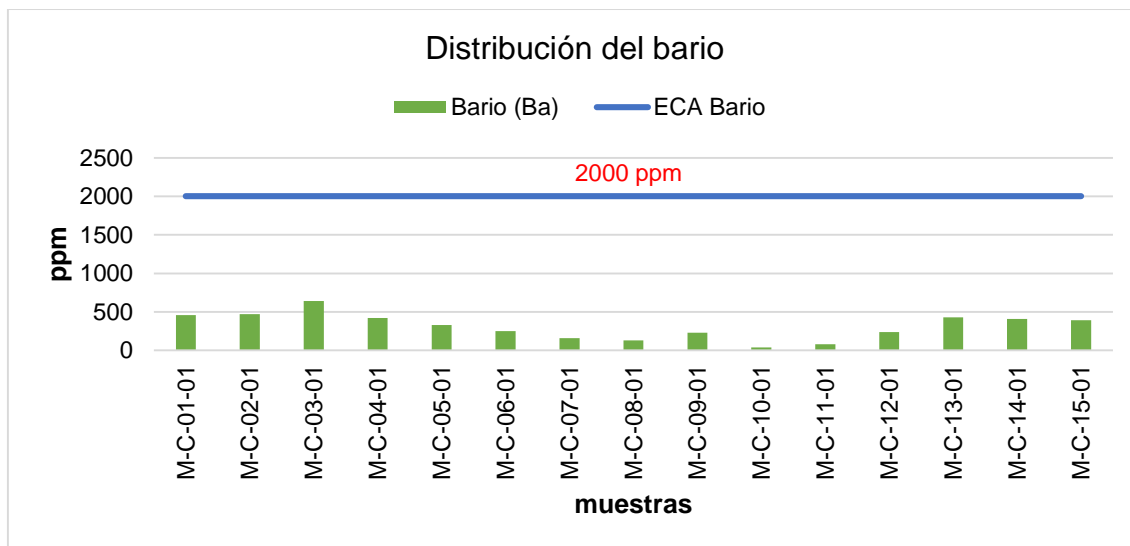


Figura 4.4. Contenido de bario en los suelos contaminados.

Fuente: Resultados estadísticos elaborados.

Después del resultado de los análisis estadísticos indican que los valores de bario (Ba) se encuentran dentro de los estándares de calidad ambiental para suelos industriales/extractivos, por lo cual se llega a una conclusión de que no

es peligroso para el medio ambiente ni para la salud humana en este tipo de suelos. Esto nos indica que los suelos de las riberas de la laguna Choquene no están contaminados con bario (Ba).

4.2.3 Cadmio (Cd)

En el análisis estadístico ninguna muestra sobrepasa a los valores establecidos por las ECA para suelos industriales/extractivos. Tienen un valor máximo de 1.91 ppm y un valor mínimo de 0.02 ppm a lo largo de la laguna Choquene (tabla 4.11).

Tabla 4.11. Resultados de las concentraciones de cadmio.

Muestra	Unidad	Cadmio (Cd)	ECA Cadmio
M-C-01-01	ppm	0.03	22
M-C-02-01	ppm	0.49	22
M-C-03-01	ppm	1.91	22
M-C-04-01	ppm	0.03	22
M-C-05-01	ppm	0.04	22
M-C-06-01	ppm	0.03	22
M-C-07-01	ppm	0.14	22
M-C-08-01	ppm	0.04	22
M-C-09-01	ppm	0.11	22
M-C-10-01	ppm	0.07	22
M-C-11-01	ppm	0.02	22
M-C-12-01	ppm	0.28	22
M-C-13-01	ppm	0.08	22
M-C-14-01	ppm	0.15	22
M-C-15-01	ppm	0.05	22
Máximo	ppm	1.91	
Mínimo	ppm	0.02	

Fuente: Laboratorio de Agq Perú Labs & Technological Services (AGQ).

Las riberas de la laguna Choquene tienen un contenido promedio de cadmio (Cd) muy por debajo (figura 4.5) de lo que ordena los estándares de calidad

ambiental para este tipo de suelos, lo cual nos indica que los suelos de las riberas de la laguna Choquene no están contaminados con cadmio (Cd).

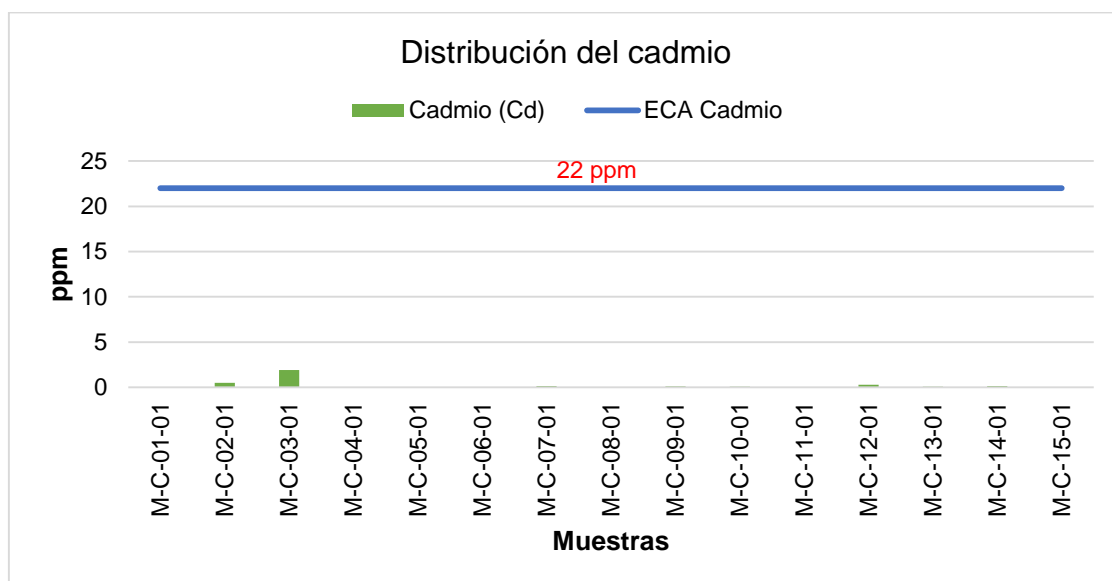


Figura 4.5. Contenido de cadmio en los suelos contaminados.

Fuente: Resultados estadísticos elaborados.

Hernández (2011), cita a Li-Tech (2007), indica que el Cd es un metal que tiene una fuerte tendencia de bioacumulacion, esto porque sus características químicas son similares al Zinc. El Cd se absorbe fácilmente en los seres humanos, tejidos de plantas y en los animales. Este elemento es toxico para todos los organismos y puede entrar al cuerpo humano en diferentes formas, por lo cual, aunque este en pequeñas concentraciones existe un riesgo para la población humana.

4.2.4 Cromo VI (Cr)

Los valores de cromo (Cr) obtenidos en la zona de estudio se encuentran fuera de los estándares de calidad ambiental (ECA) para suelos industriales/extractivos; los valores de cromo (Cr) obtenidos del análisis de

laboratorio reportan un alto contenido en los suelos contaminados con relaves mineros en las riberas de la laguna Choquene.

Tabla 4.12. Resultados de las concentraciones del cromo.

Muestra	Unidad	Cromo (Cr) ppm	ECA Cromo
M-C-01-01	ppm	34	1.4
M-C-02-01	ppm	32	1.4
M-C-03-01	ppm	13	1.4
M-C-04-01	ppm	25	1.4
M-C-05-01	ppm	23	1.4
M-C-06-01	ppm	22	1.4
M-C-07-01	ppm	11	1.4
M-C-08-01	ppm	11	1.4
M-C-09-01	ppm	38	1.4
M-C-10-01	ppm	4	1.4
M-C-11-01	ppm	9	1.4
M-C-12-01	ppm	31	1.4
M-C-13-01	ppm	28	1.4
M-C-14-01	ppm	35	1.4
M-C-15-01	ppm	15	1.4
Máximo	ppm	38	
mínimo	ppm	4	

Fuente: Laboratorio de Agq Perú Labs & Technological Services (AGQ).

Según la figura 4.6 el comportamiento del Cr se encuentra por encima de los estándares de calidad ambiental para suelos industriales/extractivos, en todos los puntos de estudio, se considera a los suelos de las riberas de la laguna Choquene contaminados por cromo; Por lo cual se requieren recuperar el suelo de este agente contaminante. Esta norma tiene como límite permisible una concentración de Cr de 1.4 ppm, el 100% de las 15 muestras analizadas en laboratorio sobrepasan este valor.

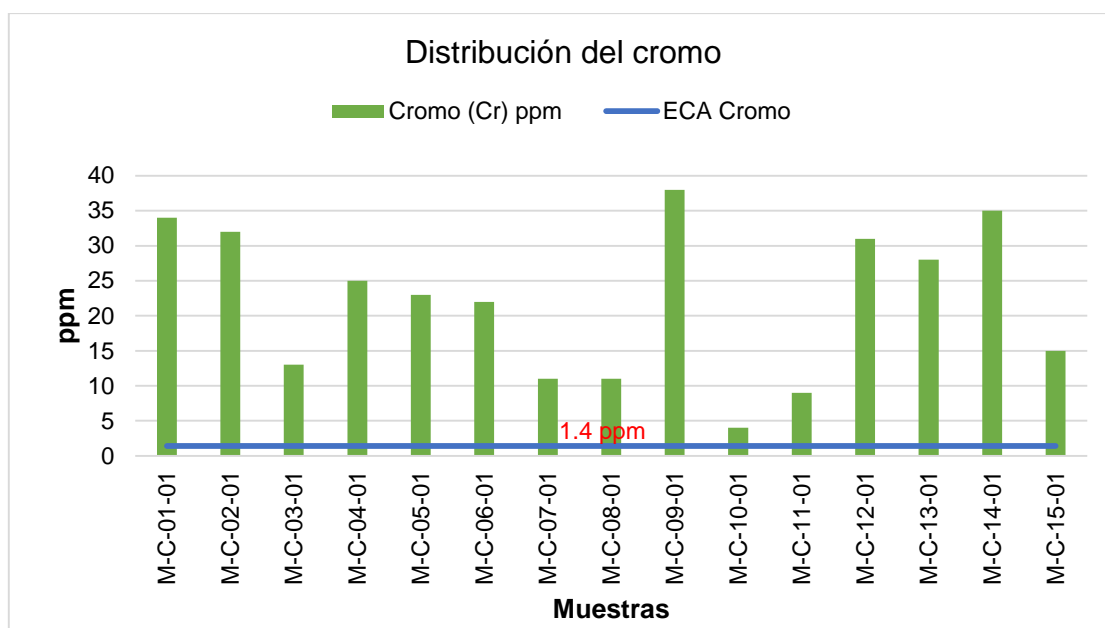


Figura 4.6. Contenido de cromo en los suelos contaminados.
Fuente: Resultados estadísticos elaborados.

Quispe (2017), cita a Chiang (1989), sostiene que los metales pesados como el Pb, Fe, Cu, Zn, As, Cr, Cd, Mg, y algunos reactivos químicos utilizados en las plantas de tratamiento de minerales, en el corto plazo no se degradan, biológica ni químicamente en la naturaleza; por lo que son considerados tóxicos para la mayor parte de organismos.

4.2.5 Mercurio (Hg)

El mercurio de los suelos analizados en laboratorio varía de 0.143 ppm a 2.98 ppm, los resultados se muestran en la tabla 4.13.

De acuerdo a la tabla 4.13 y figura 4.7, las riberas de la laguna Choquene está libre de contaminación por mercurio (Hg), los resultados de los análisis de laboratorio arrojan valores que se encuentran dentro de los estándares de calidad ambiental (ECA) para suelos de este tipo.

Tabla 4.13. Resultados de las concentraciones del mercurio.

Muestra	Unidad	Mercurio (Hg) ppm	ECA Mercurio
M-C-01-01	ppm	2.85	24
M-C-02-01	ppm	2.38	24
M-C-03-01	ppm	1.135	24
M-C-04-01	ppm	2.98	24
M-C-05-01	ppm	1.39	24
M-C-06-01	ppm	0.758	24
M-C-07-01	ppm	0.804	24
M-C-08-01	ppm	0.895	24
M-C-09-01	ppm	0.156	24
M-C-10-01	ppm	0.143	24
M-C-11-01	ppm	0.336	24
M-C-12-01	ppm	0.251	24
M-C-13-01	ppm	1.056	24
M-C-14-01	ppm	0.985	24
M-C-15-01	ppm	1.564	24
Máximo	ppm	2.98	
mínimo	ppm	0.143	

Fuente: Laboratorio de Agq Perú Labs & Technological Services (AGQ).

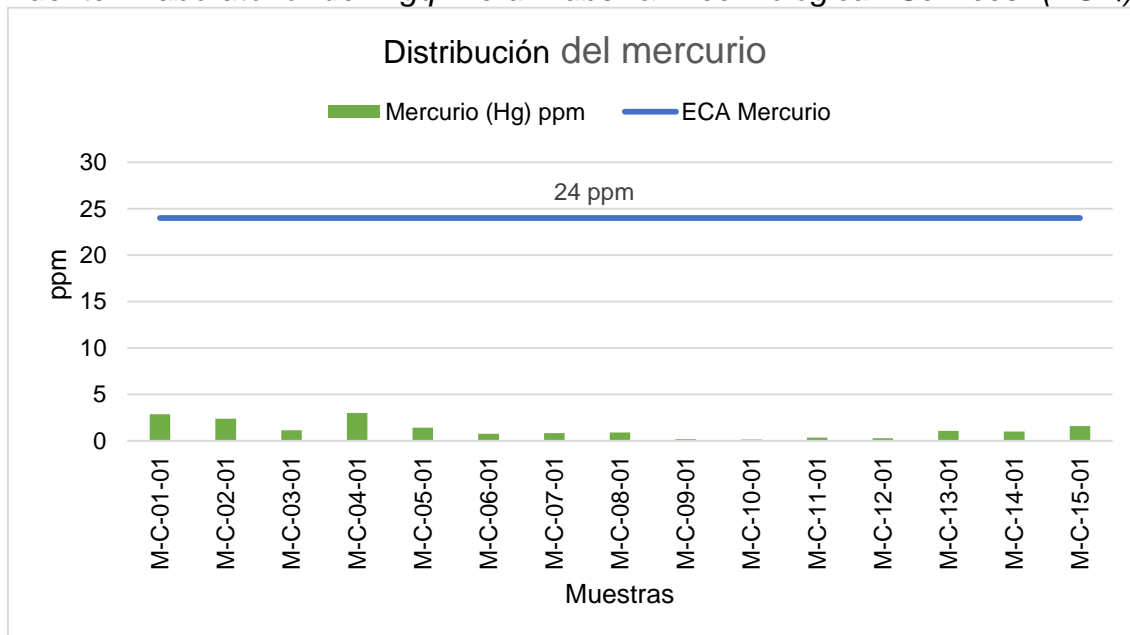


Figura 4.7. Contenido de mercurio en los suelos contaminados.

Fuente: Resultados estadísticos elaborados.

4.2.6 Plomo (Pb)

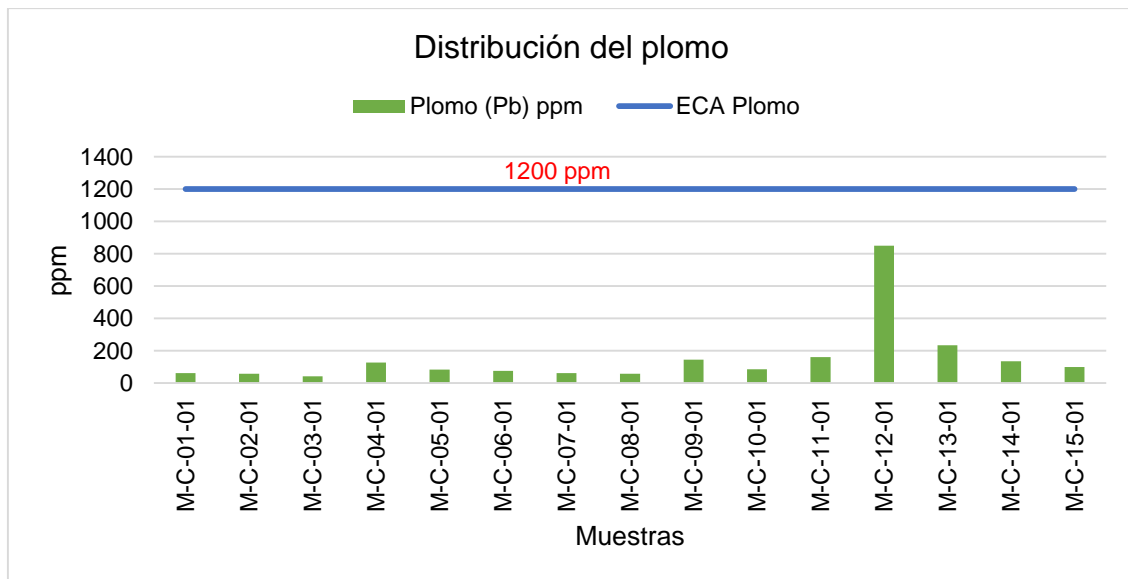
Las concentraciones de plomo en los suelos de las riberas de la laguna Choquene se encuentran dentro de los parámetros indicados por los ECA para suelos, los resultados indican un valor máximo de Pb fue 851 ppm y el valor mínimo de 41.3 ppm.

Tabla 4.14. Resultados de las concentraciones del plomo.

Muestra	Unidad	Plomo (Pb) ppm	ECA Plomo
M-C-01-01	ppm	62.3	1200
M-C-02-01	ppm	57.8	1200
M-C-03-01	ppm	41.3	1200
M-C-04-01	ppm	127.5	1200
M-C-05-01	ppm	83.9	1200
M-C-06-01	ppm	76.4	1200
M-C-07-01	ppm	61.9	1200
M-C-08-01	ppm	58.1	1200
M-C-09-01	ppm	146	1200
M-C-10-01	ppm	86.4	1200
M-C-11-01	ppm	161	1200
M-C-12-01	ppm	851	1200
M-C-13-01	ppm	235	1200
M-C-14-01	ppm	136	1200
M-C-15-01	ppm	99	1200
Máximo	ppm	851	
mínimo	ppm	41.3	

Fuente: Laboratorio de Agq Perú Labs & Technological Services (AGQ).

En relación a los estándares de calidad ambiental para suelos; los resultados se encuentran muy por debajo de este parámetro en todos los puntos de estudio tal y como se muestra en la figura 4.8.



*Figura 4.8. Contenido de plomo en los suelos contaminados.
Fuente: Resultados estadísticos elaborados.*

Puga et al. (2006), realizaron estudios de los suelos contaminados por metales pesados a diferentes profundidades y distancias, reportando resultados para Pb arriba de 1000 ppm en la parte superficial a una distancia de 300 m, del sitio más cercano a la zona de depósito de residuos mineros, mientras que, a una distancia a 3000 m, el sitio más retirado de los residuos mineros, se encontraron concentraciones de plomo de 706 ppm.

El Pb en las riberas de la laguna Choquene no representa un peligro para el medio ambiente. Machacca (2013), en su estudio realizado en los suelos de la laguna Choquene encuentra valores Pb de 27.6 ppm que se encuentra dentro de los valores permitidos por las normas peruanas.

4.2.7 Consideraciones

- Los residuos mineros metalúrgicos de las riberas de la laguna Choquene se encuentran con un alto contenido de metales pesados (arsénico y cromo), que viene ocasionando daños al ecosistema. Las

concentraciones de arsénico (As) y cromo (Cr) en el suelo sobrepasan los estándares de calidad ambiental para suelos extractivos/industriales de tal forma es considerado un alto riesgo para el ecosistema.

- El bario (Ba), cadmio (Cd), mercurio (Hg) y plomo (Pb) se encuentran dentro de los valores permitidos por los ECA para suelos industriales/extractivos establecidos en el D. S. N° 002-2013-MINAM. Por lo tanto, las riberas de la laguna Choquene se encuentran libre de contaminación de estos metales.

4.3 Diseño de la cobertura

Para el diseño de la cobertura de los suelos de las riberas de la laguna Choquene, fueron analizados hasta cinco diferentes distribuciones de materiales, que dio como resultado la cobertura presentada a continuación, asimismo ésta disminuye de espesor cuando se tiene pendientes mayores a 4% (ver notas de la tabla 4.15).

La cobertura de material natural, consiste en tres capas de materiales naturales (en caso de tener una fundación mala se iban a utilizar cuatro capas) de la superficie hasta el contacto con el relave, tenemos las siguientes capas: 0.20m de capa de soporte (solo si se tiene mala fundación), 0.35 capa de retención de humedad (no se utilizó debido a que se retiró por completo el suelo contaminado) (ver notas de la tabla 4.15), 0.20 capa de drenaje y 0.20 capa de superficie. Mayores detalles y especificaciones están mostrados en la tabla 4.15.

Tabla 4.15. Diseño de cobertura natural.

CAPA	MATERIAL	SIMBOLO	ESPESOR (m)	FUNCION
*soporte	Arena y grava	GC-GM	----	Capa de protección, para evitar que dañe la capa de retención de humedad. Reduce la infiltración del agua y evita asentamientos.
**Retención de humedad	Suelo limoníticos y arcillosos	CH-MH	0.35	Forma una barrera capilar con el material granular reduciendo la migración de gases.
Drenaje	Arena y grava	GC-GM	0.20	Crea efectos de barrera capilar, reduce la acumulación de agua y reduce la presión intersticial en la cobertura.
superficie	Suelos orgánicos	OH-OL	0.20	Zona de transición entre la cobertura y el ambiente, reduce la erosión y crea las condiciones adecuadas para la vegetación.

*Esta capa será utilizada en relaves sueltos o suelos blandos de baja capacidad portante. Se podrá omitir en caso se observe una fundación competente o relaves secos densos, según sea determinado por el ingeniero supervisor en campo.

**Se utilizará espesor de 0.35 m para suelos con pendiente menores a 4% y 0.30 m para pendientes mayores a 4%.

Los vectores de velocidad de agua y saturación de la fundación son mostrados en la Figura 4.9 y 4.10 para 100 días de análisis.

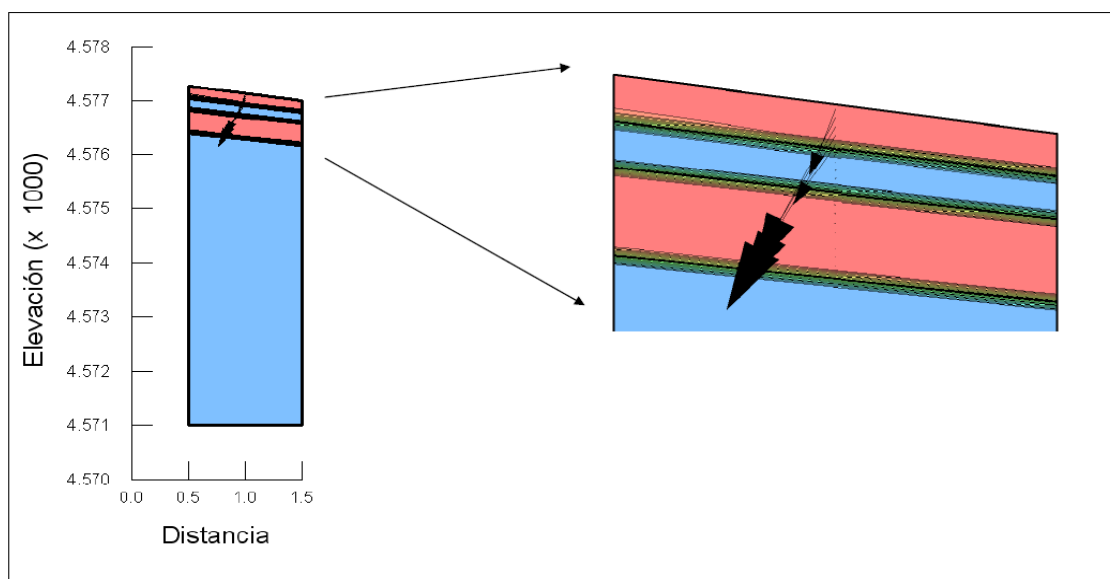


Figura 4.9. Vectores de velocidad de agua y saturación para 165 días de análisis cobertura natural.

Fuente: Laboratorio de Agq Perú Labs & Technological Services (AGQ).

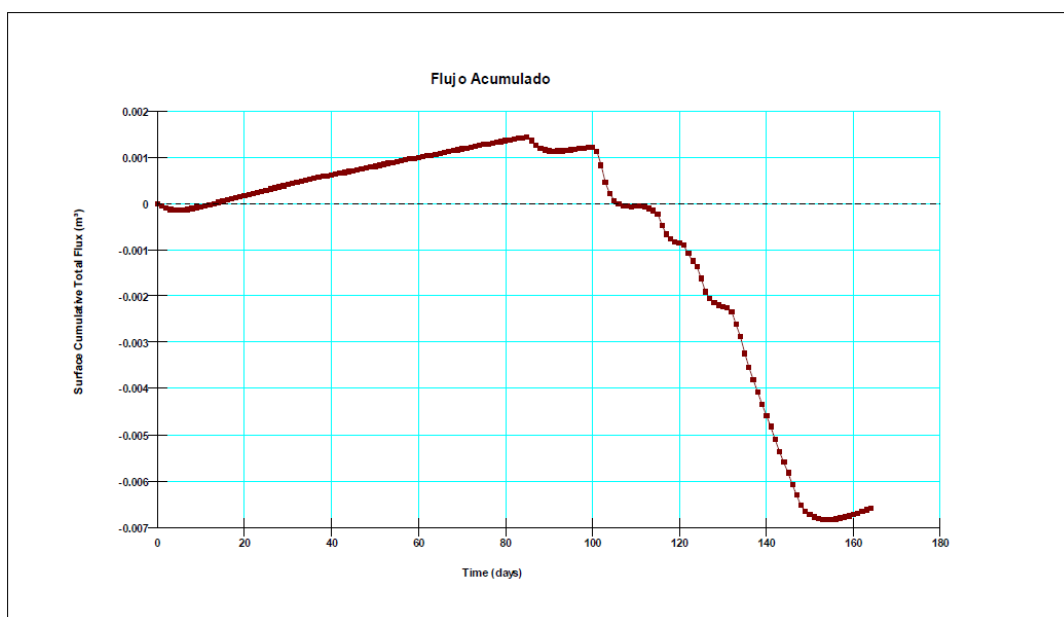


Figura 4.10. Percolación de agua hacia el depósito de relaves colapsados de la cobertura natural.

Fuente: Laboratorio de Agq Perú Labs & Technological Services (AGQ).

La percolación acumulada de agua hacia la fundación a lo largo del tiempo se muestra en las Figuras 4.11.

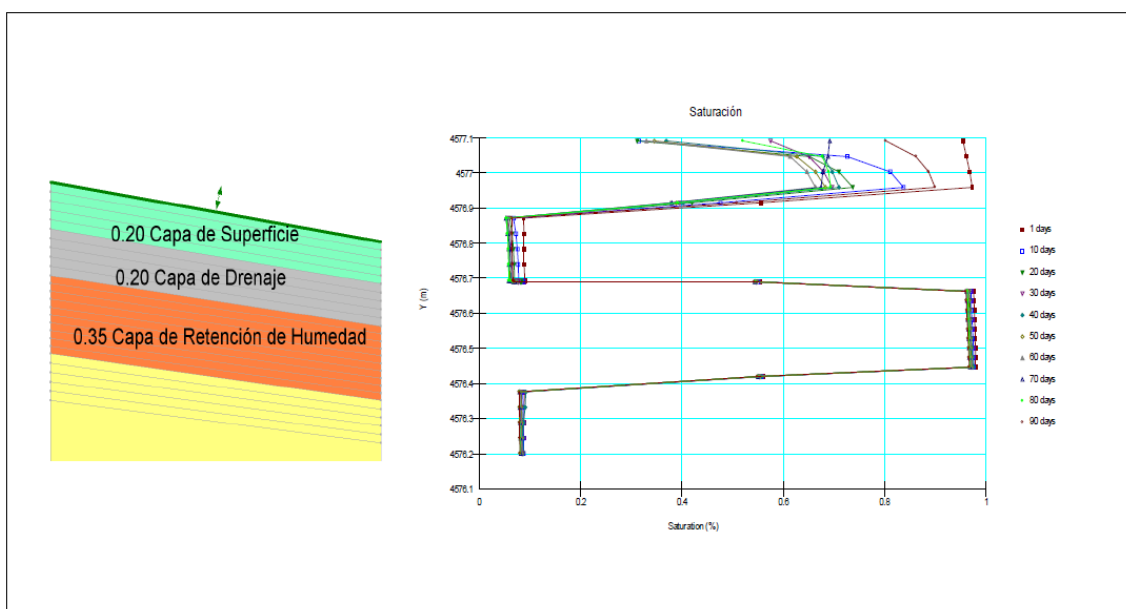


Figura 4.11. Perfil de saturación de la cobertura natural.

Fuente: Laboratorio de Agq Perú Labs & Technological Services (AGQ).

El resultado del balance hidráulico mostrado en la tabla 4.16 corresponde al análisis de la cobertura natural. La percolación nos indica la cantidad de agua que estaría ingresando a la fundación bajo las condiciones climáticas del año 2009. La percolación constituye un 1.3% del total de precipitación y tiene una velocidad de percolación de 6.9 mm por año. En esas condiciones se cumple con los criterios límites para la percolación de 30 mm por año (Berson et al. 2002) y de 1.5% de la precipitación (Hauser, 2009).

Tabla 4.16. Balance hídrico de la cobertura natural para 165 días.

Balance de agua	mm	%
Precipitación	544.4	100
Evaporación actual	406.3	74.6
Percolación	6.9	1.3

Fuente: Estación meteorológica mina Sillustani – MINSUR S.A.

4.3.1 Estimado de cantidades

4.3.1.1 Materiales naturales

Para este diseño se ha tenido en cuenta los materiales naturales en la zona que no sean generadores de drenaje ácido.

A continuación, se presentan los espesores calculados en el presente estudio. Esta disposición de materiales se va a disponer en las riberas de la laguna Choquene zona comprendida entre el dique y la parte sur de la laguna Choquene.

En la tabla 4.17 se presentan los espesores de la cobertura propuesta para las riberas de la laguna Choquene que presentan los relaves, los cuales van a ser removidos y ubicados en el depósito de relaves existente.

Tabla 4.17. Espesores de las capas de las riberas de la laguna Choquene.

Capas	Material	Espesor (cm)
Soporte	Lastre, gravas limosas	20
Superficie	Suelo orgánico	20

Fuente: (Schlumberger Water Services, 2014).

4.3.1.2 Volúmenes requeridos de cada material

En la siguiente tabla se muestran los volúmenes requeridos de cada material. Siempre considerando que los materiales propuestos para todas las coberturas no son generadores de aguas ácidas.

Tabla 4.18. Espesores y volúmenes de los materiales naturales.

Capas	Material	Espesor (m)	Superficie (m ²)	Volumen (m ³)
Soporte	Gravas	0.2	2224.443	444.8886
Superficie	Material orgánico	0.2	2224.443	444.8886

Fuente: Elaboración propia.

4.3.2 Revegetación

Para este fin ha sido previsto una cobertura de 0.40 m de espesor, conformada por dos capas de material natural, esta cobertura ha sido colocada desde la superficie hasta el contacto con la fundación de material no contaminado respetando el siguiente orden: 0.20m capa de drenaje y 0.20m capa de superficie. Los detalles y especificaciones se muestran en la tabla 4.17.

Se realizaron trabajos para la regeneración natural o revegetación y restauración ambiental en las áreas directamente afectadas, este proceso de revegetación se inició con la incorporación de material orgánico (top soil) rico en nutrientes para el desarrollo de las plantas, trae consigo gran cantidad de

semillas de especies propias del lugar que germinan y se desarrollan rápidamente favoreciendo a la recuperación de las zonas intervenidas por el proyecto.

4.3.2.1 Material orgánico

El material denominado material orgánico (Top Soil) se colocó sobre la cobertura final de cierre, el cual favorece la vegetación nativa del terreno. Este material proviene de la descomposición de los restos vegetales o animales y que por la acción de microorganismos se transforman en material fertilizante. Dicho material se puede obtener de áreas cercanas (canteras), de los taludes de corte, botaderos de top soil, etc.

4.4 Evaluación de suelos sustituidos

En esta parte de la investigación se presentan los resultados más relevantes que permiten apreciar el comportamiento del control físico químico en las riberas de la laguna Choquene. Las acciones de recuperación de estos suelos mineros se han basado en la técnica de sustitución de suelos (remoción del material contaminante), las cuales incluyen la estabilidad fisicoquímica para frenar la acidez y mejorar las propiedades físicas y químicas del suelo.

4.4.1 Calicatas

En el programa de investigación de campo para la obtención de resultados finales se consideró la excavación de tres (03) calicatas, fueron convencionalmente ubicadas y distribuidos en diferentes sitios a lo largo de las riberas de la laguna Choquene, cabe indicar que la excavación de calicatas se

realizó manualmente, apoyados por personal de campo proporcionadas por SILLUSTANI – MINSUR S.A. En cada una de las calicatas se llevó a cabo una detallada descripción de los tipos de suelos encontrados. Asimismo, se tomaron muestras disturbadas representativas, las cuales fueron identificadas y almacenadas en bolsas plásticas para su envío al laboratorio.

Tabla 4.19. Resumen de calicatas muestreadas.

Muestra	Nivel de agua	Top soil	Grava	Coordenadas		Prof. Total (m)
				Este	Norte	
M-C-01-01	NP	0.19	0.19	426788.89	8372253.3	0.38
M-C-02-01	NP	0.2	0.19	426834.07	8372242.6	0.39
M-C-03-01	NP	0.17	0.22	426878.3	8372223.7	0.39

Abreviatura: NP: No presenta.

Fuente: *Elaboración propia.*

4.4.2 Ensayos geoquímicos

4.4.2.1 Ensayo de Balance Ácido Base (ABA)

Con la finalidad de evaluar la potencialidad de generación de drenaje ácido (DAR) en los suelos recuperados en las riberas de la laguna Choquene se ha ejecutado tres (3) ensayos estáticos de balance ácido – base (ABA). Las mismas que fueron realizados en el laboratorio de AGQ Perú Labs & Technological Services (AGQ), los resultados de los ensayos realizados a las muestras se resumen en la tabla 4.20 y los registros de los resultados en los laboratorios se muestra en el Anexo 2.

Para la evaluación del drenaje ácido se ha adoptado las siguientes consideraciones para el cálculo generación de drenaje ácido:

- Si $PNN > +20Kg CaCO_3/ton$: No se producirá drenaje ácido.

- Si $PN/MPA > 4.0$: No se producirá drenaje ácido.
- Si $-20 < PNN < +20$: Rango de incertidumbre
- Si $PNN < -20Kg CaCO_3/ton$: Sí se produciría drenaje ácido.

Tabla 4.20. Resultados de análisis balance ácido base (ABA).

Muestra	Azufre total	Potencial ($kg CaCO_3/ton$)			Relación PN/MPA (NPR) >4.0
		MPA	PN	PNN	
M-C-01-01	0.01	<3.1	1.46	1.458	<-161.29
M-C-02-01	0.02	<3.1	1.94	1.944	<-161.29
M-C-03-01	0.02	<3.1	3.4	3.402	<-161.29

Dónde: PN (potencial neto), PNN (potencial neto de neutralización), MPA (máximo potencial de acidez).

No genera drenaje ácido

Fuente: Laboratorio de Agq Perú Labs & Technological Services (AGQ).

Del cuadro anterior se puede decir que:

- El cociente PN/MPA o NPR (Ratio de Potencial de Neutralización) para las tres (3) muestras ensayadas, se concluyen que todas las muestras no son generadoras de drenaje ácido.
- Los valores de efervescencia registrados en las muestras indican que las muestras ensayadas presentan nula efervescencia.
- Los contenidos de azufre total (S) que se presentan en las muestras indican que: Las muestras se encuentran por encima de 0.01.

4.4.2.2 pH

La reacción del suelo (pH), en las áreas recuperadas muestra en promedio que son suelos neutros.

El pH es un factor importante para la disponibilidad de los metales pesados, ya que a pH ácido la mayoría de los metales están disponibles, excepto el

arsénico, molibdeno, selenio y cromo estos metales mencionados están más disponibles en un pH alcalino (Garcia & Dorronsoro, 2002)

Tabla 4.21. Resultados de análisis de pH.

MUESTRA	pH pasta	Condición
M-C-01-01	7.52	Medianamente alcalino
M-C-02-01	6.78	Neutro
M-C-03-01	6.6	Neutro

Fuente: Laboratorio de Agq Perú Labs & Technological Services (AGQ).

CONCLUSIONES

Los suelos impactados en las riberas de la laguna Choquene son de clase textural arenoso (relaves) con poco contenido de grava y con un contenido de humedad promedio de 19.45%. Con respecto a las propiedades químicas, los suelos de relaves tipo arenoso tienen valores de pH considerados fuertemente ácido, asimismo son suelos de bajo contenido de carbono orgánico, de modo que el contenido de materia orgánica es muy bajo (46.67%) y solo una muestra (M-C-12-01) tiene un contenido óptimo de materia orgánica. De igual forma, los valores de generación de DAR, 14 muestras tienen una tendencia o alto potencial de generar drenaje ácido y una muestra está en un rango de incertidumbre.

Las riberas de la laguna Choquene objeto de este estudio presentan características geoquímicas muy heterogéneas, superando los niveles de referencia de metales de acuerdo a los ECA para suelos industriales/extractivos, donde se establecen los diferentes límites tanto para considerar un suelo contaminado como para realizar tareas de intervención inmediata. De acuerdo con las concentraciones de metales analizados. Estos suelos son calificados como contaminados donde son de destacar especialmente el arsénico (As) con una concentración de 326ppm y de Cromo (Cr) con una concentración de 38ppm.

El modelo de cobertura cumple con los criterios establecidos para el diseño de un cobertor, reduciendo la percolación a valores menores al 1.5% de la precipitación y manteniendo valores de la capa de retención de humedad por encima del 80%.

Los resultados del análisis de los suelos sustituidos no generan drenaje ácido, el cociente PN/MPA o NPR (Ratio de Potencial de Neutralización) para las tres (3) muestras ensayadas.

RECOMENDACIONES

- Se recomienda realizar estudios de evaluación del agua en la cancha de relaves (aguas arriba de la laguna Choquene), para conocer la calidad en cuanto a la concentración de metales pesados y pH.
- Se recomienda realizar investigaciones sobre las soluciones más adecuadas para la neutralización del DAM y remediación de los impactos ambientales del relave, tomando en cuenta los costos y cantidades necesarias de insumos.
- Se recomienda realizar estudios de estabilidad física y química a las canchas de relaves mineros, estos pueden ser fuente de contaminación a las aguas de la laguna Choquene, ubicados aguas arriba de la laguna Choquene.
- Aplicar una técnica de bioremediación de suelo, a los alrededores de la laguna Choquene.
- Se recomienda realizar estudios de evaluación de metales pesados en los suelos, aguas arriba y aguas abajo de la laguna Choquene, para evitar daños irremediables en el medio ambiente y no generar futuros conflictos sociales, de tal forma tener una convivencia adecuada con las comunidades de Condoraque y Peña Azul; ambos sectores sean los beneficiarios con la actividad minera responsable.
- Los resultados del presente estudio servirán como antecedentes en futuras investigaciones, para una posible aplicación de recuperación de suelos.

REFERENCIAS

- Aduviri, O. (2006). *Drenaje ácido de mina generación y tratamiento*. Madrid: instituto geológico y minero de España.
- Alcántara Trujillo, M. C. (2015). *Recuperación de suelos de relaves mineros para convertirlos en áreas verdes en la planta piloto metalurgica de Yauris-UNCP*. Junin: Universidad Nacional del Centro del Perú.
- Berson C., H., Albright W., H., Roesler A., C., & Abichou, T. (2002). *Evaluation of final cover performance*. Tucson, AZ.
- Bustamante Ubaldo, J. L. (2007). *Remediación de suelos y aguas subterráneas por contaminación de hidrocarburos en los terminales de Mollendo y Salaverry de la costa peruana*. Lima: Universidad Nacional de Ingeniería.
- Carmona Garcés, D. M. (2012). *Recuperación de suelos acidificados y contaminados por minería metálica: Ensayos en columnas*. Universidad Politecnica de Cartagena de Ciencia y Tecnología Agraria.
- Cedron Lassús, M. F. (2012). *Elaboración de criterios para la transformación de pasivos mineros en activos socio-ambientales sostenibles*. Lima: Pontificia Universidad Católica del Perú.
- Empresa minera Sillustani S.A. (2008). *Plan de cierre de pasivos ambientales* .
- Etchevers J., D. (1998). *Análisis químico de suelos y plantas*. Estado de México: Centro de Edafología. Colegio de postgraduados.

- Fernández Linares, L. C., Rojas Avelizapa, N. G., Roldan Carrillo, T. G., Ramírez Islas, M. E., Zegarra Martínez, H. G., Uribe Hernández, R., . . . Arce Ortega, J. M. (2006). *Manual de técnicas de análisis de suelos aplicadas a la remediación de sitios contaminados*. Mexico: Mexico.
- Fredlund D., G., Xing , A., & Huang, S. (1994). *Predicting the permeability function for unsaturated soil using the soil–water characteristic curve*. Canadá.
- Garcia, I., & Dorronsoro, C. (2002). *Contaminación por metales pesados*. España: Departamento de edafología y química agrícola Universidad de Granada de España.
- GEO-SLOPE International Ltd. (2007). *Vadose zone modeling with VADOSE/W*.
- González Ramírez , A. m. (2008). *Diseño de metodología para la identificación de pasivos ambientales mineros en Colombia*. Medellín: Universidad Nacional de Colombia.
- Guzmán Alba, C. G. (2012). *Mitos y realidades de los planes de cierre de minas*. Lima: Universidad Nacional de Ingeniería.
- Hauser, V. (2009). *Evapotranspiration Covers for Landfills and Waste Sites*. CRC Press Taylor & Francis Group.
- Hernández Hernández, A. (2011). *Determinación de metales pesados en suelos de Natividad, Ixtlan de Juárez Oaxaca*. Ixtlan de Juárez, Oaxaca: Universidad de la Sierra Juárez.

- Li Lin, S. (2013). *Medición del potencial de generación de agua ácida para un relave en la zona central del Perú y sus necesidades de neutralización*. Lima: Pontificia Universidad Católica del Perú.
- López Falcón, R. (2002). *Degradación del suelo causas, procesos e investigación*. Mérida, Venezuela: Centro interamericano de desarrollo e investigación ambiental y territorial-Universidad de los Andes.
- Machacca Hanco, E. (2013). *Determinación de los metales pesados en la laguna Choquene, Quilcapunco - Putina - Puno*. PUNO: UNA-PUNO.
- MINAM. (2010). *Decreto Supremo N° 010-2010*.
- MINAM. (2013). *Decreto Supremo N° 002-2013*.
- MINAM. (2013). *Guía para muestreo de suelos, ECA para suelo*.
- MINEM. (1995). *Guía ambiental para el manejo de drenaje ácido de minas*. Lima: MINEM.
- Ministerio de Energía y Minas, MEM. (2009). *Guía para la elaboración de planes de cierre de pasivos ambientales mineros*. Lima: dirección general de asuntos ambientales mineros.
- Ministerio del Ambiente(MINAM). Dirección general de calidad ambiental. (2014). *Guía para la elaboración de planes de contaminación de suelos*. Lima: MAVET IMPRESIONES E.I.R.L.
- Ortiz Bernad, I., Sanz García, J., Dorado Valiño, M., & Villar Fernández, S. (2007). *Técnicas de recuperación de suelos contaminados*. Madrid:

Universidad de Alcalá-Dirección General de Universidades e Investigación.

Ospina Betancur, E. (2013). *Legislación colombiana de cierre de minas. ¿Es realmente necesaria?* Universidad Nacional de Colombia.

Oyarzun, R., Higuera, P., & Lillo, J. (2011). *Minería ambiental una introducción a los impactos y su remediación*. Madrid España: Ediciones GEMM.

Puga, S., Lebugre, T., Sosa, M., Quintana, C., & Campos, A. (2006). *Contaminación por metales pesados en suelo provocada por la industria minera*. Lima: Universidad Nacional Agraria la Molina.

Quispe Ñahui, E. G. (2014). *Caracterización física, química y biológica de suelos del distrito de Callamarca - Angaraes - Huancavelica*. Huancavelica - Perú: Universidad Nacional de Huancavelica.

Quispe Yana, R. F. (2017). *Evaluación de la concentración de metales pesados (cromo, cadmio y plomo) en los sedimentos superficiales en el río Coata, 2017*. Puno: Universidad Nacional del Altiplano.

Romero, A., Flores, S., & Medina, R. (2008). *Estudio de metales pesados en el relave abandonado de Ticapampa*. Lima: Universidad Nacional Mayor de San Marcos.

Schlumberger Water Services. (2014). *Diseño de coberturas del depósito de relaves y playas de laguna Choquene. Unidad minera Regina*.

Soriano Francia, J. H. (2013). *Selección de plantas que favorezcan la biorremediación de suelos contaminados de plomo, cinc y níquel*. Callao - Perú: Universidad Nacional del Callao.

Volke Sepúlveda, T., Velasco Trejo, J. A., & de la Rosa Perez, D. A. (2005). *Suelos contaminados por metaloides: Muestreo y alternativas para su remediación*. México: Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales Instituto Nacional de Ecología.

Wilson, W., Brussiere, B., & Guerrero, J. (2007). *Guía para el diseño de coberturas de depositos de residuos mineros*. Lima: Ministerio de energía y minas del Perú, Dirección General de asuntos Ambientales.